

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL**

EMANUEL ITAQUÊ DE NEGREIROS MOREIRA

**SELEÇÃO DE MÉTODO DE LAVRA PARA EXPLOTAÇÃO DE PEGMATITOS NA
PARAÍBA UTILIZANDO MÉTODOS DE NICHOLAS E NICHOLAS MODIFICADO**

Recife
2017

EMANUEL ITAQUÊ DE NEGREIROS MOREIRA

**SELEÇÃO DE MÉTODO DE LAVRA PARA EXPLOTAÇÃO DE PEGMATITOS NA
PARAÍBA UTILIZANDO MÉTODOS DE NICHOLAS E NICHOLAS MODIFICADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Minerais Industriais

Orientador: Prof. Dr. Júlio César de Souza

Recife
2017

Catálogo na fonte

Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

M838s Moreira, Emanuel Itaquê de Negreiros.

Seleção de método de lavra para exploração de pegmatitos na Paraíba utilizando métodos de Nicholas e Nicholas modificado / Emanuel Itaquê de Negreiros. - 2017.

132 folhas, il., tab.

Orientador: Prof. Dr. Júlio César de Souza.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2017.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Mineral. 2. Pegmatitos graníticos. 3. Seleção de métodos de lavra. 4. Método de Nicholas. 5. Método de Nicholas modificado. I. Souza, Júlio César de (Orientador). II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
EMANUEL ITAQUÊ DE NEGREIROS MOREIRA

TÍTULO

“SELEÇÃO DE MÉTODO DE LVRA PARA EXPLOTAÇÃO DE PEGMATITOS NA
PARAÍBA UTILIZANDO MÉTODOS DE NICHOLAS E NICHOLAS MODIFICADO”
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Minerais Industriais

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do
Prof. JÚLIO César de Souza, Considera o aluno
EMANUEL ITAQUÊ DE NEGREIROS MOREIRA, Aprovado.

Recife, 21 de dezembro de 2017

Prof. Dr. JÚLIO CÉSAR DE SOUZA
- Orientador - (UFPE) -

Prof. Dr. MÁRCIO LUIZ DE SIQUEIRA CAMPOS BARROS
- Examinador Interno - (UFPE)

Prof. Dr. DWIGHT RODRIGUES SOARES
- Examinador Externo - (IFPB)

Dedico este trabalho à minha família, minha esposa Elibe e amigos, por terem me dado a educação e tenacidade necessárias, tornando-me um homem cada vez mais humano, solidário e competente, sempre na busca da evolução pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me concedido a graça da vida e ter me proporcionado corretas direções nas minhas tomadas de decisão;

À minha família, pelo cuidado e dedicação em todas as etapas da minha vida e que me formaram como pessoa e como cidadão;

À minha esposa Elibe, pelo apoio incondicional durante a realização deste trabalho, e me deu forças para nunca desistir dos meus objetivos;

Ao orientador Dr. Júlio César de Souza pelos conselhos, orientações e contribuições que facilitaram e geraram as diretrizes para o êxito da pesquisa;

Ao Co-orientador Dr. Belarmino Barbosa Lira que nos auxiliou na orientação, coleta de dados e foi o principal elo com a empresa objeto de estudo;

À empresa MINEGRAN por nos ter apoiado durante a execução dos estudos, concedendo informações, dados e permitindo a coleta destes quando necessário;

À professora Dra. Lucila Ester Prado Borges e ao amigo de Mestrado André Jaques por terem contribuído bastante com este trabalho com a caracterização mineralógica das amostras estudadas;

Aos amigos Silas e Claudson pelo auxílio no preparo das amostras para os posteriores ensaios tecnológicos;

Ao amigo Jayson, que muito me aconselhou durante o período de escrita desta dissertação;

Aos demais amigos e colegas de mestrado, pelo apoio e companheirismo e que contribuíram direta ou indiretamente com a realização desse trabalho.

“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”
(Henry Ford)

RESUMO

A Província Pegmatítica da Borborema é uma região que contém várias ocorrências de pegmatitos graníticos que possuem grande potencial econômico. Contudo, essa região ainda convive com atividades rudimentares, com pouco ou nenhum apoio técnico e com baixo retorno econômico. Neste contexto encontram-se dois corpos pegmatíticos, os quais serão objeto de estudo desta dissertação, denominados Pegmatitos Facheiro e Mina Velha. Foram feitos estudos das condições geomecânicas desses dois corpos pegmatíticos, a partir de visita técnica para análise das condições estruturais dos maciços rochosos e coleta de amostras para execução de ensaios de compressão uniaxial, com intuito de determinar a resistência à compressão destas, e ensaios de índices físicos, para determinação de suas massas específicas. Com isto, foi possível indicar os três métodos de lavra mais promissores para cada um dos corpos pegmatíticos através da utilização de duas metodologias de seleção de método de lavra, os métodos de Nicholas e Nicholas modificado. Sabe-se que a seleção do método de lavra é uma das etapas mais importantes de um projeto de mineração, pois deve-se sempre buscar aquele que gere maior retorno econômico levando em consideração características intrínsecas do depósito mineral, porém, sempre levando em consideração os fatores segurança e sustentabilidade sócio-ambiental.

Palavras-chave: Pegmatitos graníticos. Seleção de métodos de lavra. Método de Nicholas. Método de Nicholas modificado.

ABSTRACT

The Pegmatitic Province of Borborema is a region that contains several granitic pegmatites occurrences that have great economic potential. However, this region still lives with rudimentary activities, with little or no technical support and low economic returns. In this context are two pegmatitic bodies, which will be object of study of this dissertation, denominated Facheiro and Mina Velha pegmatites. Studies of the geomechanical conditions of these two pegmatitic bodies were carried out, from a technical visit to analyze the structural conditions of the rock masses and sample collection for the execution of uniaxial compression tests, in order to determine the compressive strength of these, and tests of indices to determine their specific masses. With this, it was possible to indicate the three most promising tillage methods for each of the pegmatitic bodies through the use of two methodologies of selection of tillage method, the Nicholas and Modified Nicholas Method. It is known that the selection of the mining method is one of the most important stages of a mining project, since one should always seek the one that generates greater economic return taking into account intrinsic characteristics of the mineral deposit, however, always taking into account the safety and socio-environmental sustainability factors.

Keywords: Granitic pegmatites. Mining method selection. Nicholas method. Modified Nicholas method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Método de lavra a céu aberto, Mina Casa de Pedra, Congonhas (MG).....	24
Figura 2 - Abatimento em blocos	26
Figura 3 - Lavra por Paredes Longas	27
Figura 4 - Câmaras e pilares	27
Figura 5 - Realces em subníveis	28
Figura 6 - Abatimento por subníveis	29
Figura 7 - Lavra por Recalque	30
Figura 8 - Corte e enchimento	31
Figura 9 - Alargamento com estruturas retangulares.....	31
Figura 10 - Gráfico de Morrison (1976) para seleção do método de lavra.	40
Figura 11 - Classificação de Laubscher de 1981 para avaliação da estabilidade de cavidade no maciço rochoso	41
Figura 12 - Estabilidade da cavidade no maciço rochoso baseado no raio hidráulico	42
Figura 13 - Método dos Perfis Paralelos	58
Figura 14 - Zoneamento interno de pegmatito heterogêneo.....	60
Figura 15 - Localização e vias de acesso entre a capital paraibana e Tenório.	67
Figura 16 - Trajeto rodoviário até Tenório a partir de Juazeirinho/PB.	68
Figura 17 - Localização da área em estudo (em azul) e trajeto (em vermelho).	68
Figura 18 - Domínios da Província Pegmatítica da Borborema, em vermelho, área do projeto em estudo.....	70
Figura 19 - Mapa geológico com destaque para a área em estudo.	73
Figura 20 - Mapa com a localização dos 3 pegmatitos pesquisados e a encaixante.....	74
Figura 21 - Parede lateral de galeria escavada entre a rocha encaixante (vista na imagem) e o pegmatito Facheiro.	74
Figura 22 - Núcleo de Quartzo do Pegmatito Mina Velha.	75
Figura 23 - Parede de lateral de galeria transversal ao pegmatito facheiro.....	75
Figura 24 - Amostras (F1, F2 e F3) coletadas no pegmatito Facheiro.	77
Figura 25 - Amostras coletadas no pegmatito Mina Velha (V2, V3 e V4) e em sua encaixante (V1).....	77
Figura 26 - Corte das amostras coletadas em campo com equipamento manual de disco diamantado.	78

Figura 27 - Corpos de prova obtidos a partir do corte das amostras coletadas dos pegmatitos Facheiro (F1 e F2) e Mina Velha (V2, V3 e V4) e rocha encaixante (V1).	78
Figura 28 - Prensa hidráulica manual utilizada nos ensaios geomecânicos.	79
Figura 29 - Amostras a) Facheiro 2, b) Mina Velha 1 e c) Mina Velha 4.	80
Figura 30 - a) Forma de alumínio utilizada para comportar as amostras secadas na estufa b) para ensaio de índices físicos.	80
Figura 31 - Balança de precisão utilizada para obtenção dos pesos das amostras.	81
Figura 32 - Afloramento de xisto bastante intemperizado - encaixante do pegmatito facheiro	83
Figura 33 - Xisto aflorante em mina do facheiro – medição de atitude da rocha.	83
Figura 34 - Xisto aflorante na encaixante do pegmatito facheiro.	84
Figura 35 - Paredes da galeria perpendicular ao Pegmatito Facheiro à esquerda (a) e à direita (b).	85
Figura 36 - Pegmatito dentro da galeria da mina do facheiro.	85
Figura 37 - Xisto aflorante da encaixante do pegmatito facheiro.	86
Figura 38 - Afloramento de xisto da encaixante ao pegmatito facheiro.	86
Figura 39 - Xisto aflorante da encaixante do Pegmatito Mina do Meio.	87
Figura 40 - Afloramento de xisto na encaixante do pegmatito Mina Velha.	87
Figura 41 - Xisto encaixante entre os pegmatitos Mina do Meio e a Mina Velha.	88
Figura 42 - Ocorrência de quartzo róseo no pegmatito Mina velha.	89
Figura 43 - Face livre aberta no pegmatito Mina velha.	89
Figura 44 - Contato entre rocha encaixante (xisto) e corpo de minério (pegmatito Mina Velha).	90
Figura 45 - Em branco vista em planta dos corpos pegmatíticos Facheiro 1, Alto do Meio 1 e Mina Velha.	91
Figura 46 - Pegmatito facheiro (imagem obtida no software AutoCAD).	92
Figura 47 - Seção S1 vertical ao pegmatito Facheiro.	92
Figura 48 - Pegmatito Mina Velha (imagem obtida no software AutoCAD).	94
Figura 49 - Seção S2 vertical ao Pegmatito Mina Velha.	94
Figura 50 - Famílias de fraturas no maciço rochoso no pegmatito Facheiro.	96
Figura 51 - Face livre aberta no pegmatito Mina Velha.	97
Figura 52 - Família de fraturas na encaixante ao corpo Mina Velha.	98
Figura 53 - Amostra Facheiro 2, nota-se os três minerais principais que contém a amostra.	100
Figura 54 - Amostra Mina Velha 1 e seus principais minerais constituintes.	101
Figura 55 - Minerais que compõem a amostra Mina Velha 4.	101

Figura 56 - Vista de planta das seções equidistantes executadas no pegmatito Facheiro.	124
Figura 57 - Seção S1 Vertical ao pegmatito Facheiro	124
Figura 58 - Seção S2 Vertical ao Pegmatito Facheiro.....	125
Figura 59 - Seção S3 Vertical ao Pegmatito Facheiro.....	125
Figura 60 - Seção S4 Vertical ao Pegmatito Facheiro.....	126
Figura 61 - Seção S5 Vertical ao Pegmatito Facheiro.....	126
Figura 62 - Seção S6 Vertical ao Pegmatito Facheiro.....	127
Figura 63 - Seção S7 Vertical ao Pegmatito Facheiro.....	127
Figura 64 - Seção S8 Vertical ao Pegmatito Facheiro.....	128
Figura 65 - Seção S9 Vertical ao Pegmatito Facheiro.....	128
Figura 66 - Vista de planta das seções equidistantes executadas no pegmatito Mina Velha .	129
Figura 67 - Seção S1 Vertical ao Pegmatito Mina Velha.....	129
Figura 68 - Seção S2 Vertical ao Pegmatito Mina Velha.....	130
Figura 69 - Seção S3 Vertical ao Pegmatito Mina Velha.....	130
Figura 70 - Seção S4 Vertical ao Pegmatito Mina Velha.....	131
Figura 71 - Seção S5 Vertical ao Pegmatito Mina Velha.....	131
Figura 72 - Seção S6 Vertical ao Pegmatito Mina Velha.....	132
Figura 73 - Seção S7 Vertical ao Pegmatito Mina Velha.....	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos métodos de lavra segundo seus custos de produção.....	33
Tabela 2 - Comparativo entre os métodos a céu aberto baseados em parâmetros operacionais.	34
Tabela 3 - Comparativo entre os métodos subterrâneos baseado em fatores operacionais.	35
Tabela 4 - Aplicações de Métodos de Lavra Subterrâneas.....	38
Tabela 5 - Fluxograma para seleção do método de lavra.	39
Tabela 6 - Definição da geometria do depósito e da distribuição dos teores.	43
Tabela 7 - Características geomecânicas do maciço rochoso (corpo de minério, capa e lapa).	43
Tabela 8 - Ranking para as características geométricas e distribuição de teores para diferentes métodos de lavra.....	44
Tabela 9 - Ranking para as características geomecânicas para diferentes métodos de lavra. ..	45
Tabela 10 - Peso dos fatores.....	46
Tabela 11 - Método UBC para seleção de método de lavra.	47
Tabela 12 - Ranking para geometria e distribuição de teores para diferentes métodos de lavra.	48
Tabela 13 - Características geomecânicas <i>Rock Mass Rating (RMR)</i>	48
Tabela 14 - “ <i>Rock Substance Strength (RSS)</i> ”.....	48
Tabela 15 - Métodos de lavra usados pelas minas no Canadá durante o ano de 1994.	49
Tabela 16 - Bieniavski (CIR) “ <i>Rock mass rating</i> ”	50
Tabela 17 - Classificação do maciço rochoso segundo espaçamento e frequência de junta e índice J_v	52
Tabela 18 - Classificação RQD e seus valores.....	53
Tabela 19 - Valores para o índice J_n	53
Tabela 20 - Índice J_r e seus valores.	54
Tabela 21 - Índice J_w e suas atribuições.	54
Tabela 22 - Valores para SRF.....	55
Tabela 23 - Cálculo do RMR.....	56
Tabela 24 - Pesos para as orientações e mergulhos das descontinuidades com relação à escavação.	56
Tabela 25 - Classificação RMR de maciços rochosos.....	57
Tabela 26 - Reservas e produção de Feldspato no mundo.	62
Tabela 27 - Preços para o feldspato.....	62
Tabela 28 - Reservas de quartzo no Brasil ao ano de 2014.	63

Tabela 29 - Preços dos produtos de quartzo.	63
Tabela 30 - Reservas e produções de muscovita no mundo.	64
Tabela 31 - Preços médios anuais dos produtos de mica.	64
Tabela 32 - Reservas e produção de Nióbio no Brasil e no mundo.....	65
Tabela 33 - Preços médios anuais da liga Fe-Nb e Nb ₂ O ₅	65
Tabela 34 - Reservas e produções mundiais de Tântalo.....	66
Tabela 35 - Preços médios dos produtos da tantalita.....	66
Tabela 36 - Amostras preparadas para ensaio de resistência mecânica.	78
Tabela 37 - Espessura do corpo ao longo das seções transversais ao corpo pegmatítico Facheiro e espessura média.	93
Tabela 38 - Espessura do corpo ao longo das seções transversais ao corpo pegmatítico Mina Velha e espessura média.....	95
Tabela 39 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples.....	102
Tabela 40 - Massas específicas das amostras dos pegmatitos Facheiro e Mina Velha e da rocha encaixante.	103
Tabela 41 - Classificação RMR Facheiro.....	104
Tabela 42 - RMR Mina Velha	105
Tabela 43 - RMR Encaixante	105
Tabela 44 - Definição da geometria do corpo e das distribuição de teores para o pegmatito.....	106
Tabela 45 - Características geomecânicas do pegmatito Facheiro.	106
Tabela 46 - Características geomecânicas da rocha encaixante.	106
Tabela 47 - Pesos para as características geométricas e distribuição de teores do pegmatito Facheiro para os diferentes métodos de lavra.....	106
Tabela 48 - Pesos para as características geomecânicas do pegmatito Facheiro para os diferentes métodos de lavra.	107
Tabela 49 - Pesos para as características geomecânicas da capa do pegmatito Facheiro para os diferentes métodos de lavra.	107
Tabela 50 - Pesos para as características geomecânicas da lapa do pegmatito Facheiro para os diferentes métodos de lavra.	107
Tabela 51 - Ranking dos métodos de lavra mais indicados para o pegmatito Facheiro, de acordo com o Método de Nicholas.	108
Tabela 52 - Definição das geometria e distribuição de teores do pegmatito Mina Velha.....	108
Tabela 53 - Características geomecânicas do pegmatito Mina Velha.....	108
Tabela 54 - Características geomecânicas da rocha encaixante.	108

Tabela 55 - Pesos para as características geométricas e distribuição de teores do pegmatito Mina Velha para os diferentes métodos de lavra.....	109
Tabela 56 - Pesos para as características geomecânicas do pegmatito Mina Velha para os diferentes métodos de lavra.	109
Tabela 57 - Pesos para as características geomecânicas da capa do pegmatito Mina Velha para os diferentes métodos de lavra.....	109
Tabela 58 - Pesos para as características geomecânicas da lapa do pegmatito Mina Velha para os diferentes métodos de lavra.....	110
Tabela 59 - Ranking dos métodos de lavra mais indicados para o pegmatito Mina Velha, de acordo com o Método de Nicholas.	110
Tabela 60 - Características geométricas, distribuição de teores e propriedades geomecânicas do pegmatito Facheiro para diferentes métodos de lavra.	111
Tabela 61 - Propriedades geomecânicas da rocha encaixante do pegmatito Facheiro (Capa e Lapa).....	111
Tabela 62 - Pesos para geometria e distribuição de teores do pegmatito Facheiro para diferentes métodos de lavra.	111
Tabela 63 - Pesos para a classificação do maciço rochoso RMR (<i>Rock Mass Rating</i>) do corpo de minério Facheiro e encaixante para diferentes métodos de lavra.	112
Tabela 64 - Pesos para o RSS (<i>Rock Substance Strength</i>) do corpo pegmatítico Facheiro e encaixante para diferentes métodos de lavra.	112
Tabela 65 - Rankings dos métodos de lavra mais indicados para o pegmatito Facheiro, de acordo com o Método de Nicholas Modificado.	112
Tabela 66 - Características geométricas, distribuição de teores e propriedades geomecânicas do corpo pegmatítico Mina Velha para diferentes métodos de lavra.	113
Tabela 67 - Propriedades geomecânicas da rocha encaixante do pegmatito Mina Velha(Capa e Lapa).....	113
Tabela 68 - Pesos para geometria e distribuição de teores do pegmatito Mina Velha para diferentes métodos de lavra.	113
Tabela 69 - Pesos para a classificação do maciço rochoso RMR (<i>Rock Mass Rating</i>) do corpo de minério Mina Velha e rocha Encaixante para diferentes métodos de lavra.....	113
Tabela 70 - Pesos para o RSS (<i>Rock Substance Strength</i>) do corpo pegmatítico Mina Velha e Encaixante para diferentes métodos de lavra.	114
Tabela 71 - Ranking dos métodos de lavra mais indicados para o pegmatito Mina Velha, de acordo com o Método de Nicholas Modificado.	114

Tabela 72 - Comparativo entre os métodos de lavra subterrâneos promissores para os pegmatitos estudados.....	116
--	-----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	JUSTIFICATIVAS	21
1.2	OBJETIVOS	21
1.2.1	Objetivo geral	21
1.2.2	Objetivos específicos	21
1.3	Estrutura da dissertação	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	MÉTODOS DE LAVRA	23
2.1.1	Lavra a Céu Aberto (<i>Open Pit Mining</i>)	24
2.1.2	Lavra de Pláceres (<i>Placer Mining</i>)	25
2.1.3	Lavra por Dissolução (<i>Solution Mining</i>)	25
2.1.4	Abatimento por Blocos (<i>Block Caving</i>)	25
2.1.5	Lavra por Paredes Longas (<i>Longwall / Shortwall mining</i>)	26
2.1.6	Câmaras e Pilares / Realce e Pilares (<i>Room and Pillar / Stope and Pillar</i>)	27
2.1.7	Realces em Subníveis (<i>Sublevel Stopping</i>)	28
2.1.8	Abatimento por Subníveis (<i>Sublevel Caving</i>)	28
2.1.9	Lavra por Recalque (<i>Shrinkage Stopping</i>)	29
2.1.10	Corte e Enchimento (<i>Cut and Fill Stopping</i>)	30
2.1.11	Alargamento com Estruturas Retangulares (<i>Square Set Stopping</i>)	31
2.1.12	Corte das Fatias Superiores (<i>Top Slicing Stopping</i>)	31
2.1.13	<i>Novel Mining Methods</i>	32
2.1.14	Relação de custos entre os métodos de lavra	32
2.2	SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA	35
2.2.1	Método de Boshkov e Wright	37
2.2.2	Método de Hartman	39
2.2.3	Método de Morrison	40
2.2.4	Método de Laubscher	41
2.2.5	Método de Nicholas	42
2.2.6	Método UBC (Nicholas modificado)	46
2.3	CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO	51

2.3.1	Sistema RQD (<i>Rock Quality Designation</i>)	51
2.3.2	Sistema Q (<i>Rock Tunnel Quality</i>)	52
2.3.3	Sistema RMR (<i>Rock Mass Rating</i>)	55
2.4	CÁLCULO DE RESERVAS	58
2.5	PEGMATITOS	58
2.5.1	Classificação de pegmatitos	59
2.6	ASPECTOS ECONÔMICOS DOS PEGMATITOS	61
2.6.1	Feldspato	61
2.6.2	Quartzo	62
2.6.3	Mica (Muscovita)	63
2.6.4	Nióbio	64
2.6.5	Tântalo	65
3.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	67
3.1	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	67
3.2	DADOS SÓCIO-ECONÔMICOS	69
3.3	ASPECTOS FISIOGRAFICOS	69
3.4	HIDROGRAFIA	69
3.5	GEOLOGIA REGIONAL	70
3.5.1	Domínio Rio Piranhas-Seridó	71
3.5.2	Domínio São José do Campestre	71
3.5.3	Domínio da Zona Transversal	72
3.6	GEOLOGIA LOCAL	72
4	MATERIAIS E MÉTODOS	76
4.1	VISITA TÉCNICA À ÁREA DE ESTUDO	76
4.2	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DAS AMOSTRAS COLETADAS	76
4.3	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	77
4.4	ENSAIOS DE COMPRESSÃO	79
4.5	ANÁLISE PETROGRÁFICA	79
4.6	DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES FÍSICOS	80
4.7	METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA	81
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
5.1	VISITA TÉCNICA E COLETA DE AMOSTRAS NA ÁREA DE ESTUDO	82
5.1.1	Pegmatito Facheiro	82

5.1.2	Pegmatito Mina do Meio	87
5.1.3	Pegmatito Mina Velha	88
5.2	CARACTERÍSTICAS DO DEPÓSITO MINERAL	90
5.2.1	Aspectos geométricos dos corpos de minério	91
5.2.1.1	Pegmatito Facheiro	91
5.2.1.2	Pegmatito Mina Velha.	93
5.2.2	Condições Geomecânicas	95
5.2.2.1	Pegmatito Facheiro	95
5.2.2.2	Pegmatito Mina Velha	96
5.2.2.3	Encaixantes	97
5.3	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E DISTRIBUIÇÃO DE TEORES DOS PEGMATITOS FACHEIRO E MINA VELHA	98
5.3.1	Formato geral (<i>General Shape</i>)	98
5.3.2	Espessura (<i>Ore Thickness</i>)	99
5.3.3	Mergulho (<i>Plunge</i>)	99
5.3.4	Profundidade (<i>Depth Bellow Surface</i>)	99
5.3.5	Distribuição de teores (<i>Grade Distribution</i>)	100
5.4	CARACTERÍSTICAS MINERAIS E TECNOLÓGICAS DO MINÉRIO E ENCAIXANTES	100
5.4.1	Resultados dos ensaios de análise petrográfica	100
5.4.2	Resultados dos ensaios de Compressão Uniaxial	102
5.4.3	Ensaio de Determinação dos Índices Físicos	102
5.4.4	<i>Rock Substance Strength</i> (RSS)	103
5.4.5	<i>RMR (Rock Mass Rating)</i>	104
5.5	APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS PARA SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA	105
5.5.1	Nicholas	105
5.5.1.1	Facheiro	106
5.5.1.2	Mina Velha	108
5.5.2	Nicholas modificado (UBC)	110
5.5.2.1	Pegmatito Facheiro	111
5.5.2.2	Mina Velha	112
5.6	DISCUSSÕES	114

6	CONCLUSÃO E SUGESTÕES	117
	REFERÊNCIAS	118
	APÊNDICE A - SEÇÕES VERTICAIS EQUIDISTANTES EM 50 METROS DO PEGMATITO FACHEIRO	124
	APÊNDICE B - SEÇÕES VERTICAIS EQUIDISTANTES EM 50 METROS DO PEGMATITO MINA VELHA	129

1 INTRODUÇÃO

A região do Seridó Paraibano está inserida no chamado polígono da seca, sendo assim, possui regime pluviométrico intermitente, condicionando os pequenos agricultores locais a buscarem alternativas de sustento, o que os leva comumente à prática da exploração mineral.

Neste contexto, estão inseridas lavras de pegmatitos que são abundantes na Província Pegmatítica da Borborema. Esta Província é uma importante região produtora de diversos tipos de minerais, muitos destes provenientes dos corpos pegmatíticos. Lira et al (2016) enfatiza que esta detém pegmatitos ricos em minerais industriais e metálicos, que em geral são constituídos pelos minerais mica, feldspato, quartzo, caulim e columbita-tantalita. Porém, de acordo com Soares et al (2016) a lavra de pegmatitos no mundo ainda é executada de forma artesanal, sem a necessidade de grandes investimentos, limitados tanto por pequena potência e/ou extensão dos depósitos minerais, como por condições financeiras dos mineradores, sendo considerada “lavra artesanal e de pequena escala” e em grande parte executadas por garimpeiros. Desta forma tem-se como produto lavras superficiais ou subterrâneas pouco profundas, explotando-se pequena parte do recurso mineral, também são consideradas, em muitos casos, atividades de alto risco, devido à falta de infraestrutura, condições de trabalho, rigores da natureza e ausência de apoio técnico profissional (Soares et al, 2016). Alguns destes pegmatitos, por outro lado, têm porte suficiente para serem lavrados por métodos de alta produtividade, podendo ser um investimento seguro, e nesse caso, necessita-se entender melhor os corpos mineralizados para se buscar o método de lavra mais ajustado ao mesmo.

Segundo Macêdo (2001) a seleção do método de lavra para um depósito mineral é uma das mais importantes etapas de um projeto mineiro, pois pode definir o sucesso ou fracasso de tal, devendo-se levar em consideração características do depósito mineral para se aplicar aquele método de lavra mais ajustado a este, devendo ser uma lavra segura, econômica e ambientalmente sustentável.

Neste trabalho serão descritas metodologias de seleção de métodos de lavra para depósitos minerais, baseadas nas características geológicas e geomecânicas dos corpos mineralizados e rocha encaixante. A partir disto, será feito um estudo de caracterização geomecânica para dois corpos pegmatíticos (Facheiro e Mina Velha) e suas encaixantes que encontram-se no município de Tenório, Paraíba, onde será executado cálculo do Rock Mass Rating (RMR) para estes, além de ensaios de compressão uniaxial e de índices físicos,

objetivando determinação da resistência à compressão e massa específica das amostras dos corpos pegmatíticos e rocha encaixante, respectivamente, que serão dados utilizados para cálculo do RSS (Rock Substance Strength), o qual é importante na seleção dos métodos de lavra mais indicados tecnicamente para os corpos mineralizados. A partir destas caracterizações, duas destas metodologias (Métodos de Nicholas e de Nicholas Modificado - UBC) serão aplicadas para os dois corpos pegmatíticos, em busca dos três métodos mais indicados para a exploração dos mesmos. Pegmatitos estes trabalhados principalmente para a extração de Columbíta-Tantalita.

1.1 JUSTIFICATIVAS

A seleção do método de lavra é uma das etapas mais importantes de um projeto de lavra, pois proporciona o método mais ajustado ao depósito mineral. Vê-se que a lavra de pegmatitos é executada frequentemente através de minas artesanais de pequeno porte, e por assim serem, torna-se difícil buscar uma lavra econômica, segura e ambientalmente sustentável. Logo, subentende-se a necessidade de um estudo para se determinar o método para exploração do depósito mineral, de forma que os objetivos de longo prazo sejam atingidos da maneira mais segura possível.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é escolher o método de lavra mais indicado para dois corpos pegmatíticos de forma que se tenha futuramente um plano de lavra que melhor se ajuste aos corpos pegmatíticos nos quesitos técnicos e operacionais da lavra.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar as características geológicas dos corpos pegmatíticos Facheiro e Mina Velha
 - Geometria: Espessura, extensão e mergulho.

- Geomecânica: Grau de fraturamento, famílias de fraturas, rugosidade das fraturas, resistência à compressão e densidade da rocha.
- Determinar e descrever as técnicas de seleção do método de lavra para depósitos minerais e definir qual será utilizado para os depósitos minerais estudados.
- Após determinação das características geológicas dos corpos pegmatíticos e dos métodos de seleção de lavra, selecionar o método de lavra mais indicado tecnicamente para a lavra dos pegmatitos Facheiro e Mina Velha a partir das características supracitadas tanto dos corpos mineralizados como das rochas encaixantes.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação estrutura-se em 5 capítulos, onde serão apresentados da seguinte forma:

- 1- Inicialmente foi introduzido o contexto ao qual serão aplicadas as ferramentas de seleção do método de lavra mais indicado para depósitos minerais além da descrição sucinta da utilização de duas dessas ferramentas para dois corpos minerais no capítulo 1;
- 2- No Capítulo 2, serão explanadas informações a respeito da bibliografia consultada para execução do trabalho, com informações referentes a métodos de lavra e sua seleção, retratando também classificação geomecânica de maciço rochoso;
- 3- Informações intrínsecas dos corpos pegmatíticos e encaixantes e da região onde estes se inserem serão descritas no Capítulo 3;
- 4- Já no Capítulo 4 serão descritas as metodologias e os materiais utilizados para execução da seleção do método de lavra dos dois corpos pegmatíticos, assim como os ensaios necessários para tal;
- 5- No capítulo 5 serão demonstrados os resultados encontrados com a aplicação da metodologia proposta, baseados nos ensaios realizados e nas metodologias de Nicholas e Nicholas modificado aplicadas para seleção dos métodos de lavra;
- 6- Por fim será indicado o que este trabalho conclui a respeito dos resultados encontrados e sugere estudos ou ações futuras no capítulo conclusão e sugestões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A lavra de pegmatitos é feita em alguns casos a céu aberto, como, por exemplo, o pegmatito alto do feio, localizado no município de Pedra Lavrada, Paraíba, onde se extrai os minerais da zona III e IV deste corpo de minério através de uma lavra bastante artesanal (Soares et al, 2016). Já de acordo com Braga (2010) outro método de lavra atualmente utilizado é o de realces em subníveis (*sublevel stoping*) na mina da Cachoeira, pertencente à Companhia Brasileira de Lítio – CBL, cuja lavra se deve à extração do espodumênio, onde esta mina trabalha com galerias de dimensões 4mx4m permitindo as operações de despacho através de máquinas e caminhões. Outro método utilizado para lavra de pegmatitos é o de câmaras e pilares (Room and Pillar), que segundo Braga (2008) é utilizado na mina de Manitoba, Canadá, para extração de espodumênios em pegmatitos utilizando-se câmaras de 15 m de largura com área da seção reta dos pilares de 7,7 m². Estes métodos foram utilizados nestes pegmatitos por serem métodos que se encaixam com as características dos corpos de minério e produzem retorno econômico, mas sendo uma lavra segura e ambientalmente responsável.

Para a escolha dos métodos de lavra que mais se adequam aos depósitos minerais estudados, foi feita uma revisão bibliográfica, buscando as peculiaridades de diferentes métodos de lavra e ferramentas utilizadas para esta escolha, que baseiam-se em características intrínsecas dos corpos minerais e a partir disto, busca-se estes métodos mais indicados, atrelando essas características aos fatores puramente técnicos e operacionais dos métodos de lavra.

2.1 MÉTODOS DE LAVRA

Segundo Nicholas (1992) é de grande valia entender as características chave do depósito mineral requeridas para a seleção do método de lavra. Para isto fez-se uma revisão dos métodos de lavra mais importantes existentes na mineração, apresentada a seguir.

2.1.1 Lavra a céu aberto (*open pit mining*)

Nicholas (1992) afirma que a lavra a céu aberto engloba métodos e técnicas que removem o estéril antes ou concomitantemente a lavra do minério na superfície dos terrenos, sendo que esta categoria inclui a mineração em bancadas múltiplas (figura 1), cone ou cratera (*crater mining*), lavra em tiras (*strip mining*) e a lavra de rocha ornamental ou lavra em encosta (*quarrying mining*) e entende-se que os parâmetros razão máxima de descobertura e ângulo de talude limitam e indicam a aplicação dos métodos de lavra de acordo com as características da jazida e projeto de lavra. Geralmente são aplicáveis em lavra de minerais metálicos (*open cast mining*), lavra em tiras (*strip mining*) ou lavra em terraços (*terrace mining*), que geralmente são aplicadas em carvão mineral, e lavra de rochas ornamentais ou agregados para construção civil (*quarrying mining*) que objetivam produzir blocos de rochas com dimensões definidas ou rochas bitoladas tais como granitos, calcários e arenitos (Nicholas, op cit).

Figura 1 - Método de lavra a céu aberto, Mina Casa de Pedra, Congonhas (MG)



Fonte: Curi, 2011.

Segundo Hartman e Mutmanský (2002) a preferência na utilização de lavras a céu aberto deve-se ao aumento constante da eficiência nas operações desse tipo de lavra e à dificuldade crescente de se encontrar depósitos economicamente lavráveis por métodos subterrâneos. Curi (2017) afirma que mesmo com o aumento dos custos de reabilitação ambiental nas últimas décadas, esta constatação continua pertinente.

De acordo com Curi (2017) o método de lavra por bancadas é mais utilizado para corpos de minério que apresentam mais espesso capeamento.

2.1.2 Lavra de pláceres (*placer mining*)

Consoante com Nicholas (1992) são métodos de lavra a céu aberto onde o minério inconsolidado e de baixa coesão é lavrado e inicialmente concentrado usando gravidade e água, requerendo assim muita água disponível e o material deve ser friável, como cascalho, para que os fragmentos de rocha sejam transportados pela água e separados através da diferença de densidade das partículas minerais. Exemplos destes métodos são a dragagem, com dragas de caçambas em linha ou por corte e sucção, e o desmonte hidráulico com uso de monitores (Nicholas, op cit).

2.1.3 Lavra por dissolução (*solution mining*)

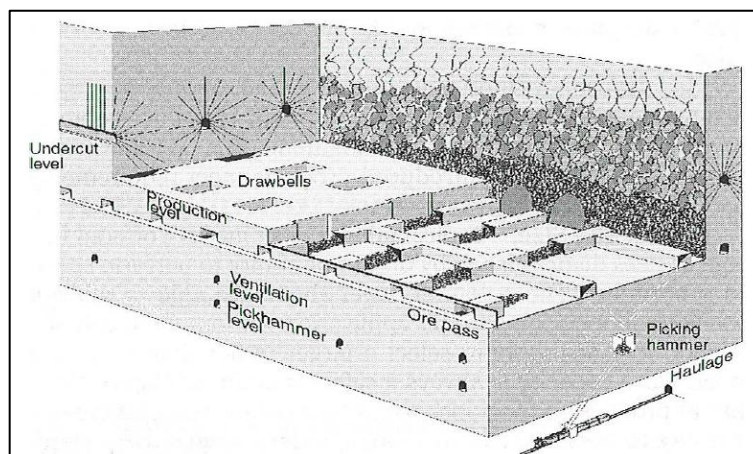
Nicholas (op cit) informa que este método requer água ou algum tipo de solvente com a mínima utilização de britagem e descartando o uso de moagem, envolvendo essencialmente a lixiviação e o beneficiamento mineral *in situ*, onde, através de furos executados no maciço rochoso, as soluções lixiviantes são injetadas e depois recuperadas através do mesmo furo, por outros furos executados para esse fim ou até mesmo por acessos subterrâneos (Muito utilizada para lavra de sal e enxofre). É um método que requer uma composição química correta da relação minério/solução lixiviante e que a rocha tenha porosidade e permeabilidade adequadas para que a solução tenha uma área de contato maior com o minério e assim ter uma maior e mais rápida recuperação do bem mineral de interesse (Nicholas, op cit).

2.1.4 Abatimento por blocos (*block caving*)

Este método consiste em lavar uma determinada área de rocha através do seu próprio peso e tendência de autofragmentar-se, onde, através de galerias subterrâneas, a rocha fragmentada vai sendo recuperada e transportada para a superfície (Figura 2), porém, para esse método a diluição pode se tornar um problema, visto que a fragmentação da rocha não pode ser controlada (Nicholas, op cit). O Abatimento por Blocos pode ser aplicado em qualquer maciço rochoso, porém deve ser determinada a área da face livre que venha a colapsar e assim fragmentar o maciço em questão, de uma forma que sua granulometria pós fragmentado viabilize a produção, não causando entupimentos nem perda de produção,

fazendo com que a distribuição granulométrica do maciço rochoso desmontado e o tamanho do depósito sejam parâmetros críticos (Nicholas, op cit). Dentro dos limites do Abatimento por Blocos, ainda existe uma escolha a ser feita sobre utilizar a gravidade para transporte, *Slushers* ou *LHDs (Load-Haul-Dump)* através de galerias onde, as condições do maciço rochoso e seu grau de fragmentação são os principais parâmetros para determinar qual destas abordagens deve ser usada (Nicholas, op cit).

Figura 2 - Abatimento em blocos

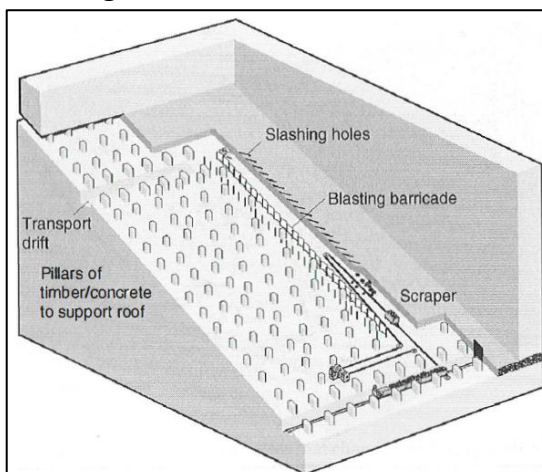


Fonte: Hustrulid e Bullock, 2001.

2.1.5 Lavra por paredes longas (*longwall / shortwall mining*)

Nicholas (op cit) afirma que nestes métodos de lavra as camadas de minério são lavradas pela operação contínua de desmonte mecânico (atrito, impacto e escarificação) ao longo de uma extensa face e área de trabalho (Figura 3), geralmente são aplicados para lavra de camadas subterrâneas de carvão e assim como o abatimento por blocos, este método gera subsidência do maciço acima da camada lavrada, porém, com uma abrangência menor. É aplicado para rochas mais friáveis, por utilizar desmonte mecânico e para depósitos horizontais e planos que estendam-se por uma grande área (Nicholas, op cit).

Figura 3 - Lavra por Paredes Longas

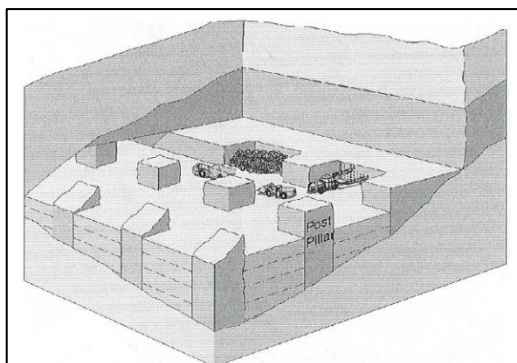


Fonte: Hustrulid e Bullock, 2001.

2.1.6 Câmaras e pilares / realce e pilares (*room and pillar / stope and pillar*)

Segundo Nicholas (op cit) nesses métodos similares, uma malha de câmaras e pilares é desenvolvida deixando sempre pilares para suportar o teto dos realces (Figura 4), onde a diferença entre os métodos câmaras e pilares e o realces e pilares é a altura da camada em que será aplicado o método de lavra. Os pilares e as câmaras não precisam ter dimensões uniformes, podendo ou não ser recuperados os pilares numa etapa posterior, a espessura máxima da camada para aplicação do método de lavra é de 50 m e as dimensões das câmaras e dos pilares são determinadas baseando-se na profundidade do depósito e na qualidade do maciço rochoso (Nicholas, op cit). Geralmente são aplicados para corpos de minério de forma tabular compostos de camadas estreitas ou moderadamente espessas e tipicamente horizontais ou com pequeno mergulho (Curi, 2017).

Figura 4 - Câmaras e pilares

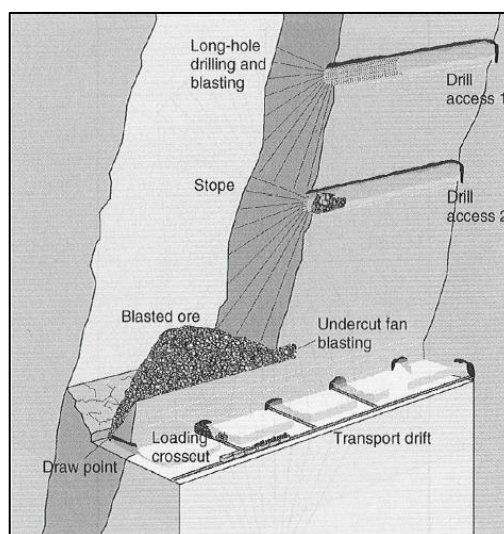


Fonte: Hustrulid e Bullock, 2001.

2.1.7 Realces em Subníveis (*Sublevel Stopping*)

De acordo com Nicholas (1992) o corpo de minério lavrado por esse método é perfurado, carregado com explosivos e detonado a partir de subníveis (Figura 5), diferindo do método realce e pilares (*stope and pillar*) pelo fato da espessura e largura do minério ser maiores, onde o minério é desmontado e retirado após desmonte, deixando realces que são ancorados e separados por pilares e não necessitam ser preenchidos posteriormente, mas se preenchidos, os pilares podem ser recuperados usando o mesmo método ou através do corte e enchimento (*cut and fill stopping*). Os parâmetros que regem este método são a geometria do depósito e a competência do maciço rochoso do corpo mineral e das rochas encaixantes. Assim como no método câmaras e pilares (*room and pillar*), as dimensões dos pilares e realces dependem da competência do maciço rochoso das encaixantes e da profundidade do depósito mineral (Nicholas, op cit).

Figura 5 - Realces em subníveis



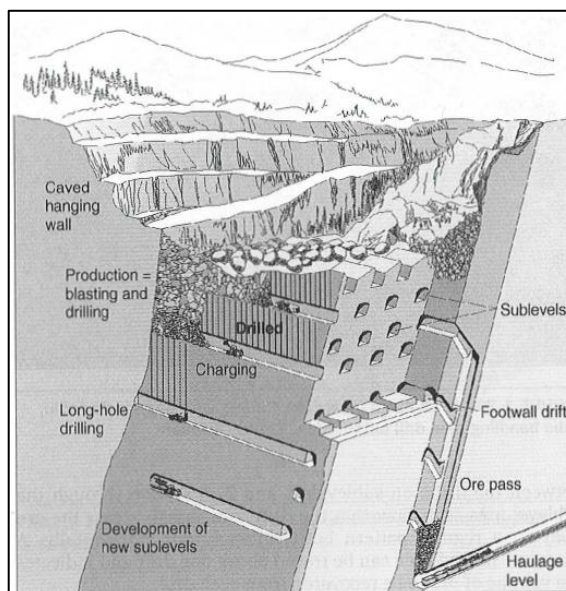
Fonte: Hustrulid e Bullock, 2001.

2.1.8 Abatimento por subníveis (*sublevel caving*)

Segundo Nicholas (op cit) é um método de lavra que se caracteriza pelo abatimento do teto, onde o minério é desmontado através de furos feitos a partir de galerias dispostas em subníveis (Figura 6). A diluição do minério com as encaixantes é um problema esperado e comum nesse método de lavra, onde este método é escolhido quando o maciço rochoso não se

fragmenta por gravidade devido à largura ser insuficiente ou por incompetência do maciço rochoso da encaixante, fazendo com que o controle do projeto da mina e a manutenção da face livre sejam fatores chave para o sucesso do projeto (Nicholas, 1992).

Figura 6 - Abatimento por subníveis

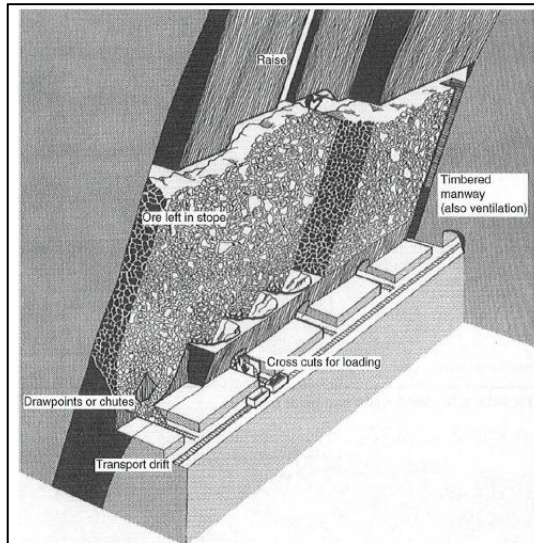


Fonte: Hustrulid e Bullock, 2001.

2.1.9 Lavra por recalque (*shrinkage stoping*)

De acordo com Nicholas (op cit) esse método de lavra é operacionalizado com a abertura de realces, utilizando o desmonte com explosivos onde a rocha desmontada vai sendo depositada dentro do próprio realce abaixo da parte do corpo de minério ainda a desmontar, sendo recuperada através de galerias desenvolvidas na parte inferior do realce, e serve para a sustentação das rochas encaixantes e como piso de trabalho para os operários (Figura 7). Esse método é bastante aplicado para corpos estreitos e com mergulho acentuado e quando os maciços rochosos das encaixantes possuem competência limitada (Nicholas, op cit).

Figura 7 - Lavra por recalque

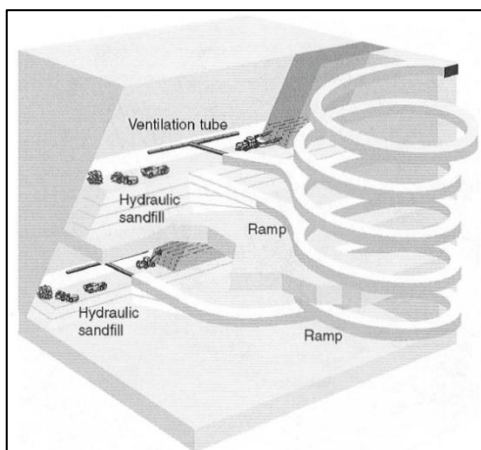


Fonte: Hustrulid e Bullock, 2001.

2.1.10 Corte e enchimento (*cut and fill stoping*)

Nicholas (1992) informa que este é outro método de lavra que opera com a abertura de realces, onde uma fatia horizontal do corpo de minério é lavrada, sendo posteriormente preenchida com material estéril que tem como finalidade sustentar as rochas encaixantes a posteriori e prover um piso de trabalho para os operários no desmonte da próxima fatia horizontal (Figura 8). Após o preenchimento de uma fatia é lavrada a fatia acima desta, repetindo-se o processo de preenchimento com material estéril até chegar-se ao limite vertical do bloco minerado, onde, no final da lavra, o realce formado pela retirada da rocha se encontra totalmente preenchido com material, evitando o colapso do mesmo e proporcionando a sustentação da área minerada. (Nicholas, op cit).

Figura 8 - Corte e enchimento

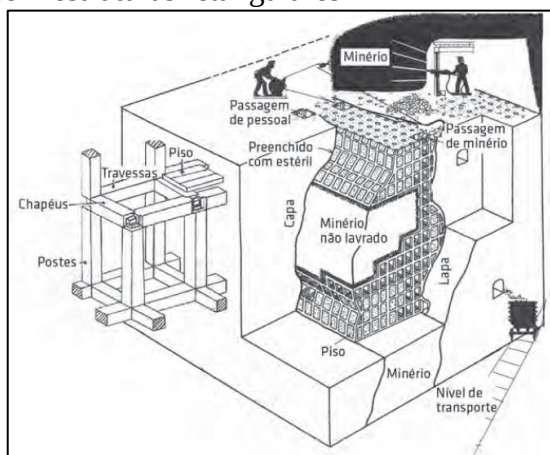


Fonte: Hustrulid e Bullock, 2001.

2.1.11 Alargamento com Estruturas Retangulares (*Square Set Stopping*)

Este método utiliza escoramento de madeira para sustentar as áreas escavadas, sendo aplicado quando a geometria do corpo é muito extensa e/ou irregular, dificultando a utilização do corte e enchimento e está em desuso pelo alto custo da madeira e pelo intenso trabalho manual requerido (Nicholas, 1992).

Figura 9 - Alargamento com estruturas retangulares



Fonte: Curi, 2017.

2.1.12 Corte das fatias superiores (*top slicing stopping*)

Nicholas (1992) afirma que este é outro método que está em desuso por conta do alto custo operacional para se trabalhar com a madeira de suporte e ao longo do tempo foi sendo

substituído principalmente pelo método de lavra abatimento por subníveis. A lavra por este método é feita a partir de galerias em subníveis onde a rocha é desmontada e o suporte, neste método é feito por uma estrutura de madeira (Nicholas, op cit).

2.1.13 Novel Mining Methods

De acordo com Nicholas (1992) estes métodos são chamados assim por conta da inovação tecnológica que os diferencia dos demais métodos de lavra tradicionais e são métodos que estão em fase de pesquisa ou desenvolvimento, ou que estão sendo testados, incluindo:

- *Rapid excavation.*
- *Automation and robotics.*
- *Hydraulic mining.*
- *Methane drainage.*
- *Underground gasification and combustion.*
- *Underground retorting.*
- *Marine mining.*
- *Nuclear mining.*

2.1.14 Relação de custos entre os métodos de lavra

Segundo Hartman (2002), de acordo com os custos de produção, os métodos tradicionais de lavra são classificados assim como a tabela 1. Esta tabela auxilia na seleção daquele método cujas produções são menos onerosas, porém só se leva em conta custos relativos à operação de produção.

Tabela 1 - Classificação dos métodos de lavra segundo seus custos de produção.

Local	Classe	Subclasse	Método de lavra	Commodities	Custo Relativo (%)
Superfície	Mecânico	-	A céu aberto	Metal, não-metal	5
			Rocha ornamental	Não-metal	100
			Lavra em tiras	Carvão, não-metal	10
			Auger	Carvão	5
	Aquoso	Plácer	Hidráulica	Metal, não-metal	5
			Dragagem	Metal, não-metal	<5
			Dissolução	Não-metal	5
Subterrânea	Não-suportados	-	Poço	Não-metal	5
			Lixiviação	Metal	10
			Câmaras e pilares	Carvão, não-metal	20
			Realces e pilares	Metal, não-metal	10
			Recalque	Metal, não-metal	45
			Realces em subníveis	Metal, não-metal	20
			Corte e enchimento	Metal	55
	Suportados	-	Alargamentos esteiados	Metal	70
			Lavra com estruturas retangulares	Metal	100
			Abatimento	Carvão	15
	Abatimento	-	Paredes longas	Carvão	15
			Abatimento em subníveis	Metal	15
			Abatimento em blocos	Metal	10

Fonte: Hartman, 2002.

Curi (2017) enfatiza que a lavra a céu aberto pode ser aplicada a jazidas aflorantes, jazidas de capeamento pouco espesso, jazidas acessíveis em encostas e jazidas lavráveis por poços de extração, onde os diferentes métodos de lavra a céu aberto possuem características relacionadas à sua operação que viabilizam ou não a utilização daquele método de lavra em detrimento de outro no depósito mineral em questão (Tabela 2).

Tabela 2 - Comparativo entre os métodos a céu aberto baseados em parâmetros operacionais

Método de lavra	Bancadas	Pedreiras	Tiras	Hidráulica	Dragagem	Poços	Química
Custo relativo (%)	5	100	10	5	1-5	5	10
Taxa de produção	Grande escala	Pequena escala	Grande escala	Regular	Grande escala	Regular	Regular
Produtividade (t/homem/turno)	Alta	Muito baixa	Alta	Moderada	Altíssima	Alta	Muito alta
Recuperação	Alta	Moderada	Alta	Moderada	Alta	Baixa	Muito baixa
Diluição	Moderada	Moderada	Baixa	Alta	Alta	Alta	Muito alta
Profundidade	Limitada	Limitada	Limitada	Limitada	Limitada	Ampliada	Limitada
Desenvolvimento requerido	Pouco e rápido	Moderado, lento e dispendioso	Moderado, mas rápido	Pouco e rápido	Regular	Regular	Regular
Investimento de capital	Alto	Pequeno	Alto	Pequeno	Alto	Alto	Regular
Flexibilidade	Flexível	Inflexível	Regular	Regular	Inflexível	Inflexível	Inflexível
Seletividade	Pouco seletivo	Muito seletivo	Regular	Regular	Pouco seletivo	Pouco seletivo	Pouco seletivo
Estabilidade das aberturas	Alta	Alta	Alta	Moderada	Moderada	Alta	Moderada
Riscos de impactos ambientais	Altos	Moderados	Muito altos	Altíssimos	Altíssimos	Moderados	Moderados
Disposição de estéréis e rejeitos	Intensa	Moderada	Moderada	Moderada	Intensa	Diminuída	Diminuída
Segurança	Boa	Boa	Boa	Regular	Boa	Boa	Boa
Outras características relevantes	Muito aplicado a minerais metálicos	Usa muita mão de obra	Próprio para escalas altíssimas de produção	Usado em aluviões	Necessita de cursos de água perene	A rocha deve estar fraturada	Não exige desmonte da rocha

Fonte: Curi, 2017.

Segundo Curi (2017) os métodos de lavra classificam-se em três grupos, os métodos com aberturas autossuportadas, com aberturas suportadas artificialmente e os sem suporte e a seleção destes métodos impactam decisivamente na segurança da escavação, produtividade, custo e recuperação da lavra (Tabela 3).

Tabela 3 - Comparativo entre os métodos subterrâneos baseado em fatores operacionais.

Método	Câmaras e pilares	Realces em subníveis	Recalque	Realce aberto	Corte e enchimento	Alargamentos esteados	Estruturas retangulares	Paredes longas	Abatimento em subníveis	Abatimento em blocos
Custo relativo (%)	25	30	50	20	60	70	100	15	15	10
Taxa de produção	Alta	Alta	Moderada	Alta	Moderada	Baixa	Muito baixa	Muito alta	Alta	Alta
Produtividade (t/homem/turno)	Alta (30-100)	Alta (15-30)	Baixa (5-10)	Alta (30-50)	Moderada (10-20)	Baixa (1-5)	Muito baixa (1-3)	Muito alta (50-200)	Alta (20-50)	Alta (20-50)
Custos operacionais típicos (US\$/t)	7-30	7-35	20-50	7-25	20-70	50-90	50-100	10-30	10-30	5-20
Recuperação	70-80	70-80	70-90	70-80	90-100	Acima de 90	Até 100	70-90	90-100	90-100
Diluição	Moderada	Moderada	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Muito baixa	Baixa	Moderada	Alta
Emissão de poeira (kg/t)	Não analisado	0,1-0,3	Não analisado	Não analisado	0,2-0,6	Não analisado	Não analisado	Não analisado	0,3-0,4	0,05-0,1
Desenvolvimento requerido	Pouco e rápido	Moderado, lento e dispendioso	Moderado, mas rápido	Pouco e rápido	Moderado, lento e caro	Rápido	Vagaroso	Moderado	Amplo, lento e caro	Amplo, lento e caro
Investimento de capital	Alto	Moderado a alto	Baixo	Moderado	Moderado	Baixo	Baixo	Alto	Moderado a alto	Alto
Flexibilidade	Flexível	Inflexível	Regular	Flexível	Moderada	Flexível	Flexível	Inflexível	Inflexível	Muito flexível
Seletividade	Seletivo	Não seletivo	Regular	Seletivo	Seletivo	Seletivo	Seletivo	Não seletivo	Não seletivo	Não seletivo
Estabilidade das aberturas	Moderada	Alta	Alta	Alta	Alta	Moderada	Alta	Alta	Moderada	Moderada
Subsistência	Moderada	Pouca	Pouca	Pouca	Pouca	Moderada	Pouca	Muita	Muita	Muita
Segurança	Boa	Boa	Boa	Boa	Moderada	Moderada	Ruim	Boa	Boa	Boa
Outras características relevantes	Muito aplicado ao carvão	Muito popular e moderno	Fluxo gravitacional	Usado em minas metálicas	Usa enchimento	Em desuso	Em desuso	Altamente mecanizado	Abatimento deve ser controlado	Abatimento deve ser controlado

Fonte: Curi, 2017.

2.2 SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA

De acordo com Curi (2017) a lavra corresponde à quarta fase da mineração, sendo as anteriores a prospecção, a exploração e o desenvolvimento, onde o método de lavra é a sistematização e coordenação das operações unitárias visando ao aproveitamento de uma jazida mineral.

A seleção do método de lavra é uma das etapas mais importantes de um projeto de mineração, pois consiste em escolher o método de lavra mais seguro, ambientalmente sustentável e mais rentável para um determinado corpo de minério (Macêdo et al 2001).

Segundo Nicholas (1992), as características do depósito que mais impactam na seleção do método de lavra são:

- Características Físicas e geológicas do depósito;
- Condições físicas do corpo de minério e das encaixantes (Capa e Lapa);
- Lavra e seus custos de capital;
- Taxa de produção;
- Disponibilidade e custo de mão-de-obra;
- Considerações ambientais.

Ainda segundo Nicholas (1992), geralmente não existe apenas um método de lavra apropriado para um determinado depósito mineral; usualmente existem dois ou mais métodos viáveis economicamente, onde cada método conterà problemas e características inerentes, sendo que os objetivos da seleção do método de lavra são maximizar os lucros da empresa (principal fator para as empresas), maximizar a recuperação do minério (quanto maior a recuperação do minério, menor será o custo de lavra, e maior será a aplicabilidade do método de lavra) e providenciar um ambiente seguro para os trabalhadores mineiros, não necessariamente nessa ordem.

Mutmansky (1992) afirma que para métodos de lavra a céu aberto, as características geológicas e geométricas do depósito mineral frequentemente são as mais importantes, diferentemente para os métodos de lavra subterrânea, onde as características geomecânicas são mais impactantes.

De acordo com Nicholas (1992) as técnicas de seleção de método de lavra primeiramente levam em consideração dois fatores chave, as características físicas e geológicas do depósito mineral e as condições geomecânicas do corpo de minério e das encaixantes (Capa e Lapa), onde as técnicas para avaliação de métodos de lavra são uma tentativa de definir e quantificar o que mineradores em décadas determinaram através de discussões, experiência e intuição. Portanto, as técnicas para seleção de método de lavra são similares, mas ainda sim diferentes, refletindo preferências pessoais em suas propostas e são baseadas em parâmetros físicos conhecidos do maciço rochoso e características geomecânicas do mesmo, nestes processos é tido como um dos fatores na tomada de decisão o stress vertical devido à profundidade, não se leva em consideração o stress horizontal para a escolha do método de lavra pelo método de Nicholas (Nicholas, op cit).

2.2.1 Método de Boshkov e Wright

Gelvez (2012) indica que este método foi proposto em 1973, sendo uma das primeiras técnicas qualitativas desenvolvidas para seleção de método de lavra subterrânea (Tabela 4). Utiliza para avaliação e comparação os parâmetros espessura, mergulho do corpo de minério e qualidade do maciço rochoso tanto do corpo de minério quanto das encaixantes para comparar os métodos de lavra tomando como referência mais uma tabela contendo alguns métodos já aplicados para as condições informadas (Nicholas 1992).

Tabela 4 - Aplicações de Métodos de Lavra Subterrâneas.

Forma do corpo de minério	Mergulho	Competência do corpo de minério	Competência das encaixantes	Métodos de Lavra comumente utilizados
Camadas estreitas	Baixo mergulho	Competente	Competente	Realces com pilares casuais Câmaras e pilares Paredes longas
Camadas espessas		Competente ou incompetente	Competente	Paredes longas
		Competente	Competente	Realces com pilares casuais Câmaras e pilares
		Competente ou incompetente	Incompetente	Corte de fatias superiores Abatimento em subníveis
		Competente ou incompetente	Competente	Underground glory hole
Camadas muito espessas				O mesmo para massas amorfas
Veios muito estreitos	Alto mergulho	Competente ou incompetente	Competente ou incompetente	Resuing
Veios estreitos (Width up to economic length of stull)	Baixo mergulho Alto mergulho	Competente	Competente	O mesmo para camadas estreitas
			Incompetente	Realces abertos Recalque Corte e enchimento Corte e enchimento Com estruturas retangulares Open underhand stopes Com estruturas retangulares Corte de fatias superiores Com estruturas retangulares
			Competente	
			Incompetente	
Veios largos	Baixo mergulho			O mesmo que para camadas estreitas ou massas amorfas
	Alto mergulho	Competente	Competente	Open underhand stopes Underground glory hole Recalque Realces em subníveis Corte e enchimento Métodos combinados de lavra Corte e enchimento Corte de fatias superiores Abatimento em subníveis Com estruturas retangulares Métodos combinados de lavra Open underhand stopes Corte de fatias superiores Abatimento em subníveis Abatimento em blocos Com estruturas retangulares Métodos combinados
				Incompetente
			Incompetente	
Massas amorfas		Competente	Competente	Underground glory hole Recalque Realces em subníveis Corte e enchimento Métodos combinados
		Incompetente	Competente ou incompetente	Corte de fatias superiores Abatimento em subníveis Abatimento em blocos Com estruturas retangulares Métodos combinados

Fonte: Adaptado de Boshkov e Wright, 1973.

2.2.2 Método de Hartman

Hartman (1987) desenvolveu um fluxograma como processo para seleção do método de lavra, baseado nas características geométricas do depósito e nas condições geomecânicas do corpo de minério (Tabela 5). É um sistema similar ao proposto por Boshkov e Wright, mas indica métodos de lavra mais específicos para o depósito mineral em avaliação. Hartman (1987) admite que este é um método qualitativo e deve ser usado como um primeiro passo para a escolha do método de lavra. Esta técnica inclui métodos de lavra a céu aberto e subterrâneos, lavra de carvão mineral e em rocha competente.

Tabela 5 - Fluxograma para seleção do método de lavra.

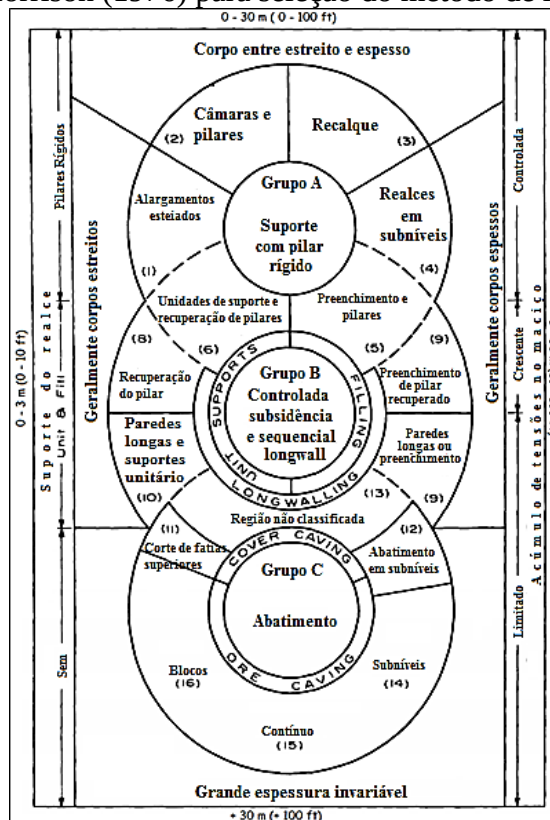
	Profundidade	Tipo de lavra	Minério, competência da rocha	CLASSE	Geometria	NOME
Depósito	Pouca profundidade	A céu aberto	Qualquer resistência, consolidado	MECÂNICO	Qualquer formato, qualquer profundidade, espesso, grande extensão	A CÉU ABERTO
					Tabular ou massas amorfas, qualquer profundidade, espesso, extensão moderada	ROCHA ORNAMENTAL
					Tabular, pouca profundidade, estreitos, grandes dimensões	LAVRA EM TIRAS
					Tabular, baixo mergulho, estreito, remanescente	AUGER
			Inconsolidado ou permeável	AQUOSO	Tabular, baixo mergulho, estreito, pequena extensão	HIDRÁULICA
					Tabular, baixo mergulho, espesso, grande extensão	DRAGAGEM
					Qualquer formato, qualquer profundidade, espesso, grande extensão	BOREHOLE MINING
					Qualquer formato, Alto mergulho, espesso, grande extensão	LIXIVIAÇÃO
	Profundo	Subterrâneo	Resistente a moderado, competente	NÃO SUPORTADO	Tabular, baixo mergulho, estreito, grande extensão	CÂMARAS E PILARES
					Tabular, baixo mergulho, espesso, grande extensão	REALCES E PILARES
					Tabular, alto mergulho, espesso, qualquer tamanho	RECALQUE
					Tabular, alto mergulho, espesso, qualquer tamanho	REALCES EM SUBNÍVEIS
			Moderado a fraco, incompetente	SUPORTADO	Qualquer formato, alto mergulho, espesso, qualquer extensão	CORTE E ENCHIMENTO
					Tabular, alto mergulho, espesso, pequena extensão	ALARGAMENTOS ESTEIADOS
					Qualquer formato, qualquer profundidade, espesso, qualquer extensão	COM ESTRUTURAS RETANGULARES
			Moderado a fraco, escavável	ABATIMENTO	Tabular, baixo mergulho, estreito, grande extensão	PAREDES LONGAS
					Tabular ou massas amorfas, alto mergulho, espesso, grande extensão	ABATIMENTO EM SUBNÍVEIS
					Massas amorfas, alto mergulho, espesso, grande extensão	ABATIMENTO EM BLOCOS

Fonte: Adaptado de Hartman, 1987.

2.2.3 Método de Morrison

De acordo com Nicholas (1992) O sistema de classificação proposto por Morrison (1976) posiciona os métodos de lavra subterrânea em três grupos: *rigid pillar support*, *controled subsidence* e *caving* (Figura 10), onde variáveis como espessura do corpo, tipo de suporte, e energia da tensão acumulada são utilizados como critério para determinação do método de lavra, sendo uma técnica continua para seleção de método de lavra selecionando um método de lavra baseado nas condições geomecânicas, que devem ser cuidadosamente avaliadas para a utilização desta metodologia. Segundo Gelvez (2012) este sistema já necessitava da avaliação das condições geomecânicas dos maciços rochosos para determinação do tipo de suporte.

Figura 10 - Gráfico de Morrison (1976) para seleção do método de lavra.

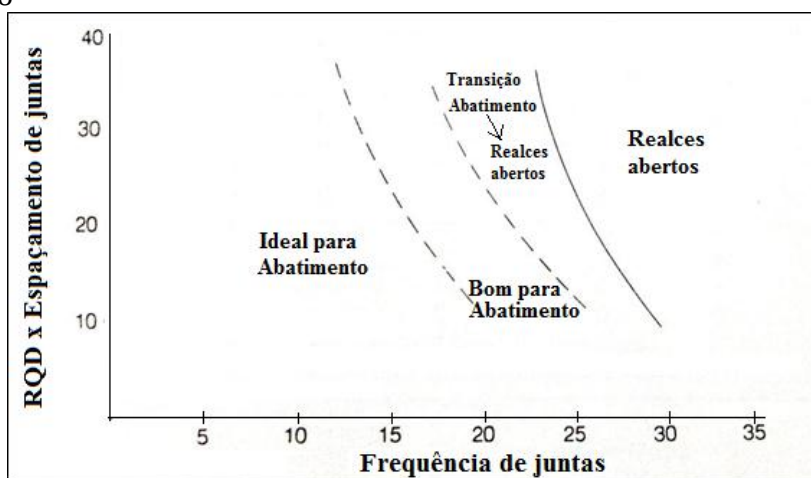


Fonte: Adaptado de Nicholas, 1992.

2.2.4 Método de Laubscher

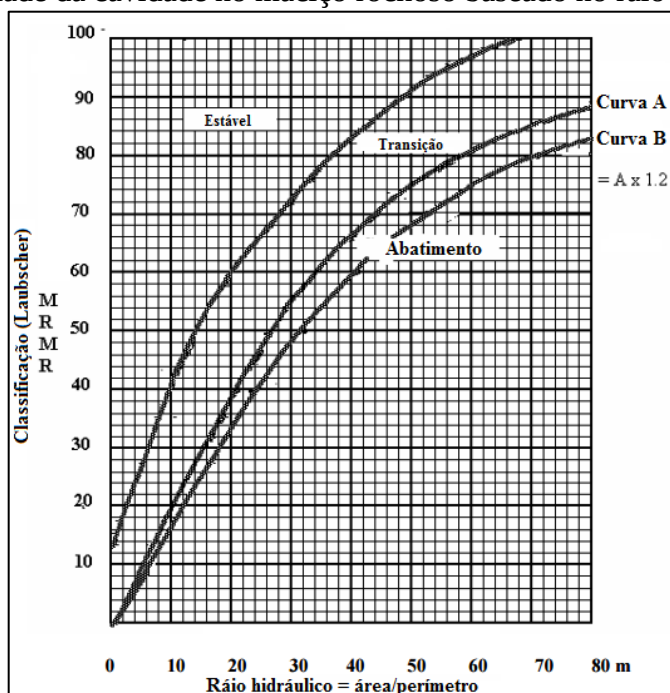
Segundo Nicholas (1992), este método foi proposto por Laubscher (1981) e toma como critério a classificação do maciço rochoso, onde ajusta o método de lavra com os efeitos esperados sobre a estabilidade do maciço rochoso (Figura 11). Os parâmetros utilizados para saber se o sistema de lavra *caving* é recomendado em lugar do sistema *stoping* são o grau de fraturamento, RQD (*Rock Quality Designation*), espaçamento entre as juntas do maciço rochoso e as características da junta como rugosidade, material de preenchimento e presença de água (este esquema enfatiza que as juntas são o único fator que determina o tamanho da cavidade estável para um maciço rochoso). Em 1990 Laubscher modificou a sua metodologia relacionando a classificação do maciço rochoso com o raio hidráulico da escavação (Figura 12). Incluindo o raio hidráulico, uma determinada área se torna apta para lavra de rochas mais competentes, mesmo se a área avaliada for larga (Nicholas op cit).

Figura 11 - Classificação de Laubscher de 1981 para avaliação da estabilidade de cavidade no maciço rochoso



Fonte: Adaptado de Nicholas, 1992.

Figura 12 - Estabilidade da cavidade no maciço rochoso baseado no raio hidráulico



Fonte: Adaptado de Laubscher, 2001.

2.2.5 Método de Nicholas

Consoante com Nicholas (1992), a classificação proposta por Nicholas (1981) determina o método de lavra mais adequado através de um ranking numérico, sendo assim um método quantitativo, onde o primeiro passo é classificar a geometria do corpo de minério e a distribuição dos teores do minério (Tabela 6), após isso as características geomecânicas do corpo de minério, da lapa e capa são classificadas (Tabela 7) e finalmente o ranking numérico é construído, somando-se numericamente os pesos determinados previamente (Tabelas 8, 9a, 9b e 9c).

Tabela 6 - Definição da geometria do depósito e da distribuição dos teores.

1) Formato geral / Espessura	
Equi-dimensional	Todas as dimensões têm mesma ordem de magnitude
Tabular	Duas dimensões são muito maiores que espessura, onde não ultrapassa normalmente 100m
Irregular	Dimensões muito diferentes entre si
2) Espessura do corpo de minério	
Estreito	< 30 ft (< 10 m)
Intermediário	30 - 100 ft (10 - 30 m)
Espesso	100 - 325 ft (30 - 100 m)
Muito espesso	> 325 ft (> 100 m)
3) Mergulho do corpo de minério	
Baixo ângulo	< 20°
Intermediário	20° - 55°
Forte mergulho	> 55°
4) Profundidade do corpo de minério	
Providenciar profundidade do corpo	
5) Distribuição de Teores	
Uniforme.	Os teores de qualquer ponto do depósito não são muito diferentes do teor médio.
Gradacional.	Valores para os teores têm características zonais e mudam gradativamente de um para outro.
Errática.	Valores dos teores mudam drasticamente em pequenas distâncias sem exibir um padrão ou correlação.

Fonte: Adaptado de Nicholas (1992).

Tabela 7 - Características geomecânicas do maciço rochoso (corpo de minério, capa e lapa).

1) *Rock Substance Strength - RSS*
(Resistência à compressão uniaxial / Pressão de sobrecarga)

Fraco	< 8
Moderado	8 - 15
Forte	> 15

2) Frequência de fraturas

	Nº de fraturas por		% RQD
	ft	m	
Muito Próximas	> 5	> 16	0 - 20
Próximas	3 - 5	10 - 16	20 - 40
Afastadas	1 - 3	3 - 10	40 - 70
Muito Afastadas	< 1	< 3	70 - 100

3) Resistência de fraturas

Fraca	Junta não preenchida com superfície lisa ou preenchida com material de resistência menor que maciço rochoso
Moderada	Junta não preenchida com superfície rugosa
Forte	Junta preenchida com material de resistência maior que o maciço rochoso

Fonte: Adaptado de Nicholas (1992).

Tabela 8 - Ranking para as características geométricas e distribuição de teores para diferentes métodos de lavra.

Método de Lavra	Formato geral			Espessura do corpo de minério				Mergulho do corpo de minério			Distribuição de teores		
	E	T	I	Et	I	Ep	MEp	B	I	F	U	G	E
A céu aberto	3	2	3	2	3	4	4	3	3	4	3	3	3
Abatimento em blocos	4	2	0	-49	0	2	4	3	2	4	4	2	0
Realces em subníveis	2	2	1	1	2	4	3	2	1	4	3	3	1
Abatimento em subníveis	3	4	1	-49	0	4	4	1	1	4	4	3	0
Paredes longas	-49	4	-49	4	0	-49	-49	4	0	-49	4	2	0
Câmaras e pilares	0	4	2	4	2	-49	-49	4	1	0	3	3	3
Recalque	2	2	1	1	2	4	3	2	1	4	3	2	1
Corte e enchimento	0	4	2	4	4	0	0	0	3	4	3	3	3
Corte de fatias superiores	3	3	0	-49	0	3	4	4	1	2	4	2	0
Alargamento com estruturas retangulares	0	2	4	4	4	1	1	2	3	3	3	3	3
	E = Equidimensional T = Tabular I = irregular			Et = Estreito I = Intermediário Ep = Espesso Mep = Muito Espesso				B = Baixo ângulo = Intermediário = Forte mergulho I = F			U = Uniforme G = Gradacional E = Errático		

Fonte: Adaptado de Nicholas (1992).

Tabela 9 - Ranking para as características geomecânicas para diferentes métodos de lavra.

a) Corpo de minério										
Método de lavra	RSS			Espaçamento de fraturas				Resistência de fraturas		
	Fr	M	Fo	MP	P	A	MA	Fr	M	Fo
A céu aberto	3	4	4	2	3	4	4	2	3	4
Abatimento em blocos	4	1	1	4	4	3	0	4	3	0
Realces em subníveis	-49	3	4	0	0	1	4	0	2	4
Abatimento em subníveis	0	3	3	0	2	4	4	0	2	2
Paredes longas	4	1	0	4	4	0	0	4	3	0
Câmaras e pilares	0	3	4	0	1	2	4	0	2	4
Recalque	1	3	4	0	1	3	4	0	2	4
Corte e enchimento	3	2	2	3	3	2	2	3	3	2
Corte de fatias superiores	2	3	3	1	1	2	4	1	2	4
Alargamento com estruturas retangulares	4	1	1	4	4	2	1	4	3	2
	Fr = Fraco Moderado Forte		M = Fo =	MP = Muito Próximas Próximas Afastadas Muito Afastadas				P = A = MA =		Fr = Fraco = Moderado Forte M Fo =

b) Capa										
Mining Method	RSS			Espaçamento de fraturas				Resistência de fraturas		
	Fr	M	Fo	MP	P	A	MA	Fr	M	Fo
A céu aberto	3	4	4	2	3	4	4	2	3	4
Abatimento em blocos	4	2	1	3	4	3	0	4	2	0
Realces em subníveis	-49	3	4	-49	0	1	4	0	2	4
Abatimento em subníveis	3	2	1	3	4	3	1	4	2	0
Paredes longas	4	2	0	4	4	3	0	4	2	0
Câmaras e pilares	0	3	4	0	1	2	4	0	2	4
Recalque	4	2	1	4	4	3	0	4	2	0
Corte e enchimento	3	2	2	3	3	2	2	4	3	2
Corte de fatias superiores	4	2	1	3	3	3	0	4	2	0
Alargamento com estruturas retangulares	3	2	2	3	3	2	2	4	3	2
	Fr = Fraco Moderado Forte		M = Fo =	MP = Muito Próximas Próximas Afastadas Muito Afastadas				P = A = MA =		Fr = Fraco = Moderado Forte M Fo =

c) Lapa										
Mining Method	RSS			Espaçamento de fraturas				Resistência de fraturas		
	Fr	M	Fo	MP	P	A	MA	Fr	M	Fo
A céu aberto	3	4	4	2	3	4	4	2	3	4
Abatimento em blocos	2	3	3	1	3	3	3	1	3	3
Realces em subníveis	0	2	4	0	0	2	4	0	1	4
Abatimento em subníveis	0	2	4	0	1	3	4	0	2	4
Paredes longas	2	3	3	1	2	4	3	1	3	3
Câmaras e pilares	0	2	4	0	1	3	3	0	3	3
Recalque	2	3	3	2	3	3	2	2	2	3
Corte e enchimento	4	2	2	4	4	2	2	4	4	2
Corte de fatias superiores	2	3	3	1	3	3	3	1	2	3
Alargamento com estruturas retangulares	4	2	2	4	4	2	2	4	4	2
	Fr = Fraco Moderado Forte		M = Fo =	MP = Muito Próximas P = Próximas A = Afastadas MA = Muito Afastadas				Fr = Fraco M = Moderado Fo = Forte		

Fonte: Adaptado de Nicholas (1992).

Nicholas (1992) indica que os valores das tabelas demonstram a aptidão daquela característica específica do corpo de minério a ser lavrado pelo método tomado em consideração, onde valores de 3 ou 4 indicam que aquela característica específica do corpo de minério é indicada para determinado método de lavra, valores de 1 ou 2 indicam incompatibilidade daquela característica específica para com o método e valores iguais a 0

indicam que a característica muito provavelmente não viabiliza a utilização do método, sem necessariamente descartar o mesmo, ao contrário do valor – 49, o qual indica que a característica elimina totalmente o método de lavra em questão.

Ainda Nicholas (1992) afirma que ele mesmo propôs uma modificação nesta metodologia levando-se em consideração as características geométricas e geomecânicas do corpo, da capa e lapa, pois para dar a cada uma dessas categorias um peso igual, a zona de minério, a capa e a lapa deveriam ser multiplicadas por 1,33. Entretanto, segundo Nicholas (op cit) a importância de cada peso na seleção do método de lavra não é igual, onde a geometria do corpo é mais importante que a geomecânica deste, esta por sua vez é mais importante que a geomecânica da capa e que por fim é mais importante que a geomecânica da lapa e assim Nicholas propôs um sistema de multiplicadores, para levar em consideração a importância destas características na seleção do método de lavra (Tabela 10), que deve multiplicar os pesos para cada característica descrita nas tabelas 8, 9a, 9b e 9c, mas pode ser modificado de acordo com a experiência pessoal do tomador da decisão.

Tabela 10 - Peso dos fatores.

Geometria do corpo	1.0	1.0	1.0
Condições geomecânicas do corpo de minério	1.33	0.75	1.0
Condições geomecânicas da capa	1.33	0.6	0.8
Condições geomecânicas da lapa	1.33	0.38	0.5

Fonte: Adaptado de Nicholas (1992).

Os três métodos de lavra mais bem ranqueados devem ser analisados economicamente para assim poder decidir qual é o melhor método de lavra nos sentidos técnico e econômico, e sempre levando em consideração que estes pesos podem ser modificados de acordo com a experiência do projetista, pois o ponto de vista e a experiência do engenheiro responsável pelo estudo devem ser levados em consideração na escolha do método de lavra mais aplicável (Nicholas 1992).

2.2.6 Método UBC (Nicholas modificado)

Segundo Miller-Tait et all (1995) o método UBC é uma variação do método de Nicholas para seleção do método de lavra mais favorável seguindo um padrão bem parecido deste, onde alguns valores -49 foram substituídos pelo valor -10, para indicar forte incompatibilidade do método para com a característica pontuada do corpo sem eliminar

inteiramente o método de lavra, além disto, a classificação mecânica de rochas foi ajustada para refletir melhorias com técnicas de suporte e monitoramento do solo. Para o processo de seleção aqui descrito, é necessário o entendimento das características dos corpos de minério e das encaixantes (Tabela 11).

Tabela 11 - Método UBC para seleção de método de lavra.

1) Formato geral / Largura		
Equi-dimensional	Todas as dimensões têm a mesma ordem de magnitude	
Tabular	Duas dimensões maiores muitas vezes que espessura, que usualmente não excede 35 m	
Irregular	Dimensões irregulares	
2) Espessura do corpo de minério		
Muito estreito	< 3m	
Estreito	3 - 10m	
Intermediário	10 - 30m	
Espesso	30 - 100m	
Muito Espesso	> 100m	
3) Mergulho do corpo de minério		
Baixo ângulo	< 20 graus	
Intermediário	20 - 55 graus	
Forte Mergulho	> 55 graus	
4) Profundidade do corpo de minério		
Pouco profundo	0 - 100m	
Intermediário	100 - 600m	
Profundo	> 600m	
5) Distribuição de teores		
Uniforme	Os teores de qualquer ponto do depósito não diferem significativamente do teor médio	
Gradacional	Valores dos teores têm características zonais, variando gradualmente de um ponto do corpo para outro	
Errático	Valores dos teores mudam radicalmente em pequenas distâncias e não exibem um padrão na variação.	
6) RMR:		
	Muito Incompetente	0 - 20
	Incompetente	20 - 40
	Moderado	40 - 60
	Competente	60 - 80
	Muito Competente	80 - 100
7) RSS:		
(Resistência à compressão uniaxial/principal esforço)	Muito Fraco	< 5
	Fraco	5 - 10
	Moderado	10 - 15
	Forte	> 15

Fonte: Adaptado de Nicholas (1992).

A partir deste entendimento, são pontuadas estas características relacionadas a cada método de lavra levado em consideração (Tabelas 12, 13 e 14).

Tabela 12 - Ranking para geometria e distribuição de teores para diferentes métodos de lavra.

Métodos de lavra	Formato Geral			Espessura					Mergulho			Dist. de teores			Prof.		
	E	T	I	MEt	Et	I	Ep	MEp	B	I	F	U	G	E	PP	I	P
A céu aberto	4	2	3	1	2	3	4	4	3	3	1	3	3	2	4	0	-49
Abatimento em blocos	4	2	0	-49	-49	0	3	4	3	2	4	3	2	2	2	3	3
Realces em subníveis	3	4	1	-10	1	3	4	3	2	1	4	4	4	3	3	4	2
Abatimento em subníveis	3	4	1	-49	-49	0	4	4	1	1	4	3	2	2	3	2	2
Paredes longas	-49	4	-49	4	3	0	-49	-49	4	0	-49	4	1	0	2	2	3
Câmaras e pilares	0	4	2	4	3	1	-49	-49	4	0	-49	4	2	0	3	3	2
Recalque	0	4	2	4	4	0	-49	-49	-49	0	4	3	2	2	3	3	2
Corte e enhecimento	1	4	4	3	4	4	1	0	1	3	4	2	3	4	2	3	4
Corte de fatias superiores	1	2	0	1	1	0	2	1	4	2	0	2	1	1	2	1	1
Alargamento com estruturas retangulares	0	1	4	4	3	2	0	0	2	3	2	0	1	3	1	1	2
	E = Equidimensional T = Tabular I = Irregular			MEt = Muito Estreito Et = Estreito I = Intermediário Ep = Espesso MEp = Muito Espesso					B = Baixo Mergulho I = Intermediário F = Forte Mergulho			U = Uniforme G = Gradacional E = Errático			PP = Pouca Profundidade I = Intermediário P = Profundo		

Fonte: Adaptado de Nicholas (1992).

Tabela 13 - Características geomecânicas *Rock Mass Rating (RMR)*.

Métodos de lavra	Corpo de minério					Capa					Lapa				
	MI	I	M	C	MC	MI	I	M	C	MC	MI	I	M	C	MC
A céu aberto	3	3	3	3	3	2	3	4	4	4	2	3	4	4	4
Abatimento em blocos	4	3	2	0	-49	3	3	3	2	2	3	3	3	2	2
Realces em subníveis	1	3	4	4	4	-49	0	3	4	4	0	0	2	3	3
Abatimento em subníveis	3	4	3	1	0	4	4	3	2	2	1	2	3	3	3
Paredes longas	6	6	4	2	2	6	5	4	3	3	-	-	-	-	-
Câmaras e pilares	-49	0	3	5	6	-49	0	3	5	6	-	-	-	-	-
Recalque	0	1	3	3	3	0	0	2	4	4	0	0	2	3	3
Corte e enhecimento	0	1	2	3	3	3	5	4	3	3	3	3	2	2	2
Corte de fatias superiores	3	2	1	1	0	0	0	2	3	3	0	0	1	2	2
Alargamento com estruturas retangulares	4	4	1	0	0	4	4	1	0	0	3	1	0	0	0
RMR ratings:	MI = 0-20 I = 20-40 M = 40-60 C = 60-80 MC = 80-100														

Fonte: Adaptado de Nicholas (1992).

Tabela 14 - “*Rock Substance Strength (RSS)*”

Métodos de Lavra	Corpo de minério				Capa				Lapa			
	MFr	Fr	M	Fo	MFr	Fr	M	Fo	MFr	Fr	M	Fo
A céu aberto	4	3	3	3	3	3	4	4	3	3	4	4
Abatimento em blocos	4	2	1	0	4	3	2	0	4	3	2	1
Realces em subníveis	0	2	4	4	0	1	4	5	0	1	3	3
Abatimento em subníveis	2	3	3	2	4	3	2	1	1	2	2	2
Paredes longas	6	5	2	1	6	5	2	2	-	-	-	-
Câmaras e pilares	0	0	3	6	0	0	2	6	-	-	-	-
Recalque	0	1	3	4	0	1	3	4	0	2	3	3
Corte e enhecimento	0	1	3	3	3	5	4	2	1	3	2	2
Corte de fatias superiores	3	2	1	0	3	2	2	2	2	2	1	1
Alargamento com estruturas retangulares	4	3	1	0	4	2	1	0	3	2	0	0
RSS ratings	MFr = Muito Fraco Fr = Fraco M = Moderado Fo = Forte											

Fonte: Adaptado de Nicholas (1992).

De acordo com Miller-Tait et al. (1995), a versão criada pela UBC modifica todos os pesos e características, exceto a distribuição de teores (grade distribution) e mergulho do corpo (ore plung), em uma tentativa de enfatizar a lavra por realces (stope mining) em vez de técnicas de mineração em massa, como os métodos de lavra por abatimento (caving mining).

Isto foi assim pensado pelo fato de que a maioria das minas subterrâneas canadenses utilizavam a lavra por realces (*open stoping*), câmaras e pilares (*room and pillar*), ou corte e enchimento (*cut and fill*) como técnicas de mineração, que pode ser visto na tabela 15, onde esta lista os métodos de mineração utilizados no período 1994 no Canadá, quando esta abordagem foi criada (Miller-Tait et al, 1995).

Tabela 15 - Métodos de lavra usados pelas minas no Canadá durante o ano de 1994.

Método de Lavra	Utilização aproximada (%)
Realces abertos	52
Corte e enchimento	20
Câmaras e pilares	14
Abatimento em subníveis	5

Fonte: adaptado de Miller-Tait et al (1995).

As melhorias nas técnicas de suporte, monitoramento e a utilização de equipamentos operados a distância tornaram possível a exploração por técnicas de realces abertos (*open stopes*), no lugar de técnicas por abatimento em maciços de condições geomecânicas incompetentes e, além disso, como os métodos de abatimento requerem estudos de geomecânica e geotecnia esta abordagem não justificaria a recomendação do método de abatimento em blocos (*block caving*) ou abatimento por sub-níveis (*sublevel caving*) até que uma avaliação mais aprofundada seja realizada (Miller-Tait et al 1995).

Esta técnica de seleção adiciona a nova categoria Muito Estreito (*Very Narrow*) à técnica de Nicholas, para veios de espessura de até 3 metros para distinguir uma faixa onde a técnica de realces abertos (*open stoping*), devido a problemas de controle de diluição, torna-se incompatível, buscando assim técnicas viáveis para atenuar esse problema (Miller-Tait et al op cit).

O método de seleção da UBC utiliza principalmente depósitos profundos para eliminar ou restringir o uso da mineração a céu aberto, pois este é um método de mineração tão versátil que é praticamente sempre o método de mineração mais aplicável quando a profundidade não é considerada (Miller-Tait et al op cit).

Miller-Tait et al (op cit) afirma que a seleção do método de mineração da UBC classifica a mecânica das rochas em dois parâmetros: O RMR (*Rock Mass Rating*) e o RSS (*Rock Substance Strength*). A classificação de maciço rochoso consiste na classificação de Bieniawski, onde classifica seis parâmetros em uma faixa de 0 - 100 em que 0 é o pior caso e 100 é o melhor. Tabela 16 Resume esses parâmetros de classificação e seu intervalo de valores (Miller-Tait et al op cit).

Tabela 16 - Bieniavski (CIR) “Rock mass rating”

Parâmetros de classificação	Faixa de valores
Resistência de rocha intacta	0 - 15
<i>Rock quality designation</i> (RQD)	3 - 20
Espaçamento de juntas	5 - 30
Condição de juntas	0 - 25
Presença de água em juntas	0 - 10

Fonte: Miller-Tait et al (1995).

A razão principal para usar a classificação de maciço rochoso de Bieniavski é utilizar uma classificação mais geral, que é mais aplicável para uma análise de primeira passo, pois o uso universal da classificação da maciço rochoso permite uma análise mais consistente dos dados (Miller-Tait et al op cit). A versão modificada do RSS é muito similar à aproximação de Nicholas, mas, como muitas minas canadenses têm pressões horizontais superiores duas vezes à pressão de sobrecarga, o estresse in situ máximo é usado em vez da pressão de sobrecarga, assim outra categoria, Muito Fraca (*Very Weak*), foi adicionada para fornecer uma definição adicional ao RSS (Miller-Tait et al op cit).

No quesito RSS (*Rock Substance Strength*) a categoria muito fraca (*Very Weak*) representa um intervalo onde, apesar da classificação de maciço rochoso, seria inseguro para a operação sem suporte da rocha, a categoria fraca (*Weak*) representa um intervalo onde podem ser perigosas operações sem suporte das aberturas, a categoria moderada (*Moderate*) representa um intervalo onde a pressão da rocha não deve representar um grande risco para as operações de mineração e por fim uma avaliação forte (*Strong*) sugere que a pressão do solo deve ter pouco efeito sobre a sanidade da rocha (Miller-Tait et al op cit).

Segundo Miller-Tait et al (op cit) estas categorias referentes à pressão in situ na rocha (*Rock Substance Strength*) foram então aplicadas a cada método de mineração e foram classificadas de acordo com a aplicabilidade. Os valores mais fracos se prestam a métodos de altos suportes ou métodos onde não há entrada de trabalhadores, os valores Moderados (*Moderate*) se prestavam a técnicas de suporte parcial, como corte e preenchimento (*cut and fill*) e as categorias Competentes (*Strong*) foram favoráveis para métodos de realces abertos (*open stoping*), corte de encolhimento (*cut and fill*), ou câmaras e pilares (*room and pillar*) (Miller-Tait et al op cit).

A zona do minério, a capa, e lapa têm importâncias variadas para operações de mineração, logo a seleção do método de mineração UBC direciona sua importância relativa, ponderando os fatores diretamente na tabela e, para compensar a remoção de uma categoria, a

capa e as zonas de minério receberam, cada uma, uma classificação possível de 6, em vez de 4 (Miller-Tait et al op cit).

De acordo com Miller-Tait et al (1995) várias outras modificações ao método Nicholas foram consideradas, mas não implementadas. Uma primeira consideração foi utilizar o raio hidráulico (Laubscher 1976) na seção de mecânica de rochas do relatório, mas decidiu-se que isso seria muito detalhado para uma análise de primeiro passo e também, se houvesse apenas dados de furos de sondagem, seria difícil obter uma previsão precisa do raio hidráulico necessário para a abertura em questão e se houvesse dados geotécnicos limitados disponíveis, haveria a necessidade do cálculo do raio hidráulico para a abertura (Miller-Tait et al op cit). Por último, havendo dados geotécnicos limitados disponíveis, o raio hidráulico refletiria em grande parte os valores de classificação do maciço (Miller-Tait et al op cit). Outra consideração foi usar a técnica de mineração “Avoca” como um método de mineração separado, porém, as informações limitadas e a semelhança com o método de lavra por recalque, no entanto, levaram à decisão de classificá-lo abaixo deste método, onde seria aplicável para depósitos de médias profundidades (Miller-Tait et al op cit).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO

2.3.1 Sistema RQD (*Rock Quality Designation*)

O sistema RQD foi criado ao ano de 1964 por Deere, porém só surgiu em publicação em 1967, pelo mesmo autor. Segundo Ávila (2012), o RQD foi desenvolvido para qualificar a qualidade de um maciço rochoso através de um valor numérico, a partir de dados e amostras de furos de sondagem, sendo definido como a percentagem dos pedaços dos testemunhos de sondagem com tamanho maior que 100 mm no comprimento total da amostra, onde os furos devem ter no mínimo diâmetro de 54,7mm, devendo obrigatoriamente ser perfurados com amostrador duplo. Deere & Deere (1988) afirma que se pode calcular o RQD a partir da seguinte expressão:

$$RQD = 100\% \times \sum \frac{\text{Comprimento dos furos com tamanho maior que 100 mm}}{\text{Comprimento total do furo}} \quad \text{Eq. 1}$$

Palmström (1982) propôs a utilização do espaçamento entre as fraturas da mesma família (S_1 , S_2 e S_3) para cálculo do índice volumétrico de número de juntas (J_v) e a utilização deste para cálculo do RQD. O índice J_v equivale à soma das frequências das juntas de cada família (número de juntas por unidade de comprimento) nas direções X, Y e Z, logo o valor do J_v será:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} \quad \text{Eq 2}$$

A classificação do maciço rochoso através do J_v se dá pela tabela seguinte.

Tabela 17 - Classificação do maciço rochoso segundo espaçamento e frequência de junta e índice J_v .

5020105210.50.2 Frequência de fratura					
Muito fraturado		Fraturado		Bloco	
Muito próximas		Próxima		Moderado	Afastado
Extremamente baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto	Extremamente alto
0.010.020.050.10.20.51.02.05.0 Espaçamento de Fraturas (m)					
2001005030201063210.60.3 Número de juntas por m³					
Muito Alto		Alto	Moderado	Baixo	Muito Baixo
					(J_v)

Fonte: Adaptado de Palmström (1982).

Palmström (1982) também sugeriu que o RQD pode ser calculado através do índice de frequência volumétrica de junta J_v pela seguinte expressão:

$$RQD = 115 - 3,3 \times J_v \quad \text{Eq. 3}$$

2.3.2 Sistema Q (Rock Tunnel Quality)

Barton (1974) propôs um sistema de classificação chamado Índice de Qualidade de Túnel (Sistema – Q), que é uma função de (6) seis parâmetros que podem ser estimados por um

mapeamento de superfície, podendo ser atualizado conforme avanço do túnel ou galeria. Estes parâmetros são:

- RQD = *Rock Quality Designation*;
- J_n = Número de famílias de fraturas;
- J_r = Número de Rugosidade da superfície de fratura;
- J_a = Grau de alteração ou competência do preenchimento da fratura;
- J_w = Fator de redução de água;
- SRF = *Stress Reduction Factor*, estado de tensão do maciço rochoso.

O valor de Q pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde os valores dos índices RQD, J_n , J_r , J_a , J_w e SRF devem ser obtidos a partir das tabelas seguintes.

Tabela 18 - Classificação RQD e seus valores.

Rock Quality Designation (RQD)	
Estado do maciço rochoso	Valor do RQD
A - Qualidade muito má	0 - 25
B - Qualidade má	25 - 50
C - Qualidade média	50 - 75
D - Qualidade boa	75 - 90
E - Qualidade excelente	90 - 100

Fonte: Curi (2017).

Tabela 19 - Valores para o índice J_n .

Condições de fraturamento do maciço	Valores de J_n
Fraturas esparsas ou ausentes	0,5 - 1,0
Uma família de fraturas	2
Uma família de fraturas, mais fraturas esparsas	3
Duas famílias de fraturas	4
Duas famílias de fraturas, mais fraturas esparsas	6
Três famílias de fraturas	9
Três famílias de fraturas, mais fraturas esparsas	12
Quatro ou mais famílias de fraturas	15
Rocha extremamente fraturada, triturada	20

Fonte: Curi (2017).

Tabela 20 - Índice J_r e seus valores.

Índice de grau de alteração das descontinuidades (J_a)	
Grau de alteração das descontinuidades	Valores de J_a
a) Contato entre os planos da descontinuidade	
A - Descontinuidade fechada, dura, impermeável, quartzo	0,75
B - Planos da descontinuidade inalterados, superfície ligeiramente manchada	1
C - Ligeira alteração de descontinuidade. Apresenta minerais secos, partículas de areia, rocha desintegrada livre de argila, etc.	2
D - Cobertura de argila com limo e areia. Fração pequena de argila (não branda)	3
E - Cobertura de argila branda ou de baixa fricção, suave ou pequenas camadas (1-2 mm) de argila e mineral caulinita, mica, clorita, talco e grafite	4
b) Contato entre os planos da descontinuidade ante um deslocamento cortante inferiores a 10 cm (minerais cheios em pequenas espessuras)	
F - Partículas de areia, argila desintegrada de rocha, etc.	4
G - Forte consolidação, compacto, enchimento de argila e mineral (contínuo, < 5mm de espessura)	6
H - Consolidação média a baixa, enchimento de argila e mineral suave (< 5 mm de espessura)	8
I - Enchimento de argila expansiva, montmorilonita (contínuo, < 5 mm de espessura). Não se produz contato entre planos de descontinuidade ante um deslocamento cortante (cheios de mineral de grande espessura)	8 - 12
J - Zonas ou camadas de desintegração	8 - 12
K - Queda de rochas e argila	6
L - Condições várias de argila	8
M - Zonas de argila com limo ou com areia com algumas partes não secas	8 - 12
N - Zonas ou bandas contínuas de argila de espessura grossa	5
O - similar a N, com condições várias de argila	10 - 20

Fonte: Curi (2017).

Tabela 21 - Índice J_w e suas atribuições.

Fator de Redução de Água J_w	
Condição de presença de água	Valor de J_w
A - Escavações secas ou com pequenas afluições inferiores a 5l/min	1
B - Afluência ou pressão média, com lavagem ocasional do enchimento da diáclase	0,66
C - Afluência importante ou alta pressão, em rocha competente com descontinuidades sem enchimento	0,5
D - Afluência importante ou alta pressão, com lavagem considerável do enchimento das diáclases]	0,33
E - Afluência excepcionalmente alta, escoamento ou pressão elevada no momento de explosões e diminuição com o tempo	0,2 - 0,1
F - Fluxo grande que não diminui	0,1 - 0,05

Fonte: Curi (2017).

Tabela 22 - Valores para SRF.

Índice para condição das tensões (SRF)	
Características da rocha	Valores de SRF
a) Zonas débeis intersectam a escavação, podendo-se gerar desabamento da rocha à medida que a escavação da galeria avance	
A - Muitas zonas débeis, contém argila ou rocha desintegrada quimicamente, rocha de entorno muito instável (a qualquer profundidade da escavação)	10
B - Zonas débeis isoladas, com argila ou desintegração química de rochas (profundidade de escavação < 50 m)	5
C - Zonas débeis isoladas, com argila ou rocha desintegrada quimicamente (profundidade de escavação > 50 m)	2,5
D - Múltiplas zonas de fratura em rocha incompetente (sem argila), rocha de entorno solta (qualquer profundidade de escavação)	7,5
E - Zona de fraturas isoladas em rocha competente (sem argila) (profundidade de escavação < 50 m)	5
F - Zonas de fratura isoladas em rocha competente (sem argila) (profundidade de escavação > 50m)	2,5
G - Terreno solto, diáclases abertas, fortemente fraturado (qualquer profundidade)	5
b) Rochas competentes, problemas de tensão nas rochas	
H - Baixa tensão perto da superfície das diáclases abertas	2,5
I - Tensão média, condições de tensão favoráveis	1
J - Tensão alta. Estrutura muito compacta	0,5 - 2,0
K - Relaxamento moderado da rocha depois de alguns minutos em rocha maciça	5,0 - 10,0
L - Relaxamento e estalido da rocha depois de alguns minutos	10,0 - 20,0
M - Estalid violento da rocha e deformações dinâmicas imediatas em rocha maciça	5,0 - 10,0
c) Rochas deformáveis: fluência plástica da rocha incompetente em meio a altas pressões de rocha	
N - suave pressão de deformação	5,0 - 10,0
O - Pressão de deformação intensa	10,0 - 20,0
d) Rocha expansiva: função da presença da água	
P - Suave pressão expansiva	5,0 - 10,0
Q - intensa pressão expansiva	10,0 - 15,0

Fonte: Curi (2017).

2.3.3 Sistema RMR (*Rock Mass Rating*)

A habilidade de prever as condições mecânicas dos maciços rochosos é de extrema importância para um projeto de escavação seguro e econômico e inclui vários fatores e características da rocha (Bieniawski, 1974). Bieniawski (1973) afirma que o sistema de classificação de maciço rochoso RMR (*Rock Mas Rating*) foi desenvolvido por ele mesmo ao ano de 1972 sendo modificado posteriormente para atender aos padrões internacionais, consistindo em um método eficaz de classificação quantitativa baseado em fatores qualitativos e quantitativos (Bieniavski, 1989).

O cálculo do RMR leva em consideração seis fatores para classificação do maciço rochoso, são eles:

- Resistência à compressão uniaxial da rocha;
- RQD (*Rock Quality Designation*);
- Frequência das descontinuidades;
- Condições das descontinuidades;
- Presença de água nas fraturas;
- Orientação das descontinuidades.

Para cálculo e estimativa do RMR deve-se utilizar a tabela 23.

Tabela 23 - Cálculo do RMR.

RMR 1 - Resistência à compressão simples de rocha intacta																	
Resistência à compressão uniaxial (Mpa)		> 250		100 - 250		50 - 100		25 - 50		5 - 25		1 - 5		< 1			
Resistência à compressão uniaxial (kgf/cm²)		> 2.500		1.000 - 2.500		500 - 1.000		250 - 500		50 - 250		10 - 50		< 10			
Ponderação		15		12		7		4		2		1		0			
RMR 2 e 3- RQD e separação de diáclases																	
Juntas/metro		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ponderação		40	34	31	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17
Juntas/metro		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	30
Ponderação		17	16	15	14	14	13	13	12	12	11	11	10	10	9	9	9
Juntas/metro		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	45
Ponderação		9	8	8	7	7	7	6	6	6	5	5	5	4	4	4	4
RMR 4 - Estado das diáclases																	
Resistência (Persistência - m)		Muito alta (< 1)		Alta (1 – 3)			Média (3 – 10)			Baixa (10 – 20)			Não há ou (> 20)				
Ponderação		6		4			2			1			0				
Abertura (mm)		0		< 0,1			0,1 - 1			1 - 5			> 5				
Ponderação		6		5			4			1			0				
Rugosidade		Muito rugoso		Rugoso			Ligeiramente Rugoso			Liso			Espelho de falha				
Ponderação		6		5			3			1			0				
Preenchimento (mm)		Não há		Duro, com espessura < 5			Duro, com espessura > 5			Brando com espessura < 5			Brando, com espessura > 5				
Ponderação		6		5			4			1			0				
Meteorização		Não afetada		Ligeiramente afetada			Moderada			Alta			Descomposta				
Ponderação		6		5			3			2			0				
RMR 5 - Efeito da água																	
Estado		Seco		Ligeiramente úmido			Úmido			Pingando			Escoamento				
Ponderação		15		10			7			4			0				
B - Ajustes segundo orientação da escavação subterrânea e as descontinuidades																	
Direção perpendicular ao eixo de escavação								Direção paralela ao eixo da escavação						Pendor 0 a 20° e qualquer direção			
Escavação ao pendor				Escavação contra o pendor													
Pendor 45 a 90°		Pendor 20 a 45°		Pendor 45 a 90°		Pendor 20 a 45°		Pendor 45 a 90°		Pendor 20 a 45°							
Muito favorável		Favorável		Razoável		Desfavorável		Muito desfavorável		Razoável							

Fonte: Bieniawski (1989) modificado por Curi (2017) e Freitas (2011).

Observando a tabela 23, o parâmetro B reflete a influência da direção e do mergulho das descontinuidades nas escavações. A partir dos estudos de Wickham et al. (1972) se desenvolveu os pesos da influência das descontinuidades para escavações de túneis, já para as escavações para fundação e para taludes foram desenvolvidos os pesos a partir dos trabalhos de Romana (1985) e Bieniawski e Orr (1976). Os valores dos pesos são demonstrados na tabela a seguir.

Tabela 24 - Pesos para as orientações e mergulhos das descontinuidades com relação à escavação.

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

Fonte: Wickham et al (1972), Romana (1985) e Bieniawski e Orr (1976), adaptado por Freitas (2011).

O valor do RMR será a soma dos valores dos pesos referentes na tabela, como na expressão:

$$RMR = RMR\ 1 + RMR\ 2 + RMR\ 3 + RMR\ 4 + RMR\ 5 + B \quad \text{Eq. 5}$$

A classificação da qualidade do maciço rochoso segundo os valores do índice RMR é obtido na tabela 25 a seguir.

Tabela 25 - Classificação RMR de maciços rochosos.

RMR	Categoria	Qualidade da Rocha
81 - 100	I	Muito Boa
61 - 80	II	Boa
41 - 60	III	Razoável
20 - 40	IV	Ruim
< 20	V	Muito Ruim

Fonte: Bieniavski (1989).

Bieniavski e Orr (1976) ainda estipularam uma correlação entre o valor do índice de qualidade de maciço rochoso Q com o RMR para túneis em obras civis de acordo com a expressão abaixo:

$$RMR = 10,5 \times \ln Q + 44 \quad \text{Eq. 6}$$

Já Abad et al (1983) estimou outra correlação entre estes mesmos índices, porém para escavações em minas e obteve a seguinte expressão:

$$RMR = 10,5 \times \ln Q + 42 \quad \text{Eq. 7}$$

Barton (1995) propôs outra expressão para cálculo do RMR a partir do valor de Q:

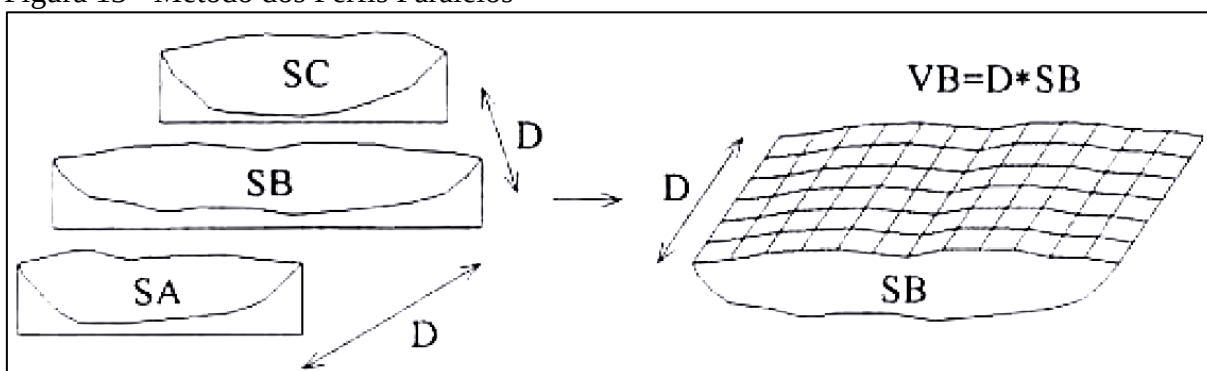
$$RMR = 15,0 \times \ln Q + 50 \quad \text{Eq. 8}$$

Dessa forma é possível estimar o valor do RMR a partir do valor de Q do maciço rochoso, levando em consideração o tipo de escavação e sua aplicação.

2.4 CÁLCULO DE RESERVAS

Para cálculo das reservas, utilizará-se neste trabalho o método dos Perfis Lineares, onde projeta-se perfis verticais à direção do corpo de minério a fim de se estimar o volume do mesmo, levando-se em consideração a área destas seções e a distância entre os perfis, como na figura 13 (Conde e Yamamoto, 1995).

Figura 13 - Método dos Perfis Paralelos



Fonte: Conde e Yamamoto, 1995.

O volume do corpo de minério V_c é obtido, através deste método, a partir da seguinte equação:

$$V_c = \sum_{i=1}^n S_i \times d_i \quad \text{Eq. 9}$$

Onde:

S_i = Área da Seção

d_i = Distância entre as seções

n = Número de seções

2.5 PEGMATITOS

Soares (2004) indica que a primeira definição para pegmatito foi proposta por Haüy no início do século XIX onde, segundo ele, pegmatito é uma designação para o que se conhece por granito gráfico, intercrescimento geométrico cuneiforme epitaxial entre quartzo e feldspato, sendo um conceito textural. Após isto, vários autores deram definições a respeito de pegmatitos e na busca de uma maior compreensão a respeito do conceito para pegmatitos, Soares (2004) identificou várias conceituações posteriores à proposta por Haüy a respeito de pegmatitos, proposta por vários autores, como Fersman (1931), Landes (1933), Johnston Jr.

(1945a, 1945b), Cameron et al. (1949), Vlasov (1952), Jahns (1955), Solodov (1959), Ginzburg (1960), Ginzburg et al (1979), London (1992) e Černý (1982a, 1991a).

Segundo Soares (2004) Fersman (1931) propôs que a formação de corpos pegmatíticos se processava a partir da cristalização de fusões residuais, com sucessivas cristalizações e, em um estágio tardio, através de processos metassomáticos, já Landes (1933) entendeu pegmatito como uma rocha holocristalina, intrusiva, constituída essencialmente de minerais formadores de rochas, cujos grãos individuais são maiores que os grãos dos mesmos minerais que ocorrem em rochas plutônicas equivalentes, Jahns (1955) definiu pegmatito como rocha holocristalina, ao menos em parte, de granulometria muito grosseira, e cujos constituintes mais importantes incluem minerais típicos de rochas ígneas comuns e London (1931) admite que pegmatitos graníticos são caracterizados pela presença de fases minerais de tamanho extremamente grande, pela heterogeneidade, incluindo abrupta variação no tamanho do grão ou na mineralogia, anisotropia de fábrica e uma extensa gama de morfologia de cristais (esqueletal, gráfica, eudral), podendo ser gerado por magmas de todas composições, sendo esta uma definição mais geral.

A partir de definição genérica de Da Luz (2003) pegmatitos são corpos de rocha de composição basicamente granítica (quartzo-feldspato-mica), de granulação geralmente grossa, muitas vezes exibindo cristais gigantes, encaixados em estruturas lineares desenvolvidas em terrenos metamórficos, geralmente de idade pré-cambriana, como veios ou lentes, de forma e tamanhos variados. Os pegmatitos a nível mundial são as principais fontes de alguns metais raros, principalmente o tântalo, além de conter elementos como berílio, estanho, lítio, mica, gemas coradas, feldspatos, caulim e quartzo, Da Luz (2003).

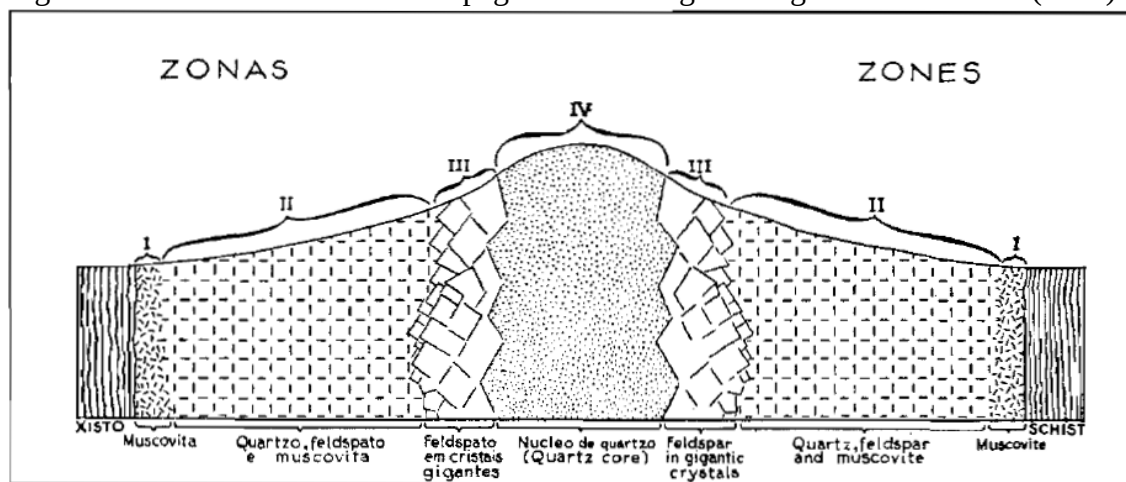
2.5.1 Classificação de pegmatitos

Soares (2004) afirma que várias classificações para os pegmatitos surgiram ao longo do século XX, Fersman (1931), Solodov (1959), Černý (1982a, 1991a), Wise (1999), Hanson et al (1999), Zagorsky et al (1999), e ainda Da Luz (2003) cita outros autores como Scorza (1944), Johnston Jr (1945), Rolff (1945), Cameron et al. (1949), Roy e Madon (1964) porém, conforme suposição de Da Luz (2003) a classificação mais utilizada para os pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema (PPB) é a proposta por Johnston Jr (1945) modificada posteriormente por Rolff (1945) que classifica pegmatitos a partir de conceitos mineralógicos

e morfológicos, onde pegmatitos que apresentam zoneamento mineralógico e textural interno são denominados heterogêneos e os que não apresentam este zoneamento denominam-se homogêneos. Rolf (1945 apud Da Luz 2003) acrescentou ainda uma nova classe de pegmatito denominada misto, o qual seria o pegmatito que apresenta núcleo com cristais gigantes irregulares de quartzo inseridos em uma massa rochosa classificada como homogênea.

Segundo Johnston Jr (1945) o zoneamento interno do pegmatito heterogêneo ocorre como na figura 14.

Figura 14 - Zoneamento interno de pegmatito heterogêneo segundo Johnston Jr (1945).



Fonte: Johnston Jr (1945).

Onde:

- Zona I: é caracterizada pela presença de grandes cristais de muscovita, com ocorrência também de feldspato e quartzo e podendo conter minerais recristalizados da rocha encaixante.
- Zona II: tem composição idêntica ao pegmatito homogêneo, contendo feldspato, quartzo e mica na mesma proporção, podendo ter intercrescimento gráfico de feldspato e quartzo. Nesta zona também ocorre turmalina negra (Soares, 2016).
- Zona III: é caracterizada pela presença de cristais gigantes de feldspato (microclina) com dimensões métricas, além de conter berilo, tantalita-columbita e espodumênio, além de conter segundo Soares (2016) gemas de turmalina e alguns fosfatos. Esta é a zona onde ocorrem os minerais mais interessantes economicamente.
- Zona IV: é o núcleo do pegmatito, geralmente composto de quartzo róseo ou leitoso, onde frequentemente apresentam cristais gigantes de berilo.

De acordo com Da Silva et al. (1995), a Faixa Seridó detém mais de 1.500 pegmatitos que produzem metais raros (Be, Ta-Nb, Li e Sn), gemas, e minerais industriais, como feldspato cerâmico, caulim e quartzo, onde a área de ocorrência dos pegmatitos corresponde a cerca de 10.000 km². Geralmente na Província Pegmatítica da Borborema-Seridó os pegmatitos heterogêneos são maiores produtores de minerais metalíferos, micas, gemas e feldspatos nobres para indústria cerâmica e de vidros, porém em algumas zonas da província (como é o caso dos municípios de Seridozinho, Tara e Pedras Pretas na Paraíba) há ocorrências de pegmatitos homogêneos e mistos com alta produção de tantalita, cassiterita, espodumênio e berilo, estes tendo mineralização disseminada, o que é pouco produtivo sendo lavrado utilizando métodos convencionalmente adotados pelos garimpeiros, porém para métodos de lavra de alta mecanização com grande remoção da rocha pegmatítica podem ser economicamente viáveis (Da Luz, 2003).

2.6 ASPECTOS ECONÔMICOS DOS PEGMATITOS

Os pegmatitos apresentam uma série de minerais que possuem valor econômicos e podem ser explorados com esse devido fim. Os principais constituintes dos pegmatitos são Feldspato, Quartzo e Mica, além destes, cabe-se destacar os minerais Columbita-Tantalita que contém os metais Nióbio e Tântalo, os quais serão os principais produtos para a lavra dos pegmatitos estudados neste trabalho. Diante disso, foi feita uma revisão bibliográfica para entendimento dos aspectos econômicos dos minerais Feldspato, Quartzo e Mica além dos metais Nióbio e Tântalo.

2.6.1 Feldspato

Segundo o Sumário Mineral do DNPM (2015) Feldspatos, de fórmula química (K, Na, Ca) (Si, Al)₄ O₈, são silicatos de alumínio que contém cálcio, potássio e sódio, ocorrendo em rochas graníticas/pegmatíticas sempre associados a outros tipos minerais.

O Brasil possui grandes reservas de tal mineral, e detém cerca de 1,9% da produção de feldspato do mundo, como mostrado na tabela a seguir.

Tabela 26 - Reservas e produção de Feldspato no mundo.

País	Reservas (10 ⁶ t) 2014	Produção (10 ³ t) 2014	%
Brasil	316	418	1,9
Turquia	240	5000	23,1
Itália	-	4700	21,7
China	-	2100	9,7
Índia	45	1300	6,0
Tailândia	-	1100	5,1
França	-	650	3,0
Irã	-	600	2,8
Estados Unidos	-	560	2,6
Espanha	-	530	2,5
Outros Países	-	4653	21,5
TOTAL	Abundantes	21611	100,0

Fonte: Sumário Mineral, 2015.

A produção brasileira de feldspato atende o consumo interno, não tendo tanto destaque no mercado externo, sendo seu uso limitado às indústrias de cerâmicas, utilizado como fundente e fonte de sílica (Si_2O) e vidros, também utilizado como fundente assim como fonte de alumina (Al_2O_3), Álcalis (Na_2O) e Sílica (Si_2O) (Joaquim E Júnior, 2015). Ramos (2001) afirma que o feldspato também é utilizado na fabricação de fritas metálicas, eletrodos para solda, abrasivos leves e próteses dentárias. Os valores para os produtos provenientes do feldspato estão descritos na tabela abaixo.

Tabela 27 - Preços para o feldspato.

Produto	Unidade	Preço (2014)
Feldspato bruto	R\$/t	R\$ 139,37
Feldspato Beneficiado	R\$/t	R\$ 149,43
Feldspato Exportação	R\$/t	R\$ 339,17

Fonte: Sumário mineral, 2015.

2.6.2 Quartzo

Segundo o Perfil do Quartzo DNPM (2009) o Brasil é detentor das maiores reservas de Quartzo no mundo, porém, devido a exploração dos depósitos de tal mineral ser em grande parte por lavra garimpeira, com utilização de técnicas rudimentares, a agregação de valor torna-se inviável, muito por não se explorar toda a potencialidade da utilização do mineral, pois, de acordo com o uso do quartzo, os cristais de melhor qualidade são utilizados como matéria prima na indústria ótica, eletrônica e de instrumentação, já os de qualidade inferior são utilizados na fabricação de abrasivos, cerâmica e na indústria metalúrgica.

Rocha (2015) indica que o quartzo em forma de cristal pode ser obtido na natureza ou por crescimento hidrotérmico na indústria de cristais cultivados, onde o Japão é o maior produtor. O Brasil detém 95% das reservas de quartzo mundiais, sendo distribuído nos

estados de acordo com a tabela 28, porém ainda importa de outros países manufaturados de quartzo, sendo que 99,9% das importações foram de cristais piezoelétricos para a indústria eletrônica.

Tabela 28 - Reservas de quartzo no Brasil ao ano de 2014.

Estados	Reservas (2014)	
	%	10 ⁶ t
Pará	64%	49,9
Minas Gerais	17%	13,3
Santa Catarina	15%	11,7
Bahia	2%	1,6
Goiás	2%	1,6
Total	100%	78

Fonte: Sumário Mineral, 2015.

Os valores para os produtos do quartzo estão dispostos na tabela a seguir, refletindo a disparidade de valor agregado para cristais de quartzo puro e os produtos manufaturados.

Tabela 29 - Preços dos produtos de quartzo.

Produto	Unidade	Preço (2014)
Lascas e quartzo bruto (Exportação)	US\$-FOB/t	401
Cristal cultivado barra bruta (Importação)	US\$-FOB/kg	200
Cristal cultivado barra usinada (EUA)	US\$-FOB/kg	400

Fonte: Sumário Mineral, 2015.

2.6.3 Mica (Muscovita)

Conforme Sumário Mineral do DNPM (2015) a mica é a nomenclatura genérica para os minerais do grupo dos filossilicatos (Variedades mais comuns do ponto de vista comercial: Muscovita, biotita, flogopita, lepidolita e vermiculita), têm em sua composição átomos de silício, alumínio e oxigênio, intercalados por cátions (Na, K, Ca) e/ou ânions (Mg, Fe, Mn, Al, OH), que consequentemente resultam em características distintas para cada tipo de mica onde destaca-se a muscovita $[(KAl_2 (Si_3AlO_{10}) OHF_2)]$ que normalmente é disponibilizado em forma de placas (sheets) ou moída (ground). A mica é abundante no mundo (tabela 30), onde as reservas brasileiras de tal mineral encontram-se principalmente em pegmatitos da província pegmatítica da Borborema e de Minas Gerais, além de micaxistos nos estados do Tocantins e Minas Gerais onde a produção estimada no ano de 2014 de mica em placa é de 4.273 t e mica moída de 6.040 t, porém números não oficiais (Sumário Mineral do DNPM, 2015).

Tabela 30 - Reservas e produções de muscovita no mundo.

País	Reservas (t) 2014	Produção (t) 2014	%
Brasil	4.000.000	nd	nd
China	-	800.000	70,8
Rússia	-	100.000	8,8
Finlândia	-	53.400	4,7
Estados Unidos	-	49.500	4,4
Outros Países	-	127.500	11,3
TOTAL	Abundantes	1130400	100,0

Fonte: Sumário Mineral, 2015.

A lavra da mica decorre principalmente no estado da Paraíba, onde ocorre de forma semimecanizada ou manual, sendo as operações muitas vezes executadas de forma bastante rudimentares em garimpos principalmente (Sumário Mineral do DNPM, op cit).

De acordo com o Sumário Mineral do DNPM (op cit), no Brasil a mica é aplicada na confecção de “papel de mica”, um isolante termoeletrico, para exportação, o produto mais requerido foi a “mica em placas ou clivada em folhas”, que representou 20,4% do valor exportado, já para a importação o item de maior relevância foi a “mica em pó” que representou 29,6% do valor total de importação de mica do país, onde os preços médios anuais para os produtos advindos da mica estão descritos na tabela abaixo.

Tabela 31 - Preços médios anuais dos produtos de mica.

Produto	Unidade	Preço (2014)
Mica em Placa*	R\$/t	R\$ 900-R\$ 980
Mica Moída*	R\$/t	R\$ 200,00
Bens primários (mica em placa)**	US\$-FOB/t	R\$ 488,77
Manufaturados (Mica em placa)**	US\$-FOB/t	R\$ 8.451,85

*Preço na Paraíba, **Preço de Exportação. Fonte: Sumário Mineral DNPM, 2015.

2.6.4 Nióbio

Segundo Júnior (2009) existem mais de 90 minerais portadores do elemento metálico Nióbio em sua composição, sendo destacáveis como minerais-minério a Columbita-Tantalita (Fe, Mn) (Nb, Ta)₂ O₆, o Pirocloro (Na₃, Ca)₂ (Nb, Ti) (O, F)₇, o Bariopirocloro (Ba, Sr)₂ (Nb, Ti)₂ (O, OH)₇, a Loparita (Ce, Na, Ca)₂ (Ti, Nb)₂ e a Pandaíta (Ba, Sr)₂ (Nb, Ti, Ta)₂ (O, OH, F)₇.

Tomando como base dados do Sumário Mineral do DNPM de 2015 viu-se que o Brasil possui mais de 98% das reservas de Nióbio no mundo e detém 90% da produção mundial, sendo a columbita-tantalita e o pirocloro as principais fontes deste metal no país, o que demonstra a importância das reservas brasileiras no cenário mundial e tornando o Nióbio um minério estratégico para os interesses da nação. De acordo com dados do DNPM gerou-se a

tabela 32 contendo as reservas e produção de Nióbio (Nb_2O_5) em território brasileiro referentes ao ano de 2014 e 2015 respectivamente.

Tabela 32 - Reservas e produção de Nióbio no Brasil e no mundo.

Reservas Nióbio		Produção Brasileira Nióbio (2015)			
País	2014 (t)	Discriminação	ROM (t)	Metal Contido (t)	Teor Médio Nb_2O_5 (%)
Brasil	10.827.843	Amazonas (Columbita-Tantalita)	10.705.409	10.600	0,10
Canadá	200.000	Goiás (Pirocloro)	5.440.588	34.670	0,64
Outros Países	nd	Minas Gerais (Pirocloro)	4.489.246	114.978	2,56
		Rondônia (Columbita-Tantalita)	1.375.461	490	0,04
TOTAL	11.027.843	TOTAL	22.010.703	160.738	0,73

Fonte: Anuário Mineral Brasileiro, 2016 e Sumário Mineral DNPM, 2015.

Júnior (2009) afirma que o nióbio é utilizado em ligas de aço para conferir resistência mecânica aos mesmos assim como resistência ao calor e abrasão, visto que o aumento da concentração de carbono propicia aumento de resistência mecânica, porém prejudica outras propriedades desta liga tais como soldabilidade, tenacidade e deformabilidade, sendo utilizado em vários ramos da indústria como, por exemplo, construção civil, na fabricação de vergalhões para concreto armado, indústria automobilística, na confecção de escapamentos e discos de freios, também na indústria militar, na fabricação de peças de motores a jato para caças assim como na indústria aeroespacial, como material refratário para resistir a temperaturas acima de 1300°C .

Os preços médios anuais para a liga de Ferro-Nióbio (Fe-Nb) e óxido de Nióbio Nb_2O_5 estão discriminados na tabela a seguir.

Tabela 33 - Preços médios anuais da liga Fe-Nb e Nb_2O_5 .

Produto	Unidade	Preço (2014)
Liga Ferro-Nióbio	US\$-FOB/t	R\$ 36.899,45
Óxido de nióbio	US\$-FOB/t	R\$ 38.342,05

Fonte: Sumário Mineral DNPM, 2015.

2.6.5 Tântalo

Assim como descrito no Sumário Mineral do DNPM (2015) o Tântalo é um elemento encontrado principalmente nos minerais de Columbita-Tantalita (Fe, Mn) (Nb , Ta_2) que estão presentes em rochas graníticas/pegmatíticas e alcalinas. As reservas mundiais deste minério somam 101 mil toneladas de metal contido, sendo que o Brasil detém 33% destas reservas e apresenta 10% da produção mundial (vide tabela 34).

Tabela 34 - Reservas e produções mundiais de Tântalo

País	Reservas (t) 2014	Produção (t) 2014	%
Brasil	34.279	118	10
Ruanda	-	600	51
Congo	-	200	17
Moçambique	-	85	7
China	-	60	5
Nigéria	-	60	5
Etiópia	-	40	3
Burundi	-	14	1
Austrália	67.000	-	-
TOTAL	101.279	1177	100

Fonte: Sumário Mineral DNPM, 2015.

Conforme afirmação de Rodrigues (2009) as características de inércia química, elevadas resistências, dureza e ductibilidade, associadas às propriedades elétricas (capacitância) do óxido de tântalo são exploradas na fabricação de componentes eletrônicos (capacitores) para equipamentos de alto desempenho (celulares, computadores, máquinas fotográficas, et.), equipamentos químicos resistentes à corrosão, fornos resistentes a altas temperaturas, peças de motores a jato, contentores e tubulações para canalização de metais líquidos, em reatores nucleares, de fios e placas para processos cirúrgicos além de outras utilidades. Dessa forma é nítida a importância da Columbita-Tantalita como mineral estratégico para a nação. Os preços médios dos produtos da Tantalita estão descritos na tabela abaixo.

Tabela 35 - Preços médios dos produtos da Tantalita.

Produto	Unidade	Preço (2014)
Liga Fe-Nb-Ta	US\$/kg	R\$ 20,00
Tantalita (Ta ₂ O ₅ - contido) EUA	US\$/kg	R\$ 92,50
Tantalita (~30-35% Ta ₂ O ₅) Londres	US\$/kg	R\$ 40,00

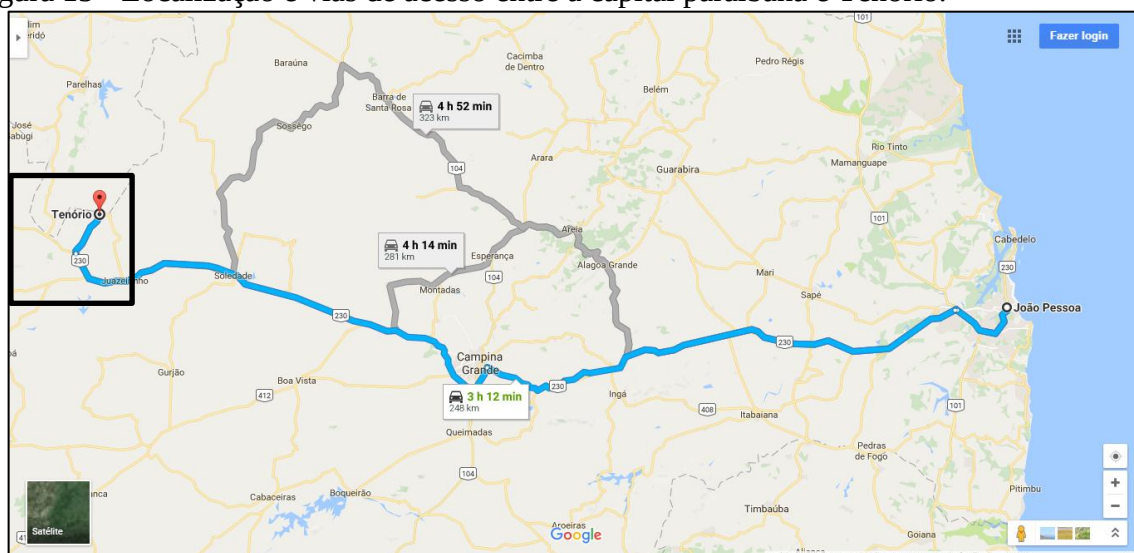
Fonte: Sumário Mineral DNPM, 2015.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área em estudo pertence à empresa MINEGRAN - Minerais e Granitos do Nordeste LTDA. e localiza-se a nordeste da cidade de Tenório na região centro-norte do estado da Paraíba já próximo à divisa com o estado do Rio Grande do Norte (Figura 15).

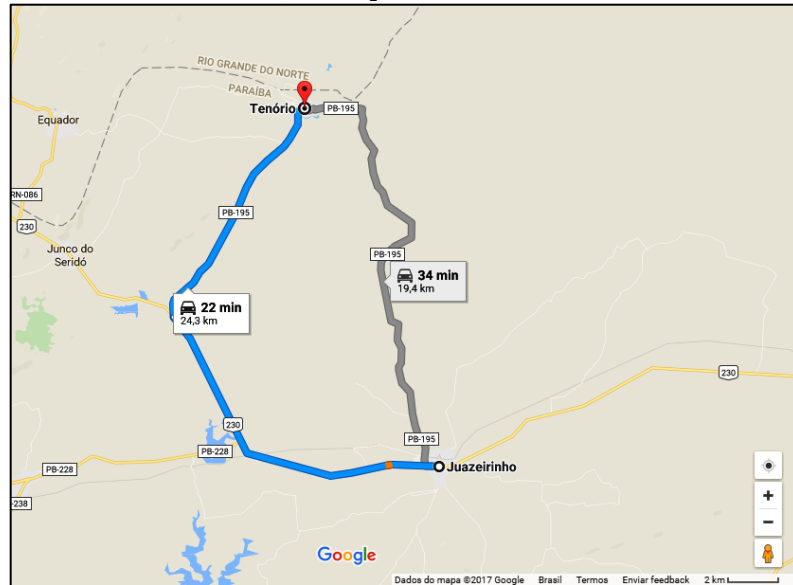
Figura 15 - Localização e vias de acesso entre a capital paraibana e Tenório.



Fonte: Google Maps (2017).

Dista da capital do Estado, João Pessoa, cerca de 248 km, segundo o Google Earth, sendo o trajeto mais próximo através da BR-230, onde na altura de Juazeirinho deve-se seguir pela PB-195 até chegar ao município de Tenório. Tenório encontra-se 10,2 km a norte da cidade de Juazeirinho, já na divisa com o estado do Rio Grande do Norte. (Figura 16).

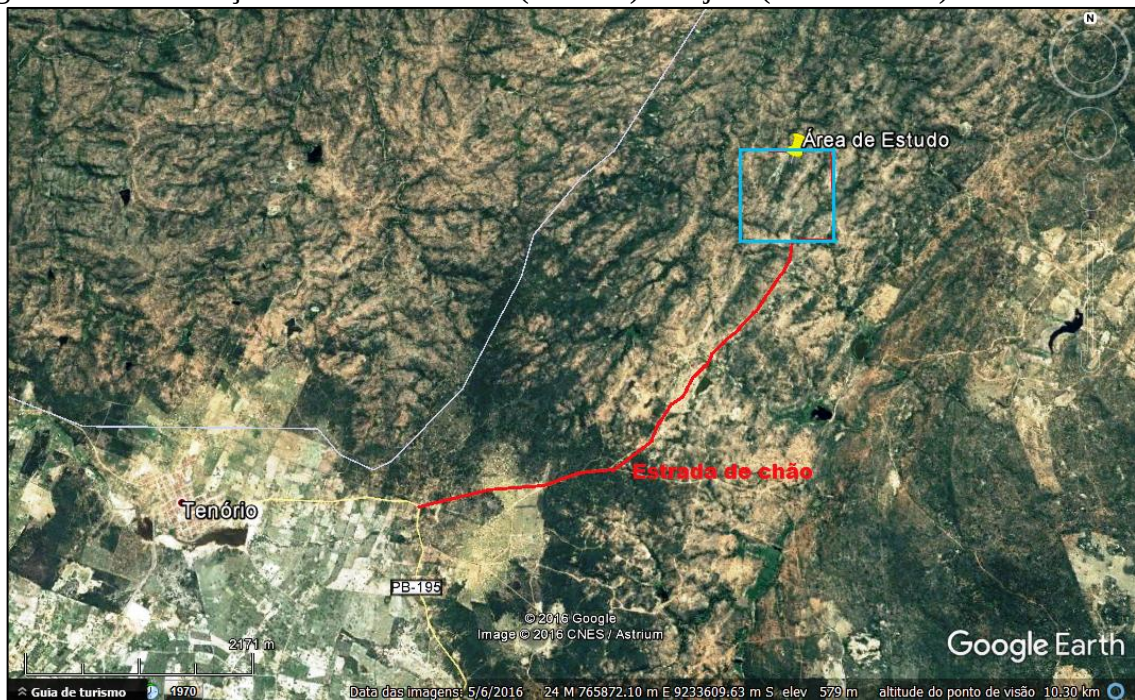
Figura 16 - Trajeto rodoviário até Tenório a partir de Juazeirinho/PB.



Fonte: Google Maps (2017).

Ao chegar à cidade de Tenório, deve-se seguir pela PB-195, a 1,85km da saída da cidade deve-se tomar uma estrada de terra a Nordeste e percorrer mais 5 km por estrada de chão até chegar à área de estudo (Figura 17).

Figura 17 - Localização da área em estudo (em azul) e trajeto (em vermelho).



Fonte: Google Maps (2017).

3.2 DADOS SÓCIO-ECONÔMICOS

O município de Tenório localiza-se na porção centro-norte do estado da Paraíba, distante 196 km da capital João Pessoa e segundo Gomes (2014) se insere na mesorregião da Borborema e microrregião do Seridó Oriental Paraibano. O município encontra-se na fronteira com o estado do Rio Grande do Norte, fazendo divisa com os municípios paraibanos de Junco do Seridó, Assunção, Juazeirinho, São Vicente do Seridó e com o município potiguar do Equador. De acordo com o IBGE o município de Tenório possui área de 105,271 km² e a partir de censo realizado pelo mesmo instituto no ano de 2010 este município detém 2.813 habitantes, com população estimada para 2017 de 3.066 habitantes. Ainda segundo dados do IBGE (2010) a renda per capita do município de Tenório gira em torno de R\$ 7.971,92, a taxa de educação para crianças de idade entre 6 e 14 anos é de 95,7% e o Índice de Desenvolvimento Humano do Município (IDHM) é de 0,581.

3.3 ASPECTOS FISIOGRÁFICOS

Em conformidade com Beltrão (2005) o município de Tenório encontra-se inserido ao polígono das secas, possuindo assim um clima BSh-Tropical quente seco, semi-árido com ocorrências de chuvas de verão, tem pluviometria anual entre 400 e 600 mm e distribuição irregular, onde o mesmo enquadra-se no bioclima 2b-sub-desértico, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, quente de tendência tropical com secas que duram de 9 a 11 meses por ano e temperatura média anual de 26°C, a vegetação predominante é do tipo caatinga-seridó e a altitude da região varia de 490 a 800 metros.

3.4 HIDROGRAFIA

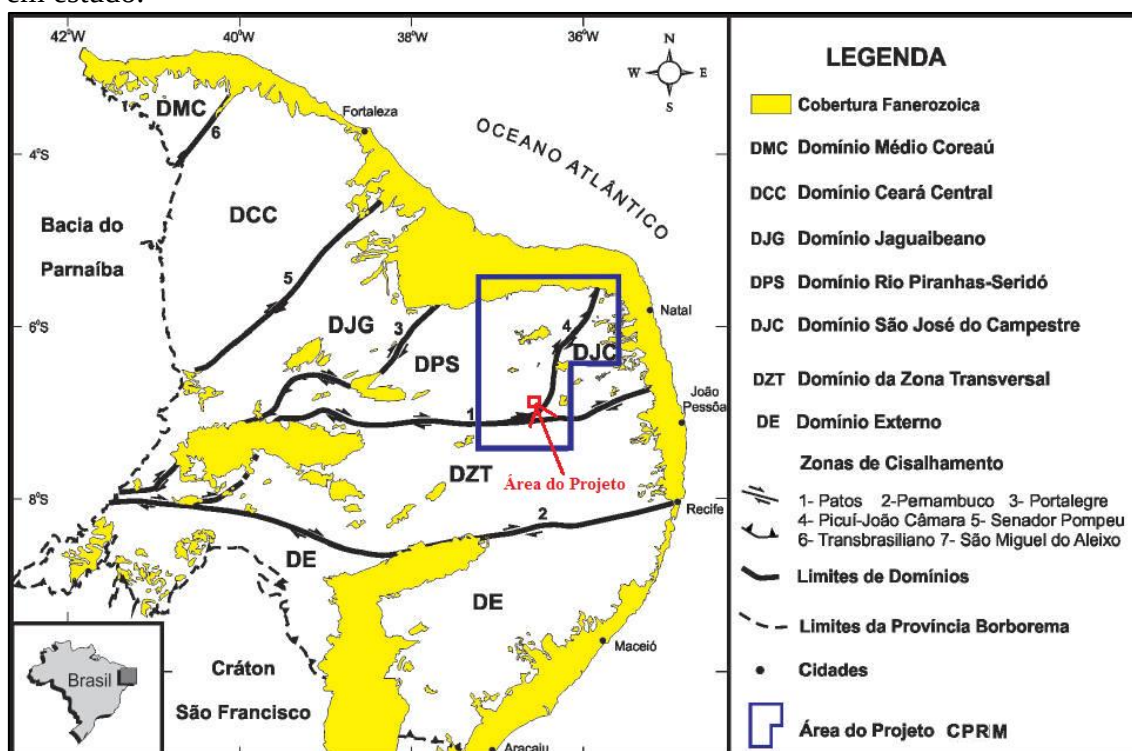
Segundo Beltrão (2005) o município de Tenório se insere nos domínios da bacia hidrográfica do Rio Paraíba, sub-bacia do rio Taperoá, onde seus principais contribuintes são os riachos Barraco, Caraibeira, Seridozinho, do Carneiro, da Várzea, do Cariri, da Bandarra e Teresópolis. Os cursos d'água possuem regime de escoamento intermitente com padrão de drenagem dentrítico.

3.5 GEOLOGIA REGIONAL

Almeida et al (1977) definiu a Província Pegmatítica da Borborema como uma entidade geotectônica brasileira situada entre o Cráton do São Francisco, e o Cráton de São Luís. Mais recentemente outros estudos como os de Jardim de Sá et al. (1992) Santos (1995 e 1999), Van Schmus et al. (1995b); Brito Neves et al. (2000), Santos et al. (2000) e Medeiros (2004) propuseram uma compartimentação para esta província baseada no conceito de terrenos e domínios tectonoestratigráficos e a partir de propostas de compartimentação apresentadas por Santos (1999) e Medeiros (2004), Cavalcante et al. 2016 afirma que sete domínios tectonoestratigráficos se encontram inseridos nesta província e foram denominados de Médio Coreáú, Ceará Central, Jaguaribeano, Rio Piranhas-Seridó, São José do Campestre, Zona transversal e Externo. Estas zonas podem ser observadas na figura 18.

A área de estudo deste trabalho está inserida dentro do Domínio Rio Piranhas-Seridó bem próximo da tríplice fronteira com os Domínios São José do Campestre e Zona Transversal.

Figura 18 - Domínios da Província Pegmatítica da Borborema, em vermelho, área do projeto em estudo.



Fonte: adaptado de Cavalcante et al. 2016.

3.5.1 Domínio Rio Piranhas-Seridó

Este domínio encontra-se entre os Domínios Zona Transversal, Jaguaribeano e São José do Campestre sendo delimitado pelas zonas de cisalhamento de Patos a sul, Portalegre a oeste, Picuí-João Câmara a leste e pelas coberturas fanerozóicas a norte.

Cavalcante et al. 2016 afirma que este domínio é caracterizado pela presença de gnaisses e migmatitos riacianos do Complexo Caicó datado por Costa e Dantas (2014) com 2456 ± 3 Ma, além de ortognaisses e migmatitos siderianos do Complexo Arábia datados com entre 2,10 e 2,25 Ga segundo estudos de Hackspacher et al (1990), Legrand et al (1991) Dantas (2007) e Souza et al (2016).

A área em estudo encontra-se inserida no Grupo Seridó e este incluso no domínio Rio Piranhas-Seridó onde de acordo com Santos (2002) este Grupo é a unidade litoestatigráfica representativa das faixas Seridó e Curimataú, que são divididos frequentemente por formações (da base para o topo) Jucurutu (paragnaisses, mármore, rochas calsilicáticas e formações ferríferas), Equador (quartzitos e metaconglomerados) e Seridó, baseado em estudos de Jardim de Sá e Salim (1980) e Jardim de Sá (1984 e 1994) sendo esta versão contestada por alguns autores.

Tanto as rochas paleoproterozóicas como as supracrustais neoproterozóicas são intrudidos por vários corpos ígneos (granitos, granitos pegmatóides e pegmatitos) ediacaranos, associados ao magmatismo brasileiro (Cavalcante, 2016).

3.5.2 Domínio São José do Campestre

Delimitado pelo Lineamento Patos, Zona de Cisalhamento Picuí-João Câmara a sul e oeste respectivamente e pelos sedimentos da Bacia Potiguar a norte e leste.

Baseado em estudos de caracterização litológica e isotrópica executados por Dantas (1997 e 2009), Dantas et al. (2004), Jesus (2001), Dantas et al. (2013), Dantas e Roig (2013), Roig e Dantas (2013) e Souza et al. (2015), Cavalcante (2016) afirma que este domínio se constitui de um segmento arqueano circundado por ortognaisses paleoproterozóicos.

3.5.3 Domínio da Zona Transversal

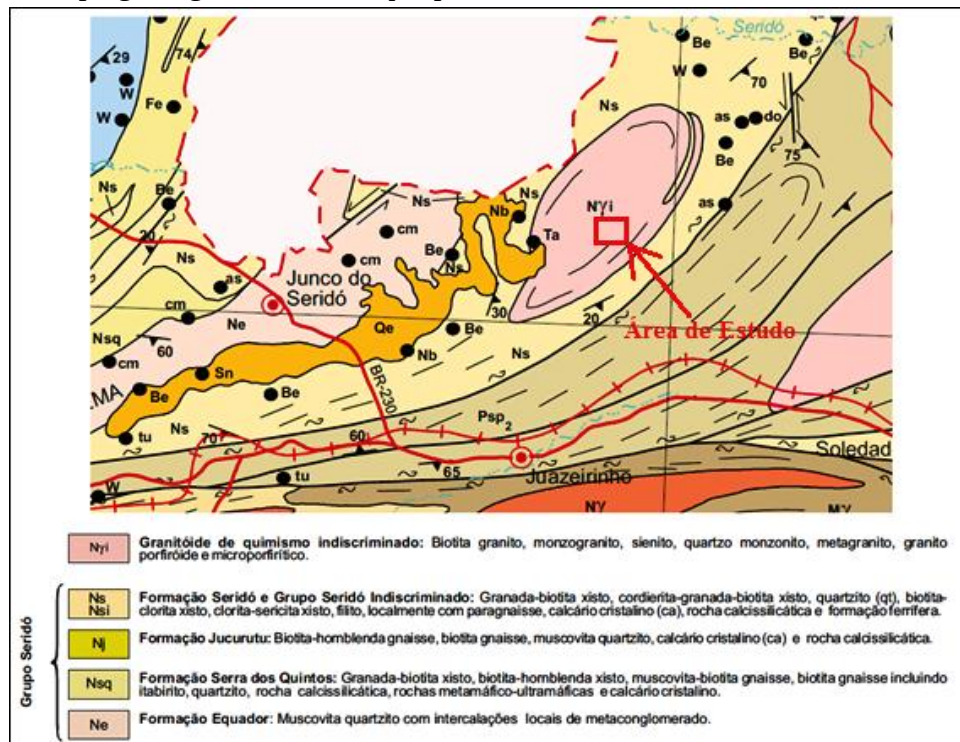
Delimitado pelo Lineamento Patos a norte e oeste, pelo extenso Lineamento Pernambucano a sul e a leste pelas coberturas fanerozóicas das bacias costeiras. Santos (1996 e 1999) compartimentou este domínio nos terrenos Piancó-Alto Brígida, Alto Pajeú, Alto Moxotó e Rio Capibaribe.

Cavalcante (2016) afirma que o Terreno Piancó-Alto Brígida corresponde a uma estreita faixa de metassedimentos neoproterozóicos. ediacaranos da Formação Santana dos Garrotes (grupo Cachoeirinha) e situa-se a sul do Lineamento Patos. O terreno Alto Pajeú encontra-se a sul do Lineamento Patos e a norte da zona de cisalhamento São Jose dos Cordeiros, onde se predominam sequências tonianas/Cariris Velhos (complexos Riacho Gravatá e São Caetano, além de metagranitóides), bem como corpos de metagranitóides estaterianos da Suíte Caloete e granitóides ediacaranos.

3.6 GEOLOGIA LOCAL

Como pode-se constatar no Mapa de Recursos Minerais do Estado da Paraíba (Santos et al 2002), a geologia local faz parte do Grupo Seridó, que consiste nas Formações Seridó e Grupo Seridó Indiscriminado, Formação Jucurutu, Formação Serra dos Quintos e Formação Equador (Figura 19). Vê-se no mapa que a área em estudo localiza-se bem acima de uma porção de granitóide, o que explica a ocorrência de pegmatitos na região.

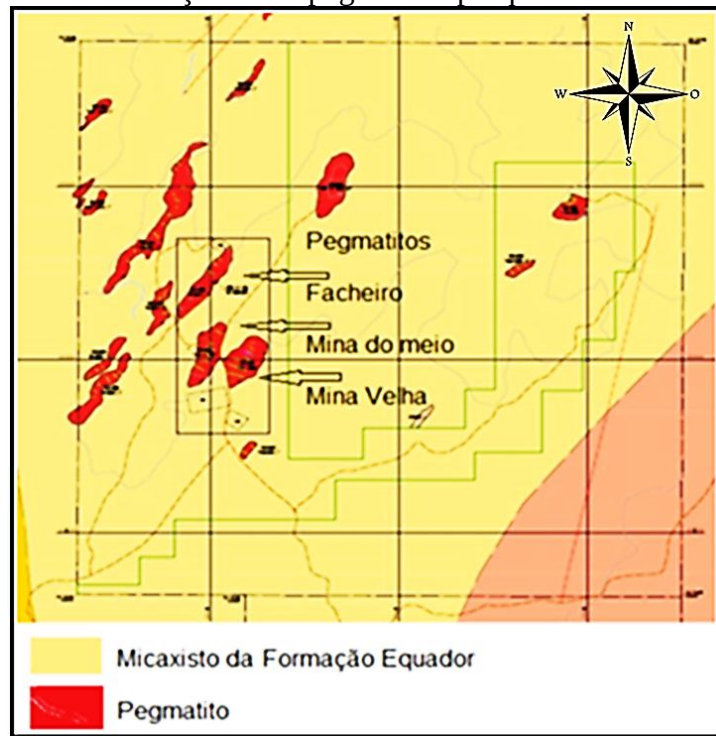
Figura 19 - Mapa geológico com destaque para a área em estudo.



Fonte: adaptado de Mapa Geológico da Paraíba (Santos, 2002).

De acordo com mapa de geologia local (Figura 20), assim como outros corpos pegmatíticos os corpos estudados encontram-se encaixados em uma porção de micaxisto da formação equador (Lira et al, 2016) apresentando foliação bem visível, assim como podemos ver na figura 21. O pegmatito Mina Velha é do tipo heterogêneo, apresentando núcleo de quartzó roxo (Figura 22), já o Pegmatito Facheiro, não se constatou zoneamento tanto nas partes expostas deste como nas escavações feitas no mesmo (Figura 23), porém é uma tendência geral os pegmatitos ali presentes serem heterogêneos, tendo em vista a experiência de outros corpos pegmatíticos próximos, que foram ou estão sendo lavrados. Portanto um cenário mais provável é o pegmatito Facheiro apresentar também zoneamento.

Figura 20 - Mapa com a localização dos 3 pegmatitos pesquisados e a encaixante.



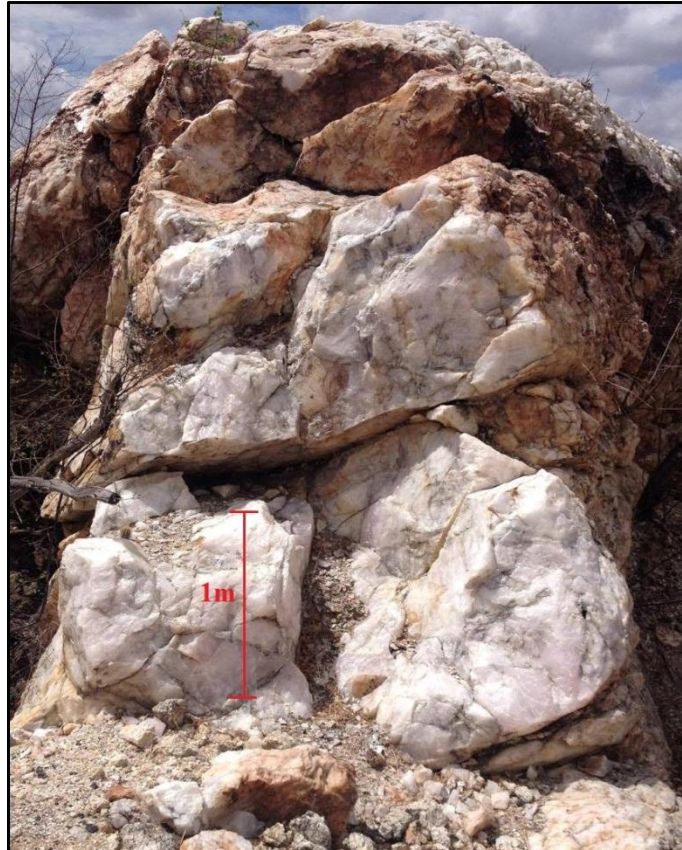
Fonte: Adaptado de Lira et al, 2016.

Figura 21 - Parede lateral de galeria escavada entre a rocha encaixante (vista na imagem) e o pegmatito Facheiro.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Figura 22 - Núcleo de Quartzo do Pegmatito Mina Velha.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Figura 23 - Parede de lateral de galeria transversal ao pegmatito facheiro.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização do estudo, foi feita visita de campo, para coleta de dados e amostras, posteriormente a isso foram executados ensaios de compressão uniaxial e ensaios de índices físicos para que a partir destes resultados, somados com dados coletados em campo (geomecânica) se obtenham os métodos de lavra mais promissores para os pegmatitos Facheiro e Mina Velha. Essas etapas estão descritas abaixo.

4.1 VISITA TÉCNICA À ÁREA DE ESTUDO

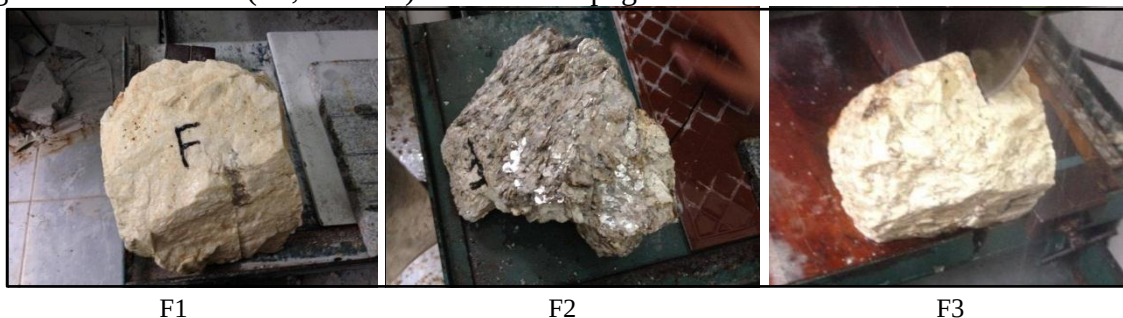
Inicialmente, foi feita uma visita técnica à ocorrência dos corpos pegmatíticos a fim de se entender as condições geomecânicas dos maciços rochosos para que se calculasse o valor do RMR (*Rock Mass Rating*) dos mesmos, assim como coletar amostras para ensaios de caracterização tecnológica, com o objetivo de medir a resistência mecânica à compressão destas e cálculo da densidade da rocha, consequentemente, cálculo do RSS (*Rock Substance Strength*). Também foram medidos, com ajuda do software AutoCAD, as espessuras e extensões dos corpos pegmatíticos bem como o volume dos corpos pelo método dos perfis lineares.

4.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DAS AMOSTRAS COLETADAS

Foram coletadas amostras nos dois corpos pegmatíticos do maciço rochoso pegmatítico e também das rochas encaixantes para análise petrográfica visando à determinação dos minerais constituintes da rocha, ensaios de determinação dos índices físicos para cálculo da massa específica, porosidade e absorção de água; e ensaios geomecânicos para medição da resistência à compressão da rocha.

As amostras coletadas na visita de campo ao pegmatito Facheiro, que totalizaram 3 amostras denominadas F1, F2 e F3, são apresentadas na figura 24 e correspondem à encaixante (xisto), feldspato e minério de tantalita (ambas no pegmatito).

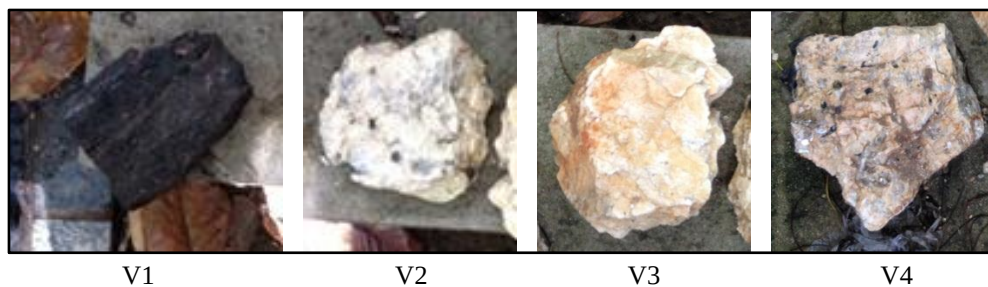
Figura 24 - Amostras (F1, F2 e F3) coletadas no pegmatito Facheiro.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

No local de ocorrência do pegmatito Mina Velha também foram coletadas 3 amostras de minério (V2, V3 e V4) e uma na encaixante (V1) para realização dos ensaios de caracterização tecnológica, conforme mostrado na figura 25.

Figura 25 - Amostras coletadas no pegmatito Mina Velha (V2, V3 e V4) e em sua encaixante (V1).



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

4.3 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram cortadas em equipamento de corte manual de rochas (figura 26) em cubos de dimensões 4 x 4 x 4 cm para execução do ensaio de tensão uniaxial e também foram preparadas amostras para ensaio de índices físicos. Para algumas delas não foi possível produzir os cubos, pois apresentavam um comportamento quebradiço, em alguns casos pela forte presença de mica intercalada com quartzo, que dificultou bastante o corte, ou pelo xisto estar bastante intemperizado, friável, sendo facilmente quebrado ou desfragmentado com as mãos.

Figura 26 - Corte das amostras coletadas em campo com equipamento manual de disco diamantado.



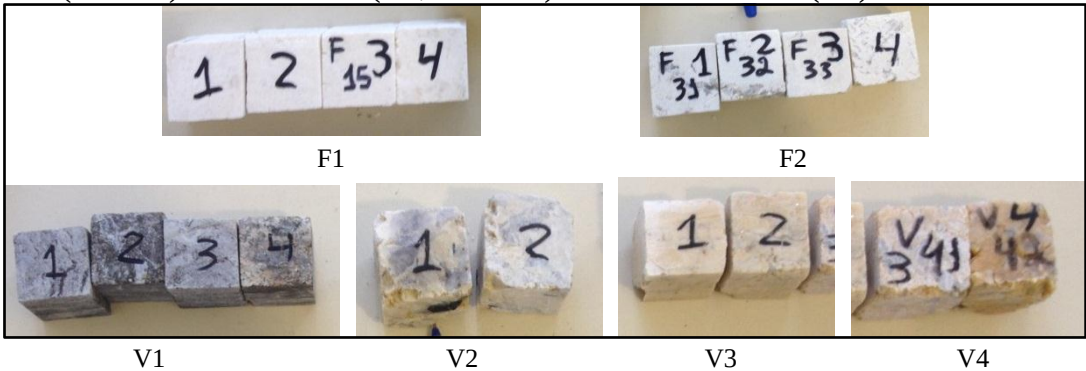
Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Foram preparadas 6 amostras, duas do pegmatito Facheiro (F1 e F3), outras 3 do pegmatito Mina Velha (V2, V3 e V4) e uma da rocha encaixante (V1), vide tabela 36 e figura 27, destinadas aos ensaios de determinação da resistência à compressão uniaxial.

Tabela 36 - Amostras preparadas para ensaio de resistência mecânica.

Facheiro	Número de Cubos
F1	4
F2	0
F3	4
Mina Velha	Número de Cubos
V1	4
V2	2
V3	2
V4	2

Figura 27 - Corpos de prova obtidos a partir do corte das amostras coletadas dos pegmatitos Facheiro (F1 e F2) e Mina Velha (V2, V3 e V4) e rocha encaixante (V1).



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

4.4 ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Os ensaios de compressão foram feitos seguindo a norma ABNT NBR 15.845 – 5 de 07/2015, utilizando uma prensa hidráulica manual com manômetro digital modelo 4HCA MDT da SOLOTEST (Figura 28). Para determinação da resistência à compressão uniaxial foi feita a medida da área da seção transversal das amostras e determinado o valor de Kgf em que ocorreu a ruptura da amostra ensaiada. Dividindo-se esse valor de força pela área da seção transversal, encontra-se o valor da resistência à compressão do bloco.

Figura 28 - Prensa hidráulica manual utilizada nos ensaios geomecânicos.



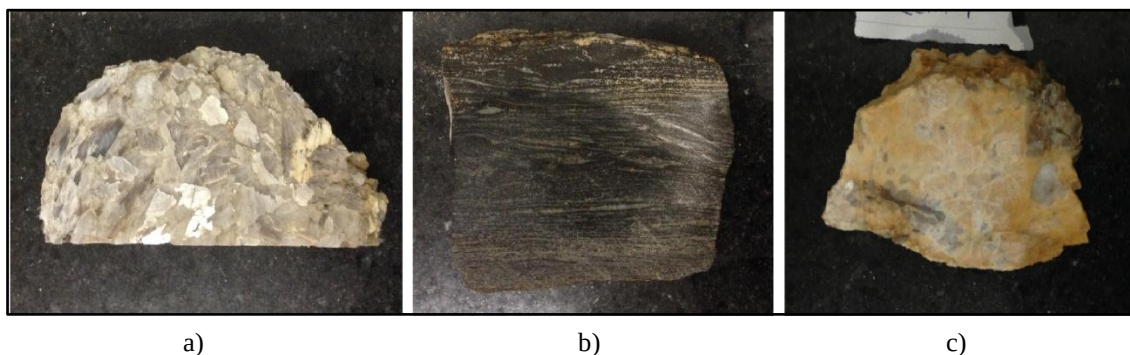
Fonte: Acervo fotográfico do autor.

4.5 ANÁLISE PETROGRÁFICA

Para análise petrográfica das amostras, foi feita uma análise macroscópica para identificação dos minerais contidos e assim determinar a composição da rocha de forma preliminar. Das amostras que foram coletadas em campo e foram preparadas para os ensaios de índices físicos e de resistência à compressão uniaxial, foram selecionadas três para análise petrográfica (Facheiro 2, Mina Velha 1 e Mina Velha 4) como visto na Figura 29, por estas

conterem a grande maioria dos minerais que constituem os pegmatitos estudados e rocha encaixante.

Figura 29 - Amostras a) Facheiro 2, b) Mina Velha 1 e c) Mina Velha 4.

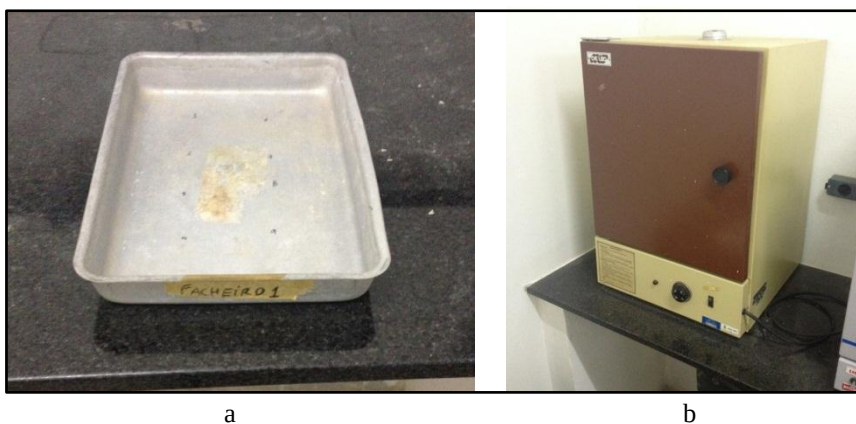


Fonte: Acervo fotográfico do autor.

4.6 DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES FÍSICOS

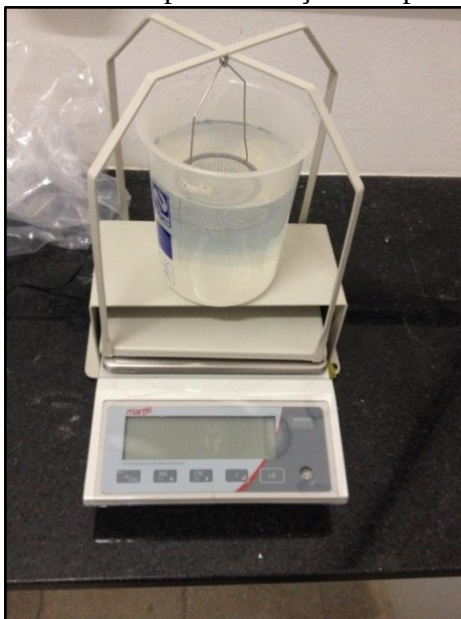
Para a determinação da densidade da amostra, fator preponderante para a seleção do método de lavra, foi feito o ensaio para determinação dos índices físicos da amostra, de acordo com a norma ABNT NBR 15845-2 de 07/2015. A amostra foi cortada em dimensões definidas, levadas a uma estufa (Figura 30b) em formas de alumínio (Figura 30a), secadas por 48 horas a uma temperatura de 100°C e pesadas, após isso esta foi imersa em água destilada por 48h e novamente pesadas em meio aquoso, para medirmos seu peso submerso e saturado (Figura 31). Para medição dos pesos foi usada a Balança de Precisão Marte Ad5002.

Figura 30 - a) Forma de alumínio utilizada para comportar as amostras secadas na estufa b) para ensaio de índices físicos.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Figura 31 - Balança de precisão utilizada para obtenção dos pesos das amostras.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

4.7 METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA

Para seleção do método de lavra mais aplicável no sentido operacional, serão utilizados nessa dissertação os métodos de Nicholas (1981) e o Nicholas Modificado criado pela UBC (1995), para que a partir das características físicas, mecânicas, mineralógicas e geomecânicas do maciço rochoso dos corpos de minério e das encaixantes, se consiga encontrar o método de lavra mais aplicável para os depósitos em questão.

Desta forma, os ensaios executados foram devidos a coleta e determinação de índices utilizados nestes dois métodos, então foi estudado o comportamento das fraturas dos maciços rochosos, assim como ensaios de compressão para determinação da resistência à compressão dos mesmos, também foi executado ensaio de índices físicos para determinação da densidade das rochas e assim calcular-se a pressão de sobrecarga a uma determinada profundidade do maciço rochoso. Estes índices são de fundamental importância para a aplicação dos métodos supracitados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da execução das etapas explicadas no capítulo anterior, foram obtidos os resultados abaixo explanados.

5.1 VISITA TÉCNICA E COLETA DE AMOSTRAS NA ÁREA DE ESTUDO

Em visita técnica à área de pesquisa, foram coletados dados e amostras de rochas para analisar as características geomecânicas do maciço rochoso das encaixantes e dos corpos de minérios e também para auxiliar a entender as características geológicas, geométricas e geomecânicas do depósito mineral a ser estudado.

A seguir é feita uma descrição dos trabalhos de campo e coleta de amostras.

5.1.1 Pegmatito Facheiro

Ponto 1: Neste ponto foi encontrado afloramento em corte de estrada da rocha encaixante entre o Pegmatito facheiro e o Mina do Meio, trata-se de um xisto, onde pode-se identificar facilmente as superfícies de foliação com direção Az 20° mergulhando 57° para a direção Az 110°. Verificou-se uma rocha bastante intemperizada, friável e fraturada (50 a 100 fraturas por metro), por estar bem próxima à superfície. Como a rocha é aflorante, a biotita que faz parte da composição do xisto e contém ferro em sua composição oxidou-se pela presença de água e oxigênio da superfície (figura 32).

Figura 32 - Afloramento de xisto bastante intemperizado - encaixante do pegmatito facheiro



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Ponto 2: Neste ponto também foi encontrado afloramento de xisto onde se percebe claramente as superfícies de foliação da rocha com direção Az 30° mergulhando 52° para Az 170°. Não foi encontrada nenhuma fratura na rocha, porém esta encontra-se bastante intemperizada e bem friável (figura 33).

Figura 33 - Xisto aflorante em mina do facheiro – medição de atitude da rocha.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Ponto 3: Afloramento de xisto, onde são bem visíveis as superfícies de foliação da rocha com direção Az 30° mergulhando 51° para a direção Az 120°. A rocha apresenta-se bastante intemperizada com fraturas espaçadas (3 a 5 fraturas /m) e com aspecto bem friável (figura 34).

Figura 34 - Xisto aflorante na encaixante do pegmatito facheiro.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Ponto 4: Neste ponto encontra-se a entrada de uma galeria executada em sentido perpendicular ao mergulho do corpo de minério, iniciando no xisto da lapa do pegmatito, atravessando o corpo de minério e terminando no xisto da capa do pegmatito, com aproximadamente 45 m de extensão. Vê-se as superfícies de foliação da rocha com facilidade, pois a parede da galeria corta transversalmente a direção do acamamento da rocha que apresenta uma direção Az 30° mergulhando 50° para a direção Az 120° (figuras 35a e 35b).

Figura 35 - Paredes da galeria perpendicular ao Pegmatito Facheiro à esquerda (a) e à direita (b).



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Ponto 5: Neste ponto, que localiza-se dentro da galeria descrita no ponto 4, se vê o maciço rochoso do Pegmatito Facheiro (figura 36), que apresenta várias fraturas. Estas fraturas podem ter sido geradas por descompressão da rocha (fraturas de alívio), pois se encontram a poucos metros da superfície (aproximadamente 10 m). Vemos no pegmatito facheiro 3 famílias de fraturas, uma com direção Az 20°, outra com direção Az 260° e outra com direção horizontal.

Figura 36 - Pegmatito dentro da galeria da mina do facheiro.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Ponto 6: Vê-se neste ponto afloramento da rocha encaixante, xisto, bastante intemperizada, bem friável, com direção de Az 33° , apresentando uma fratura com mergulho de 50° na direção Az 78° (figura 37).

Figura 37 - Xisto aflorante da encaixante do pegmatito facheiro



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Ponto 7: Xisto bastante friável, onde percebe-se facilmente suas superfícies de foliação com direção Az 30° , com uma fratura com mergulho de 56° na direção Az 90° (Figura 38).

Figura 38 - Afloramento de xisto da encaixante ao pegmatito facheiro.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

5.1.2 Pegmatito Mina do Meio

Ponto 1: Neste ponto vê-se um afloramento de rocha encaixante ao pegmatito Mina do Meio, com direção Az 40° mergulhando 52° para a direção Az 130°. O xisto apresenta-se bem friável, por conta do intemperismo sofrido e o xisto oxida bastante na presença de água e oxigênio, por conter biotita em sua composição, mineral que contém ferro (Figura 39).

Figura 39 - Xisto aflorante da encaixante do Pegmatito Mina do Meio.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Ponto 2: Afloramento de xisto, sendo facilmente identificadas as foliações da rocha, com direção Az 40° mergulhando 57° na direção Az 130° (figura 40).

Figura 40 - Afloramento de xisto na encaixante do pegmatito Mina Velha.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Entre os pegmatitos Mina do Meio e Mina Velha existe um vale constituído dos mesmos litotipos xistosos que ocorrem como encaixante dos respectivos pegmatitos e possuem um comportamento semelhante às encaixantes citadas (Figura 41).

Figura 41 - Xisto encaixante entre os pegmatitos Mina do Meio e a Mina Velha.

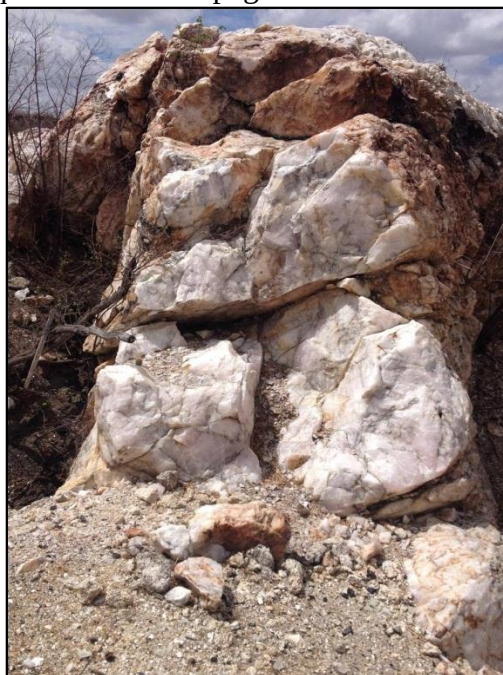


Fonte: Acervo fotográfico do autor.

5.1.3 Pegmatito Mina Velha

Ponto1: Neste ponto encontra-se afloramento de uma porção de quartzo róseo do pegmatito Mina Velha, que já esteve em processo de lavra garimpeira (Figura 42). Atualmente a antiga mina (garimpo) está inoperante. Esta porção de quartzo róseo demonstra que o pegmatito é do tipo heterogêneo.

Figura 42 - Ocorrência de quartzo róseo no pegmatito Mina velha.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Ponto 2: Face livre aberta no pegmatito Mina Velha onde nota-se a ocorrência de quartzo e feldspato, com uma densidade média de 4 a 5 fraturas/m, muito devidas às tensões de relaxamento após aberta a face livre ou por estarem próximas à superfície (Figura 43).

Figura 43 - Face livre aberta no pegmatito Mina velha.

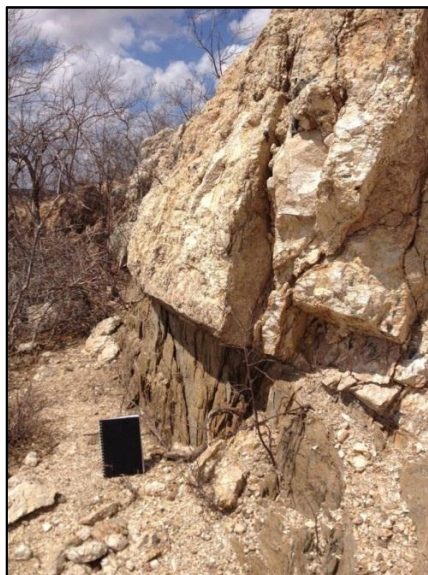


Fonte: Acervo fotográfico do autor.

Ponto 3: Contato entre corpo de minério e rocha encaixante (xisto) indicando a direção do xisto, que está entre Az 20° e Az 50° mergulhando na direção entre Az 110° e Az 140°

com o mergulho variando entre 45 e 70°. Já a direção do corpo de minério é Az 40° mergulhando na direção Az 310° com mergulho que varia entre 65 e 80° (Figura 44).

Figura 44 - Contato entre rocha encaixante (xisto) e corpo de minério (pegmatito Mina Velha).



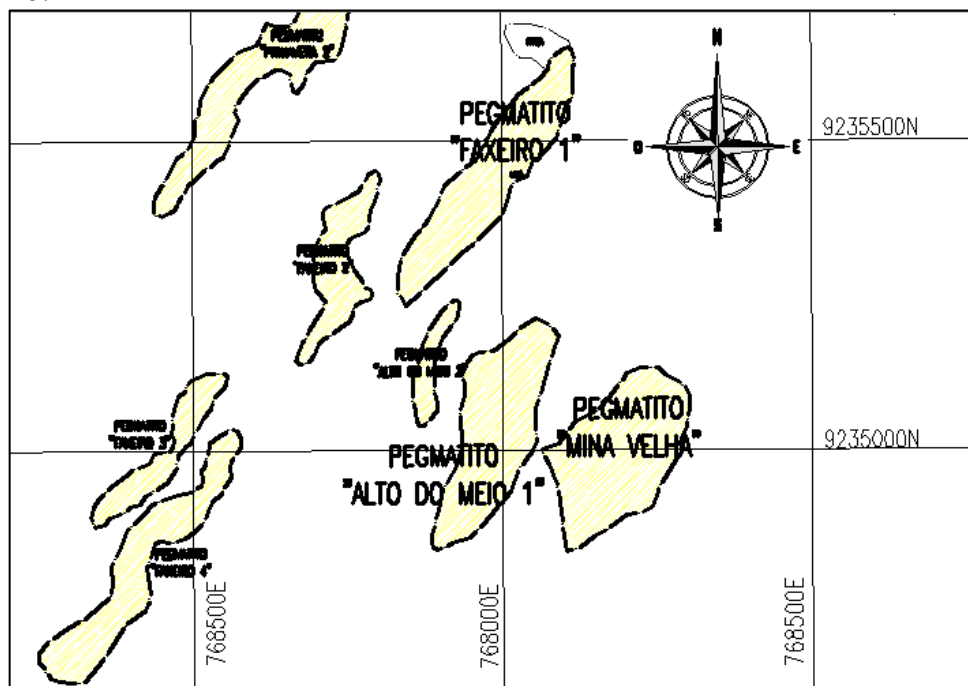
Fonte: Acervo fotográfico do autor.

5.2 CARACTERÍSTICAS DO DEPÓSITO MINERAL

Na área de estudo encontram-se cerca de 12 pegmatitos, dentro da área de concessão da empresa MINEGRAN sendo que no presente estudo foram visitados e avaliados três corpos pegmatíticos localizados próximos entre si (Figura 45) na intenção de se coletar dados geométricos e geomecânicos dos mesmos, são eles:

- Pegmatito Facheiro;
- Pegmatito Mina Velha.

Figura 45 - Em branco vista em planta dos corpos pegmatíticos Facheiro 1, Alto do Meio 1 e Mina Velha.



Fonte: Imagem obtida através do software AutoCAD.

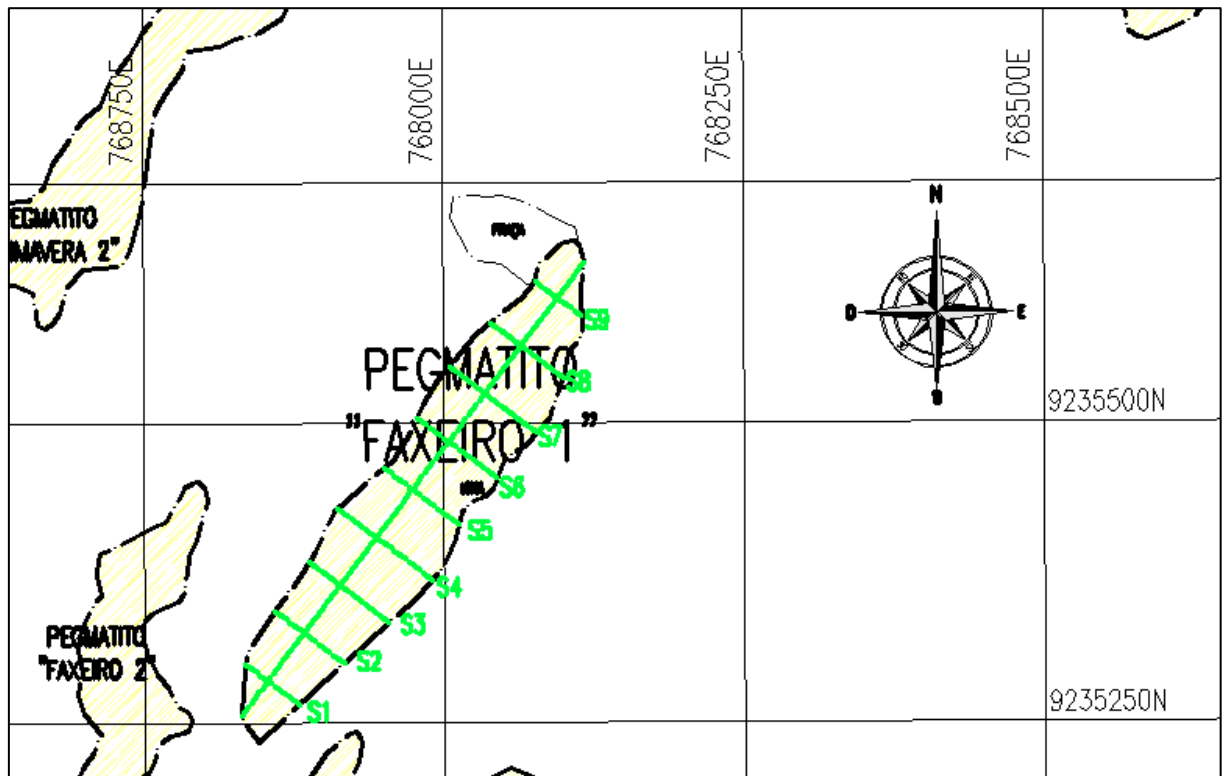
5.2.1 Aspectos geométricos dos corpos de minério

Foram feitas seções transversais aos corpos de minério com espaçamento entre si de 50 m, com o objetivo de medir suas espessuras ao longo das seções e posteriormente determinar a espessura média de cada corpo, assim como determinar a área dessas seções que interceptam o corpo de minério, através do software Datamine Studio, para que isto permita o cálculo do volume do corpo através do método dos Perfis Lineares.

5.2.1.1 Pegmatito Facheiro

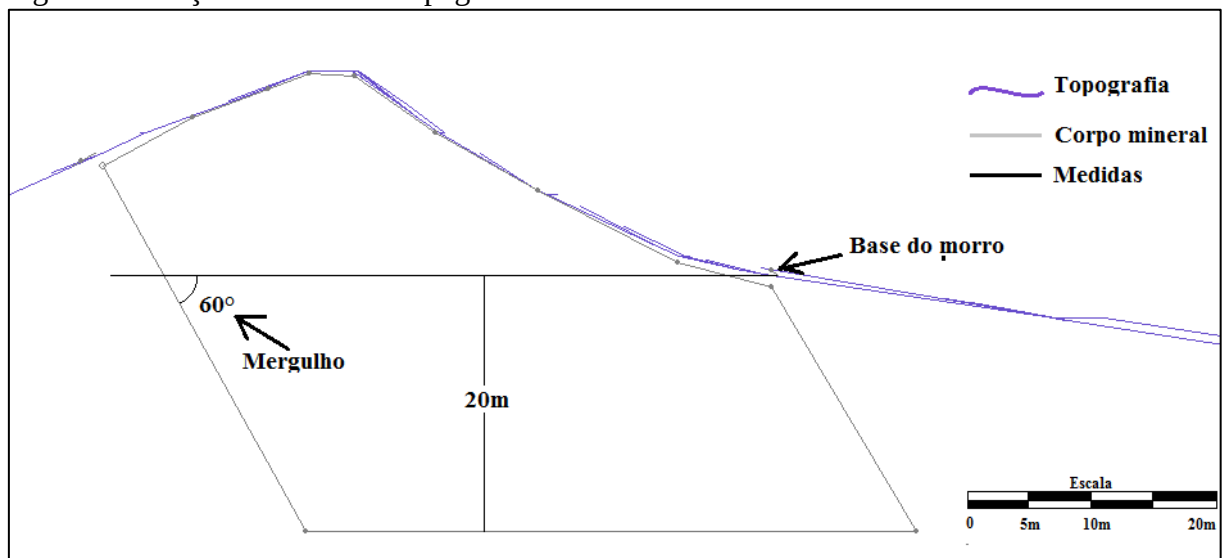
Sabe-se que o corpo tem um comprimento de 473 m, medido no AutoCAD e em campo foi visto que o corpo apresenta um mergulho de aproximadamente 60°, desta forma foi possível se fazer os perfis geológicos, espaçados em 50 m entre si (Figura 46), da parcela do corpo entre base do morro do afloramento até o topo e estimar a continuidade do mesmo 20 metros abaixo desta base, utilizando o mergulho medido em campo, como na figura 47 e “APÊNDICE A”.

Figura 46 - Pegmatito facheiro (imagem obtida no software AutoCAD).



Fonte: Imagem obtida através do software AutoCAD.

Figura 47 - Seção S1 vertical ao pegmatito Facheiro.



Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio 3.

Medindo as seções no AutoCAD, obtiveram-se os resultados apresentados na tabela 37, que permitem estimar o volume das reservas minerais do pegmatito.

Tabela 37 - Espessura do corpo ao longo das seções transversais ao corpo pegmatítico Facheiro e espessura média.

Facheiro											
Seções	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Comprimento (m)	0	56,09	72,47	83,28	99,80	78,37	83,28	91,00	76,21	48,53	0
Área (m²)	0	1484,03	2154,29	2655,32	3551,60	2437,34	2643,95	2771,33	1866,22	953,30	0

Deste modo, vê-se que a espessura média do corpo é de aproximadamente 77m e utilizando a equação para cálculo do volume pelo método das seções paralelas, obteve-se o seguinte valor:

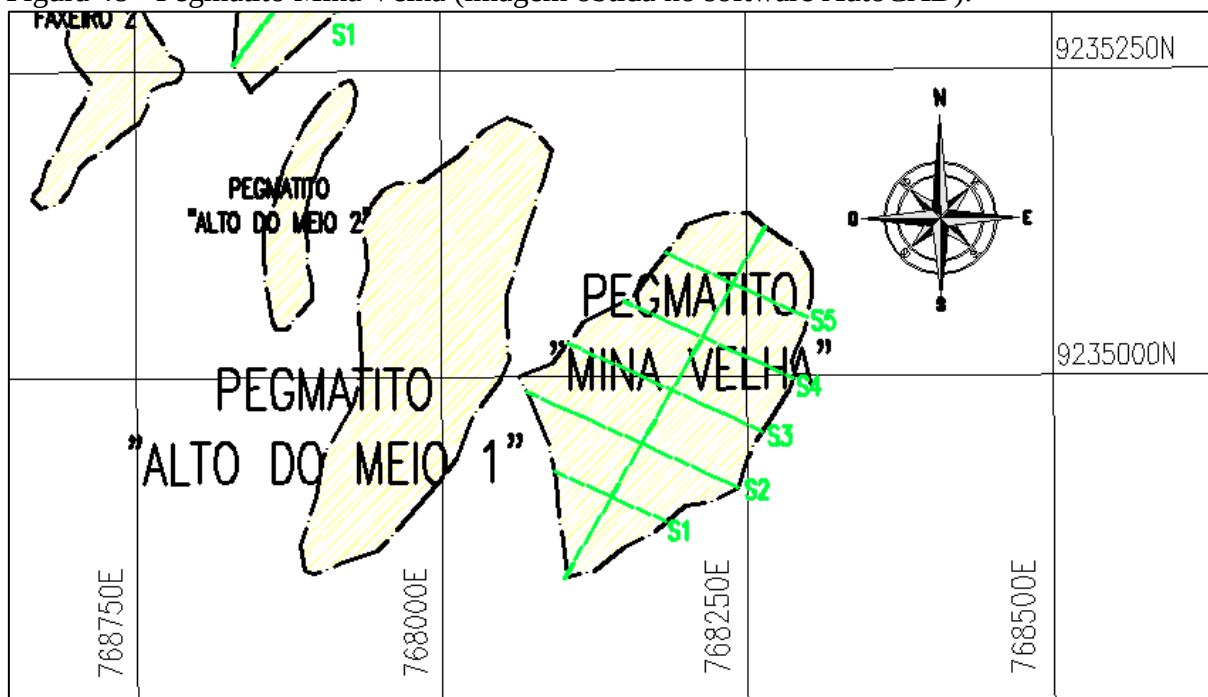
$$V_{Facheiro} = \sum_{i=1}^9 S_i \times 50m = 1484,03 m^2 \times 50 m + 2154,29 m^2 \times 50 m + 2655,32 m^2 \times 50 m + 3551,60 m^2 \times 50 m + 2437,34 m^2 \times 50 m + 2643,95 m^2 \times 50 m + 2771,33 m^2 \times 50 m + 1866,22 m^2 \times 50 m + 953,30 \times 50m$$

$$V_{Facheiro} = 1.025.869,00 m^3$$

5.2.1.2 Pegmatito Mina Velha.

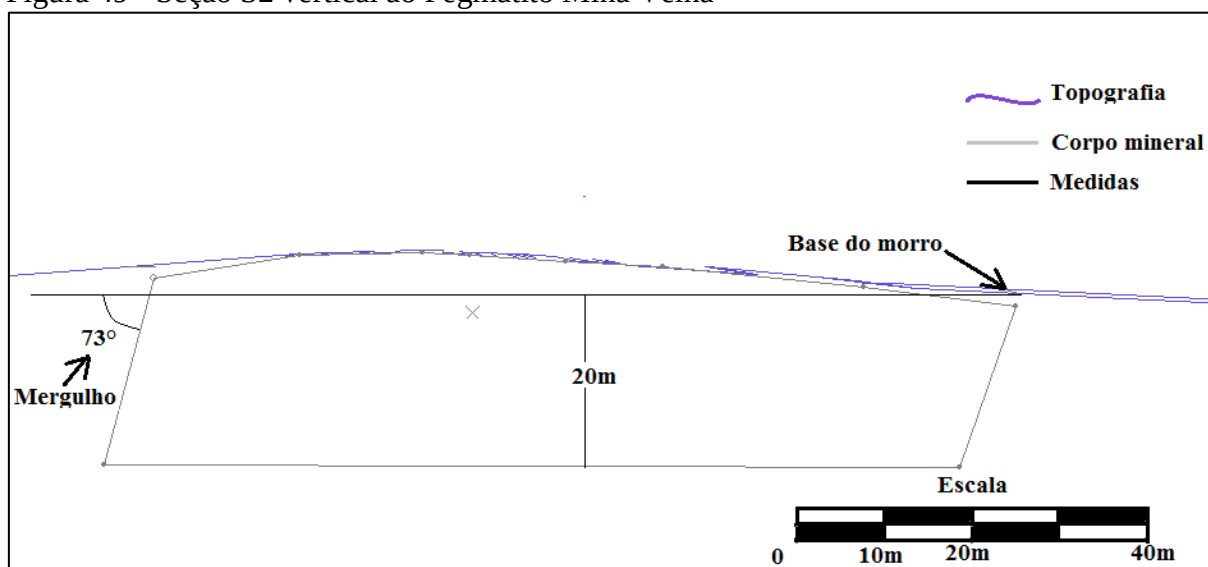
Assim como fora procedido para o pegmatito anterior, mediu-se também as seções transversais ao corpo pegmatítico em software AutoCAD (Figura 48) e seu comprimento (330 m), que são apresentados na figura 38. Em campo, foi medido um ângulo de mergulho médio de 72°, assim, fora utilizado este valor de mergulho para o corpo como mergulho geral e se gerou em Datamine Studio 3 os perfis geológicos, para que com isto se faça medir a área das seções do corpo da base do morro do afloramento até seu topo e ainda estimando a continuidade do corpo 20 m abaixo da base do corpo, como pode-se ver na Figura 49 e no “APÊNDICE B”.

Figura 48 - Pegmatito Mina Velha (imagem obtida no software AutoCAD).



Fonte: Imagem obtida através do software AutoCAD.

Figura 49 - Seção S2 vertical ao Pegmatito Mina Velha



Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio 3.

Medindo as seções no AutoCAD, obtiveram-se os resultados apresentados na tabela 38, que permitem estimar o volume das reservas minerais nesse pegmatito através do método das seções verticais equidistantes.

Tabela 38 - Espessura do corpo ao longo das seções transversais ao corpo pegmatítico Mina Velha e espessura média.

Mina Velha									
Seções	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Comprimento (m)	0	38,23	100,50	189,55	175,13	152,16	126,83	52,41	0
Área (m²)	0	788,09	2262,77	5238,14	5570,34	5419,07	4585,99	1264,12	0

Desta forma, calcula-se que a espessura média é de aproximadamente 120m, e utilizando a equação do método das seções paralelas, obteve-se o seguinte volume:

$$\begin{aligned}
 V_{Mina\ Velha} &= \sum_{i=1}^8 S_i \times 50m = 788,09\ m^2 \times 50\ m + 2262,77\ m^2 \times 50\ m + \\
 &5238,14\ m^2 \times 50\ m + 5570,34\ m^2 \times 50\ m + 5419,07\ m^2 \times 50\ m + 4585,99\ m^2 \times \\
 &50\ m + 1264,12\ m^2 \times 50\ m \\
 V_{Mina\ Velha} &= \mathbf{1.256.429,00\ m^3}
 \end{aligned}$$

5.2.2 Condições Geomecânicas

Com a realização da visita de campo, foram levantadas informações a respeito das características geomecânicas dos maciços rochosos, tanto dos corpos pegmatíticos Facheiro e Mina Velha como da rocha encaixante, para que seja possível estimar a qualidade destes maciços.

5.2.2.1 Pegmatito Facheiro

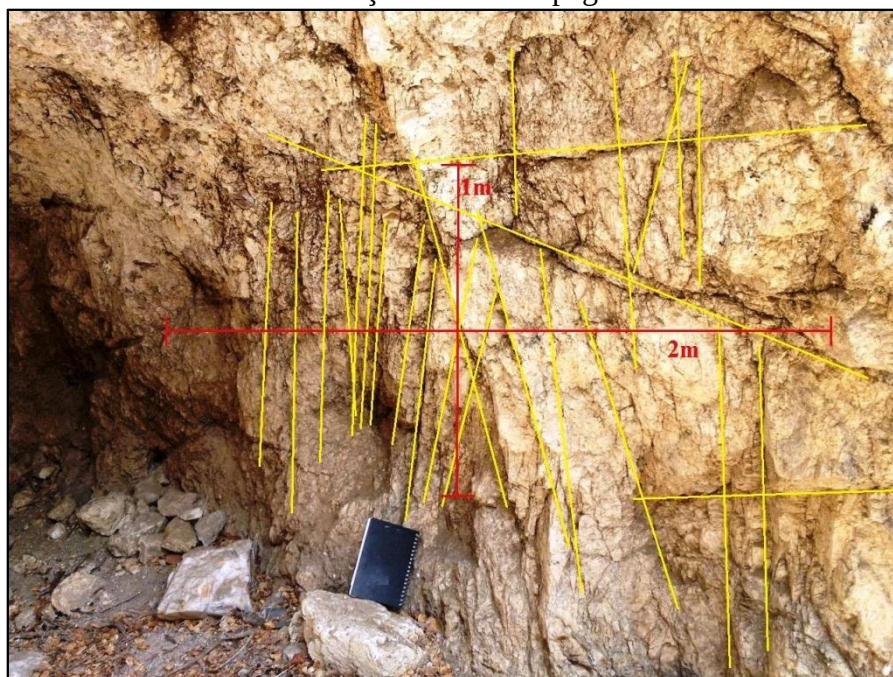
No pegmatito Facheiro, vimos na parede de uma galeria aberta perpendicularmente ao mesmo 3 famílias de fraturas (Figura 50), uma sub-horizontal (Aproximadamente 2 fraturas/m), outra com direção Az 20° (9 fraturas/m) e outra com direção Az 260° (Não foi possível medir a quantidade de fraturas por metro, pois a fratura é paralela à face aberta, porém, iremos adotar o maior valor entre as frequências das famílias de juntas supramencionadas para efeito da classificação do maciço rochoso, logo:

$$Jv = 9 + 2 + 9 = 20$$

A partir do valor do índice Jv, calcula-se o valor do RQD:

$$RQD = 115 - 3,3 \times Jv = 115 - 66 = 49$$

Figura 50 - Famílias de fraturas no maciço rochoso no pegmatito Facheiro.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

5.2.2.2 Pegmatito Mina Velha

No pegmatito Mina Velha, vemos em uma face aberta do mesmo 3 famílias de fraturas com superfície rugosa, sem preenchimento ou presença de água (Figura 51), uma família com frequência de fraturas 6 fraturas/m, outra com frequência de aproximadamente 2 fraturas/m e a outra família não conseguimos calcular sua frequência pois a mesma se encontra paralela à face aberta, entretanto, assim como calculamos o J_v para o pegmatito Facheiro, iremos proceder para cálculo do mesmo índice para o pegmatito Mina Velha, considerando a maior frequência de juntas das famílias anteriores para tomar o cenário mais pessimista, assim:

$$J_v = 6 + 2 + 6 = 14$$

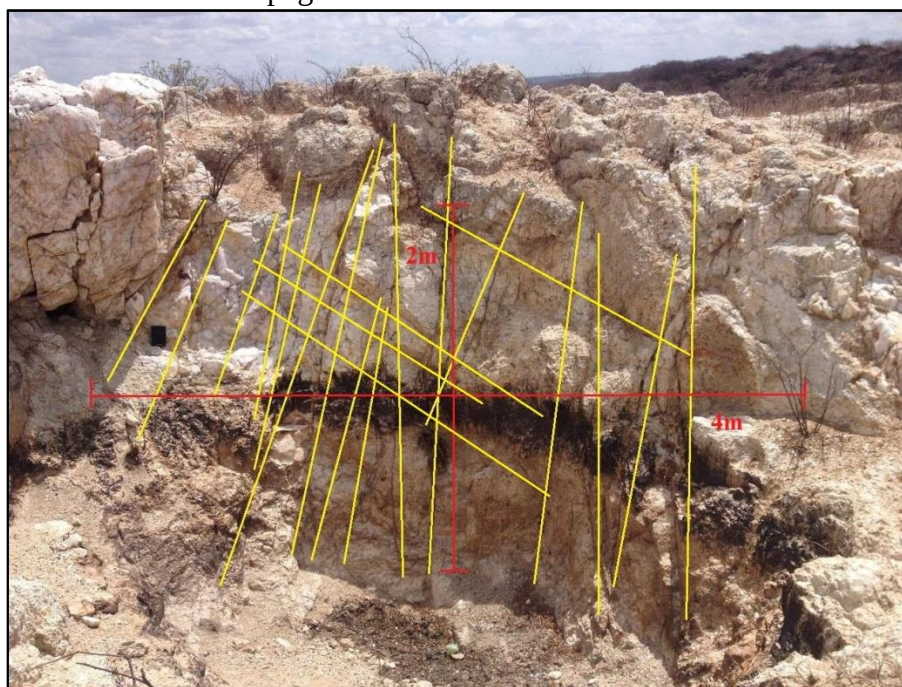
A partir deste valor, calcula-se o valor do RQD:

$$RQD = 115 - 3,3 \times J_v = 115 - 46,2 = 68,8$$

Como o corpo de minério Mina Velha é um pegmatito do tipo heterogêneo, temos uma zona do corpo com maior concentração de minerais feldspáticos, estes têm planos de clivagem, podendo acarretar em fraturas com superfície lisa em 3 direções diferentes, o que

diminui a competência geomecânica do maciço rochoso, porém foram vistas fraturas com superfície rugosa, também vimos em amostras coletadas em pilhas de material proveniente de trincheiras abertas perpendicularmente ao corpo de minério, concentrações de moscovita e quartzo com resistência mecânica muito baixa, sendo facilmente desfragmentadas com as mãos, mas esta formação não deve afetar o comportamento geomecânico do maciço como um todo, pois são bem pontuais.

Figura 51 - Face livre aberta no pegmatito Mina Velha.



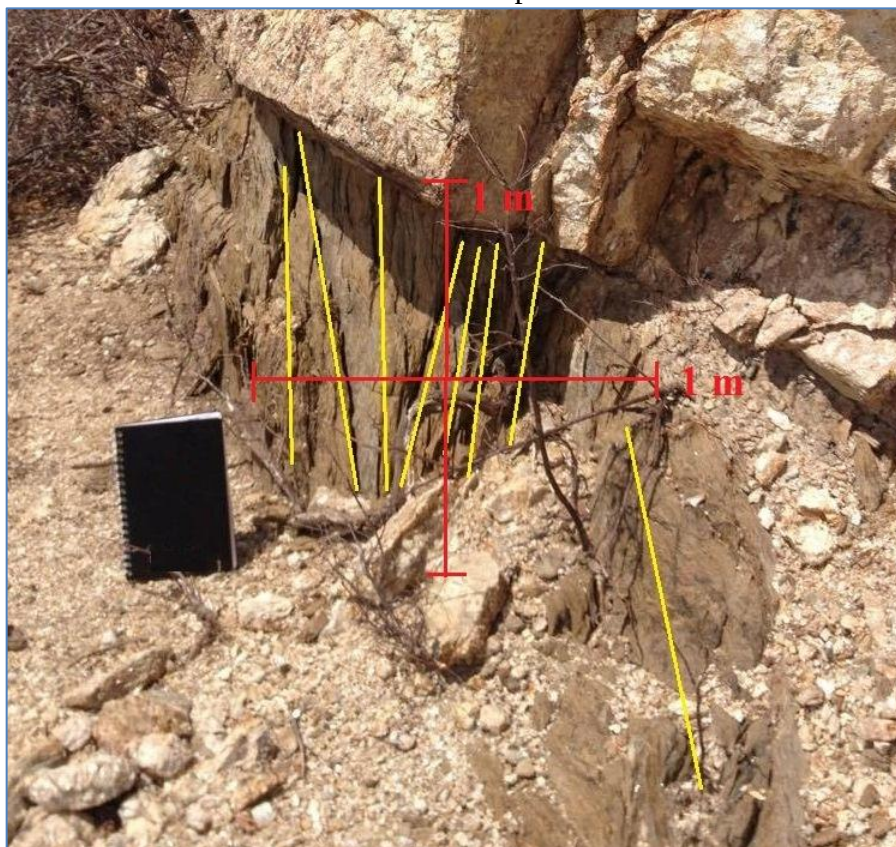
Fonte: Acervo fotográfico do autor.

5.2.2.3 Encaixantes

As rochas encaixantes são constituídas de xisto, logo teremos um maciço com uma superfície de foliação de direção e sentido definidos. Foi visto em visita de campo que esta foliação pode gerar fraturas que possuem uma superfície rugosa. A partir do contato entre o pegmatito Mina Velha e a rocha encaixante, pode-se notar uma família de fraturas com frequência aproximada de 4 fraturas/m, porém sabemos que na zona de contato a rocha encaixante encontra-se em stress devido ao esforço residual da intrusão do próprio pegmatito na encaixante, e é provável que estas fraturas tenham sido provocadas pelo alívio dessas tensões quando o contato foi exposto pelo intemperismo. Porém, utilizaremos essa

configuração de juntas para cálculo da frequência de juntas para se tomar o cenário mais pessimista, logo encontramos uma família de fraturas de frequência 4 fraturas/m (Figura 52).

Figura 52 - Família de fraturas na encaixante ao corpo Mina Velha.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

5.3 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS E DISTRIBUIÇÃO DE TEORES DOS PEGMATITOS FACHEIRO E MINA VELHA

A partir de mapas geológicos e topográficos dos depósitos minerais estudados, foi possível a estimativa das características formato geral, espessura média, mergulho, distribuição de teores que são imprescindíveis para a seleção do método de lavra.

5.3.1 Formato geral (*General Shape*)

- Facheiro: tem comprimento de 473 m e uma espessura média de 77 m, onde em nenhuma seção vertical ao comprimento do corpo não se viu espessura acima de 100 m, sendo assim

um corpo Tabular (*Platy-Tabular*) na escala de Nicholas e também no método de Nicholas modificado (UBC).

- Mina Velha: possui comprimento igual a 330 m e espessura média de 120 m, sendo assim classificado como um corpo Irregular na escala de Nicholas e também para o método de Nicholas modificado (UBC).

5.3.2 Espessura (*Ore Thickness*)

- Facheiro: Como falado anteriormente a espessura média do corpo é de 77 m onde em nenhuma seção transversal ao corpo se mediu uma espessura local maior que 100m, sendo assim classificado por Nicholas como Espesso (*Thick*), e também pela escala do método UBC.

- Mina Velha: Como dito antes, a espessura média do corpo é de 120 m, sendo assim classificado por Nicholas pelo método UBC como Muito Espesso (*Very Thick*).

5.3.3 Mergulho (*Plunge*)

- Facheiro: Em medição em campo vimos que o mergulho deste corpo se aproxima de 60°, sendo assim classificado por Nicholas de corpo com Forte Mergulho (*Steep*) assim como pela técnica UBC.

- Mina Velha: Em campo se mediu um mergulho médio de aproximadamente 73°. Logo este corpo é classificado por Nicholas como corpo de Forte Mergulho (*Steep*) assim como pela técnica UBC.

5.3.4 Profundidade (*Depth Bellow Surface*)

- Facheiro: Corpo aflorante, chegando a ser facilmente localizado visualmente no local. Logo sua profundidade é 0. Pelo método UBC modificado sendo classificado como Pouco Profundo (*Shallow*).

- Mina Velha: É um corpo aflorante, chegando a ser visto em superfície, logo sua profundidade é 0. Pelo método UBC modificado sendo classificado como Pouco Profundo (*Shallow*).

5.3.5 Distribuição de teores (*Grade Distribution*)

- Facheiro: Como explanado no capítulo 2, a ocorrência dos minerais Columbita e Tantalita em pegmatitos se dá geralmente na zona intermediária do mesmo, porém ainda muito erráticas, pois a distribuição de teores de minerais nióbio-tantalatos nessa zona ocorre de forma bastante aleatória e pontual. Para o pegmatito em questão essa observação é verdadeira. Logo tanto pela metodologia de Nicholas quanto pelo método UBC essa distribuição classifica-se como Errática (*Erratic*).

- Mina Velha: Assim como para os pegmatitos anteriormente citados, a ocorrência dos minerais Columbita e Tantalita se dá na zona intermediária do pegmatito com distribuições bastante pontuais e erráticas, sendo classificados pelas metodologias de Nicholas e UBC como distribuição de teor Errática (*Erratic*).

5.4 CARACTERÍSTICAS MINERAIS E TECNOLÓGICAS DO MINÉRIO E ENCAIXANTES

5.4.1 Resultados dos ensaios de análise petrográfica

Das análises petrográficas das amostras, foram obtidos os seguintes resultados:

- Facheiro 2 – Constituída aproximadamente de 60% de quartzo, 25% de muscovita e 15% de plagioclásio, sendo classificada pelo diagrama streckeisen por Muscovita-Granito (Figura 53).

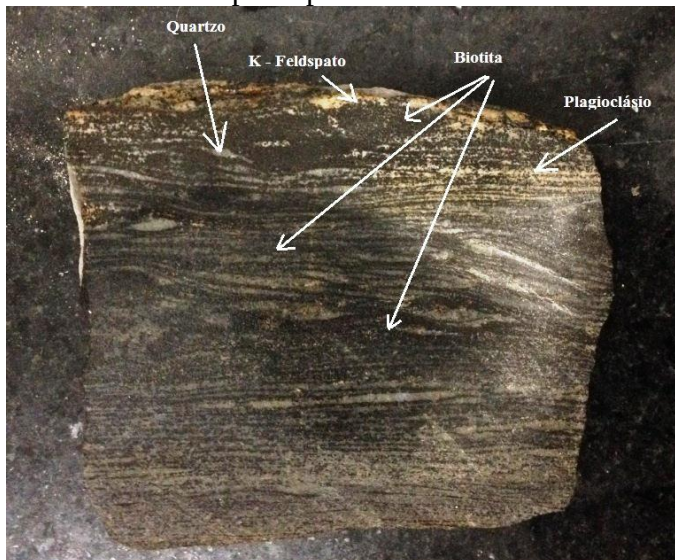
Figura 53 - Amostra Facheiro 2, nota-se os três minerais principais que contém a amostra.



Fonte: Acervo pessoal do autor.

- Mina Velha 1 – Deformação com cinemática compressiva sinistral (sentido anti-horário) contendo Biotita, Quartzo, K-feldspato, Plagioclásio e outros minerais acessórios (Figura 54).

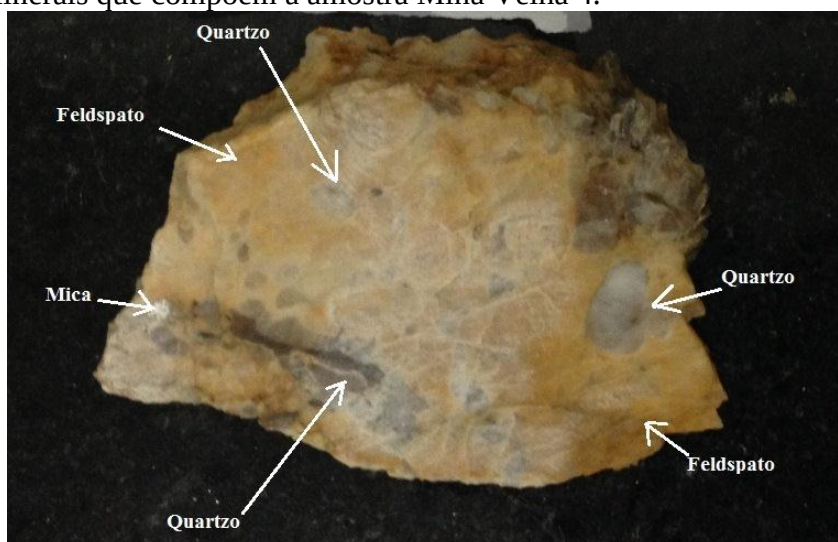
Figura 54 - Amostra Mina Velha 1 e seus principais minerais constituintes.



Fonte: Acervo fotográfico do autor.

- Mina Velha 4 – Contém 10% de Muscovita, 30% de quartzo, 60% de ortoclásio e algumas incrustações de schorlita (ou afrisita). De acordo com o diagrama streckeisen a rocha classifica-se como Turmalina-Muscovita-Sienito Granito (Figura 55).

Figura 55 - Minerais que compõem a amostra Mina Velha 4.



Fonte: Acervo pessoal do autor.

5.4.2 Resultados dos ensaios de Compressão Uniaxial

Como descrito na metodologia proposta para execução deste trabalho, foram feitos ensaios de compressão uniaxial, seguindo as determinações e procedimentos exigidos na norma ABNT NBR 15845-5 de 07/2015, no Laboratório de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, cujos resultados se encontram na tabela abaixo.

Tabela 39 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão simples.

Pegmatito	Facheiro		Mina Velha			Encaixante
Amostas	F1	F3	V2	V3	V4	V1
Valores	42,19Mpa	37,99Mpa	39,53Mpa	17,40Mpa	41,69Mpa	58,82Mpa
Média	40,09Mpa		32,87Mpa			58,82Mpa

Sendo assim, os valores para as resistências à compressão uniaxiais médias para os pegmatitos estudados Facheiro e Mina Velha são respectivamente 40,09 Mpa e 32,87 Mpa. Já para rocha encaixante foi encontrado um valor de 58,82 Mpa de resistência à compressão uniaxial, onde este valor será considerado o valor geral que representará a rocha encaixante como um todo, visto que esta foi uma amostra retirada (V1) do único ponto onde uma escavação atingiu o maciço rochoso livre de intemperismo.

5.4.3 Ensaio de Determinação dos Índices Físicos

O ensaio de índices físicos foi executado com a intenção de se calcular as massas específicas tanto da amostra seca quanto da saturada para que se calculasse a tensão de sobrecarga do maciço rochoso em relação à profundidade da escavação, para isso se mediram três massas das amostras:

A = Massa das amostras após 48h na estufa;

B = Massa das amostras saturadas;

C = Massa das amostras submersas em água.

A massa específica da amostra seca ($\rho_{a_{sec}}$) é obtida pela seguinte expressão:

$$\rho_{a_{sec}} = \frac{A}{(B-C)} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \text{Eq. 9}$$

Já a massa específica aparente saturada ($\rho_{a_{sat}}$) calcula-se a partir da seguinte equação:

$$\rho a_{sat} = \frac{B}{(B-C)} (\text{kg/m}^3) \quad \text{Eq. 10}$$

Com a execução do ensaio dos índices físicos, se encontrou os seguintes resultados para as massas específicas das amostras como descrito na tabela 40.

Tabela 40 - Massas específicas das amostras dos pegmatitos Facheiro e Mina Velha e da rocha encaixante.

Facheiro	F1	F2	F3	Média
$\rho a_{sec} \text{ (g)}$	2,49 (t/m ³)	2,59 (t/m ³)	2,51 (t/m ³)	2,53 (t/m ³)
$\rho a_{sat} \text{ (g)}$	2,52 (t/m ³)	2,63 (t/m ³)	2,54 (t/m ³)	2,56 (t/m ³)
Mina Velha	V2	V3	V4	Média
$\rho a_{sec} \text{ (g)}$	2,59 (t/m ³)	2,47 (t/m ³)	2,58 (t/m ³)	2,55 (t/m ³)
$\rho a_{sat} \text{ (g)}$	2,61 (t/m ³)	2,51 (t/m ³)	2,60 (t/m ³)	2,58 (t/m ³)
Encaixante				V1
$\rho a_{sec} \text{ (g)}$				2,85 (t/m ³)
$\rho a_{sat} \text{ (g)}$				2,87 (t/m ³)

5.4.4 Rock Substance Strength (RSS)

Como não se executou estudo para determinação das tensões *in situ* que os maciços rochosos apresentam a determinadas profundidades, levou-se em consideração, neste trabalho, que a tensão de sobrecarga seria a pressão que uma porção de rocha sofre, *in situ*, por conta da profundidade que a mesma se encontra no maciço rochoso e que pode ser obtida pela equação:

$$T_s = \rho gh \quad \text{Eq. 11}$$

Onde:

ρ = Massa específica da rocha (utilizaremos a massa específica da rocha saturada para gerar um cenário mais pessimista);

g = Aceleração da gravidade;

h = Profundidade da escavação.

Assim, calculando as tensões de sobrecarga e consequentemente o RSS para os corpos pegmatíticos e a encaixante obtivemos os seguintes resultados:

- Facheiro

$$T_s = 2,56 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 100 \text{ m} = 2,51 \text{ Mpa}$$

$$RSS = \frac{40,09 \text{ MPa}}{2,56 \text{ MPa}} = 15,66$$

- Mina Velha

$$T_s = 2,65 \frac{t}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 100 \text{ m} = 2,58 \text{ MPa}$$

$$RSS = \frac{32,87 \text{ MPa}}{2,58 \text{ MPa}} = 12,74$$

- Encaixante

$$T_s = 2,87 \frac{t}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 100 \text{ m} = 2,82 \text{ MPa}$$

$$RSS = \frac{58,82 \text{ MPa}}{2,87 \text{ MPa}} = 20,49$$

5.4.5 RMR (Rock Mass Rating)

Utilizando a Tabela foram classificados os maciços rochosos dos corpos pegmatíticos de acordo com a classificação RMR, bem como a encaixante. Tomou-se que a rocha encaixante é comum para todos os pegmatitos, dessa forma foi utilizada a figura 3 para caracterização das juntas do pegmatito Facheiro e a figura 40 do pegmatito Mina Velha. Logo, foram encontrados os seguintes valores do RMR conforme tabelas a seguir.

Tabela 41 - Classificação RMR Facheiro

Descrição	Classe	Ponderação
RMR 1 - Resistência à Compressão Uniaxial		
Resistência à compressão uniaxial (Mpa) 40,09	25 - 50	4
RMR 2 e 3 - RQD e estado das diáclases		
Juntas por metro ³ (Jv) = 20	-	14
RMR 4 - Estado das diáclases		
Persistência (Persistência - m) = 2	Muito alta (1 - 3)	4
Abertura = (0,1 - 0,5)	0,1 - 1	4
Rugosidade	Rugoso	5
Preenchimento	Não há	6
Meteorização	Não afetada	6
RMR 5 - Efeito da presença de água		
Estado	Seco	15
RMR		58

Tabela 42 - RMR Mina Velha

Descrição	Classe	Ponderação
RMR1 - Resistência à compressão uniaxial (Mpa)		
Resistência à compressão uniaxial (Mpa) = 32,87	25 - 50	4
RMR 2 e 3 - RQD e estado das diáclases		
Juntas por metro ³ (Jv) = 14	-	18
RMR 4 - Estado das diáclases		
Resistência (Persistência - m) = 2	Muito alta (1 - 3)	4
Abertura = (0,1 - 0,5)	0,1 - 1	4
Rugosidade	Rugoso	5
Preenchimento	Não há	6
Meteorização	Não afetada	6
RMR 5 – Efeito da presença de água		
Estado	Seco	15
RMR		62

Tabela 43 - RMR Encaixante

Descrição	Classe	Ponderação
RMR1 - Resistência à compressão uniaxial (Mpa)		
Resistência à compressão uniaxial (Mpa) 58,82	50 - 100	7
RMR 2 e 3 - RQD e estado das diáclases		
Juntas por metro ³ (Jv) = 4	-	28
RMR 4 - Estado das diáclases		
Resistência (Persistência - m) = 2	Muito alta (1 - 3)	4
Abertura = (0,1 - 0,5)	0,1 - 1	4
Rugosidade	Rugoso	5
Preenchimento	Não há	6
Meteorização	Não afetada	6
RMR 5 Efeito da água		
Estado	Seco	15
RMR		75

5.5 APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS PARA SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA

Com as características dos depósitos minerais estimadas e descritas no capítulo anterior, se fez possível estimar as melhores alternativas de métodos de lavra a partir das ferramentas desenvolvidas por Nicholas e pela University British Columbia (UBC), esta última a partir de uma modificação da metodologia de Nicholas.

5.5.1 Nicholas

A metodologia proposta por Nicholas (1981) para seleção do método de lavra mais indicado baseada nas características dos corpos pegmatíticos e rocha encaixante foi utilizada neste trabalho e dessa forma foram analisadas as características dos corpos de minérios necessárias para a aplicação de tal método, a partir de dados coletados em campo e estudos bibliográficos.

5.5.1.1 Facheiro

Foram formuladas as tabelas de 41 a 43, com as definições das características geométricas, distribuição de teores e geomecânicas do pegmatito Facheiro e de suas encaixantes (Capa e Lapa).

Tabela 44 - Definição da geometria do corpo e das distribuição de teores para o pegmatito.

1) Formato geral	Tabular
2) Espessura do corpo de minério	83 m
3) Mergulho	60°
4) Profundidade	100 m
5) Distribuição de teores	Errático

Tabela 45 - Características geomecânicas do pegmatito Facheiro.

1) RSS	15,66
2) Frequência de fraturas	RQD = 49%
3) Resistência de fraturas	Moderada

Tabela 46 - Características geomecânicas da rocha encaixante.

1) RSS	20,49
2) Frequência de fraturas	4 ft/m
3) Resistência de fraturas	Moderada

Com as definições das tabelas anteriores, se constituiu os pesos para os métodos de lavra considerados tomando como base as características dos pegmatitos Facheiro (Tabelas 47 e 48) e das encaixantes dos pegmatitos, capa (Tabela 49) e lapa (Tabela 50). As definições de capa e lapa foram baseadas na condição que a rocha encaixante é comum para os dois corpos pegmatíticos estudados (Facheiro e Mina Velha) assim como suas características geomecânicas.

Tabela 47 - Pesos para as características geométricas e distribuição de teores do pegmatito Facheiro para os diferentes métodos de lavra.

	Formato geral	Espessura do corpo	Mergulho do corpo	Distribuição de teores
Método de Lavra	T	E	FM	E
A céu aberto	2	4	4	3
Abatimento por blocos	2	2	4	0
Realces em subníveis	2	4	4	1
Abatimento em subníveis	4	4	4	0
Paredes longas	4	-49	-49	0
Câmaras e pilares	4	-49	0	3
Recalque	2	4	4	1
Corte e enchimento	4	0	4	3
Corte das fatias superiores	3	3	2	0
Alargamento com estruturas retangulares	2	1	3	3

Tabela 48 - Pesos para as características geomecânicas do pegmatito Facheiro para os diferentes métodos de lavra.

Método de Lavra	RSS	Frequência de fraturas	Resistência de fraturas
	F	A	M
A céu aberto	4	4	3
Abatimento por blocos	1	3	2
Realces em subníveis	4	1	2
Abatimento em subníveis	1	3	2
Paredes longas	0	3	2
Câmaras e pilares	4	2	2
Recalque	1	3	2
Corte e enchimento	2	2	3
Corte das fatias superiores	1	3	2
Alargamento com estruturas retangulares	2	2	3

Tabela 49 - Pesos para as características geomecânicas da capa do pegmatito Facheiro para os diferentes métodos de lavra.

Método de lavra	RSS	Frequência de fraturas	Resistência de fraturas
	Fo	A	M
A céu aberto	5,32	2,4	2,4
Abatimento por blocos	1,33	1,8	1,6
Realces em subníveis	5,32	0,6	1,6
Abatimento em subníveis	1,33	1,8	1,6
Paredes longas	0	1,8	1,6
Câmaras e pilares	5,32	1,2	1,6
Recalque	1,33	1,8	1,6
Corte e enchimento	2,66	1,2	2,4
Corte das fatias superiores	1,33	1,8	1,6
Alargamento com estruturas retangulares	2,66	1,2	2,4

Tabela 50 - Pesos para as características geomecânicas da lapa do pegmatito Facheiro para os diferentes métodos de lavra.

Método de lavra	RSS	Frequência de fraturas	Resistência de fraturas
	Fo	A	M
A céu aberto	5,32	1,52	1,5
Abatimento por blocos	3,99	1,14	1,5
Realces em subníveis	5,32	0,76	0,5
Abatimento em subníveis	5,32	1,14	1
Paredes longas	3,99	1,52	1,5
Câmaras e pilares	5,32	1,14	1,5
Recalque	3,99	1,14	1
Corte e enchimento	2,66	0,76	2
Corte das fatias superiores	3,99	1,14	1
Alargamento com estruturas retangulares	2,66	0,76	2

Dessa forma, se somou os pesos obtidos nas tabelas anteriores e assim se constituiu o ranking para os métodos de lavra mais indicados para o corpo pegmatítico Facheiro, determinado a partir das características geométricas, distribuição de teores, características geomecânicas dos corpos de minério e encaixantes (Tabela 51).

Tabela 51 - Ranking dos métodos de lavra mais indicados para o pegmatito Facheiro, de acordo com o Método de Nicholas.

Facheiro	
Método de Lavra	Soma
A céu aberto	43,78
Realces em subníveis	31,17
Abatimento em subníveis	30,18
Recalque	29,43
Abatimento com estruturas retangulares	28,51
Corte e enchimento	27,84
Abatimento em blocos	25,94
Corte de fatias superiores	24,35
Câmaras e pilares	-19,1
Paredes longas	-133,59

5.5.1.2 Mina Velha

Assim como foi procedido para a determinação dos métodos de lavra mais promissores para o pegmatito Facheiro, fora procedido para o pegmatito Mina Velha. Desta forma se formulou as tabelas de 52 a 54, com as definições das características geométricas, distribuição de teores e geomecânicas deste corpo pegmatítico e de suas encaixantes (Capa e Lapa).

Tabela 52 - Definição das geometria e distribuição de teores do pegmatito Mina Velha

1) Formato geral	Irregular
2) Espessura do corpo de minério	149 m
3) Mergulho	73°
4) Profundidade	100 m
5) Distribuição de teores	Errático

Tabela 53 - Características geomecânicas do pegmatito Mina Velha.

1) RSS	12,74
2) Frequência de fraturas	RQD = 68,8%
3) Resistência de fraturas	Moderada

Tabela 54 - Características geomecânicas da rocha encaixante.

1) RSS	20,49
2) Frequência de fraturas	4 ft/m
3) Resistência de fraturas	Moderada

Com as características supracitadas, se obtiveram as tabelas 55, 56, 57 e 58 a seguir com os pesos para os métodos de lavra considerados.

Tabela 55 - Pesos para as características geométricas e distribuição de teores do pegmatito Mina Velha para os diferentes métodos de lavra.

Métodos de lavra	Formato Geral I	Espessura MEp	Mergulho FM	Distribuição de teores E
A céu aberto	3	4	4	3
Abatimento por blocos	0	4	4	0
Realces em subníveis	1	3	4	1
Abatimento em subníveis	1	4	4	0
Paredes longas	-49	-49	-49	0
Câmaras e pilares	2	-49	0	3
Recalque	1	3	4	1
Corte e enchimento	2	0	4	3
Corte das fatias superiores	0	4	2	0
Alargamento com estruturas retangulares	4	1	3	3

Tabela 56 - Pesos para as características geomecânicas do pegmatito Mina Velha para os diferentes métodos de lavra.

Método de lavra	RSS	Frequência de fraturas	Resistência de fraturas
	Fo	A	M
A céu aberto	5,32	3	3
Abatimento por blocos	1,33	2,25	3
Realces em subníveis	3,99	0,75	2
Abatimento em subníveis	3,99	3	2
Paredes longas	1,33	0	3
Câmaras e pilares	3,99	1,5	2
Recalque	3,99	2,25	2
Corte e enchimento	2,66	1,5	3
Corte das fatias superiores	3,99	1,5	2
Alargamento com estruturas retangulares	1,33	1,5	3

Tabela 57 - Pesos para as características geomecânicas da capa do pegmatito Mina Velha para os diferentes métodos de lavra.

Método de lavra	RSS	Frequência de fraturas	Resistência de fraturas
	Fo	A	M
A céu aberto	5,32	2,4	2,4
Abatimento por blocos	1,33	1,8	1,6
Realces em subníveis	5,32	0,6	1,6
Abatimento em subníveis	1,33	1,8	1,6
Paredes longas	0	1,8	1,6
Câmaras e pilares	5,32	1,2	1,6
Recalque	1,33	1,8	1,6
Corte e enchimento	2,66	1,2	2,4
Corte das fatias superiores	1,33	1,8	1,6
Alargamento com estruturas retangulares	2,66	1,2	2,4

Tabela 58 - Pesos para as características geomecânicas da lapa do pegmatito Mina Velha para os diferentes métodos de lavra.

Método de lavra	RSS	Frequência de fraturas	Resistência de fraturas
	Fo	A	M
A céu aberto	5,32	1,52	1,5
Abatimento por blocos	3,99	1,14	1,5
Realces em subníveis	5,32	0,76	0,5
Abatimento em subníveis	5,32	1,14	1
Paredes longas	3,99	1,52	1,5
Câmaras e pilares	5,32	1,14	1,5
Recalque	3,99	1,14	1
Corte e enchimento	2,66	0,76	2
Corte das fatias superiores	3,99	1,14	1
Alargamento com estruturas retangulares	2,66	0,76	2

Com os pesos definidos na etapa anterior, construiu-se um ranking com o somatório destes, sendo assim definidos os métodos de lavra mais indicados para o pegmatito Mina Velha (Tabela 59).

Tabela 59 - Ranking dos métodos de lavra mais indicados para o pegmatito Mina Velha, de acordo com o Método de Nicholas.

Mina Velha	
Método de Lavra	Soma
A céu aberto	43,78
Abatimento em subníveis	30,18
Realces em subníveis	29,84
Alargamento com estruturas retangulares	28,51
Recalque	28,1
Corte e enchimento	27,84
Abatimento em blocos	25,94
Corte de fatias superiores	24,35
Câmaras e pilares	-20,43
Paredes longas	-132,26

5.5.2 Nicholas modificado (UBC)

O método de seleção de lavra de Nicholas modificado pela University British Columbia também foi utilizado para selecionar o método de lavra mais indicado para os corpos pegmatíticos em estudo, onde foram definidas as características geométricas, distribuição de teores e geomecânicas dos corpos de minério Facheiro e Mina Velha a partir de dados coletados em campo e em pesquisas bibliográficas.

5.5.2.1 Pegmatito Facheiro

Foram construídas as tabelas 60 e 61 com as características supracitadas para o pegmatito Facheiro e suas encaixantes (Capa e Lapa), necessárias para a aplicação desta metodologia de seleção de método de lavra.

Tabela 60 - Características geométricas, distribuição de teores e propriedades geomecânicas do pegmatito Facheiro para diferentes métodos de lavra.

1) Formato geral	Tabular
2) Espessura	83 m - Espesso
3) Mergulho	60° - Forte Mergulho
4) Profundidade	100 m – Pouco Profundo
5) Distribuição de teores	Errática
6) RMR:	58 - Moderado
7) RSS:	15,66 - Forte

Tabela 61 - Propriedades geomecânicas da rocha encaixante do pegmatito Facheiro (Capa e Lapa).

6) RMR	72 - Competente
7) RSS:	20,49 - Forte

A partir das características supracitadas dos maciços rochosos do corpo pegmatítico Facheiro e rocha encaixante estudados, se construíram as tabelas 62 a 64 com os pesos dessas características relacionadas aos métodos de lavras tomados em consideração.

Tabela 62 - Pesos para geometria e distribuição de teores do pegmatito Facheiro para diferentes métodos de lavra.

Mining method	Formato geral	Espessura	Mergulho	Distribuição de teores	Profundidade
	T	Ep	FM	E	PP
A céu aberto	2	4	1	2	4
Abatimento em blocos	2	3	4	2	2
Realces em subníveis	4	4	4	3	3
Abatimento em subníveis	4	4	4	2	3
Paredes longas	4	-49	-49	0	2
Câmaras e pilares	4	-49	-49	0	3
Recalque	4	-49	4	2	3
Corte e enchimento	4	1	4	4	2
Corte de fatias superiores	2	2	0	1	2
Alargamento com estruturas retangulares	1	0	2	3	1

Tabela 63 - Pesos para a classificação do maciço rochoso RMR (*Rock Mass Rating*) do corpo de minério Facheiro e encaixante para diferentes métodos de lavra.

Método de lavra	Corpo de Minério	Capa	Lapa
	M	C	C
A céu aberto	3	4	4
Abatimento em blocos	2	2	2
Realces em subníveis	4	4	3
Abatimento em subníveis	3	2	3
Paredes longas	4	3	-
Câmaras e pilares	3	5	-
Recalque	3	4	3
Corte e enchimento	2	3	2
Corte de fatias superiores	1	3	2
Alargamento com estruturas retangulares	1	0	0

Tabela 64 - Pesos para o RSS (*Rock Substance Strength*) do corpo pegmatítico Facheiro e encaixante para diferentes métodos de lavra.

Método de lavra	Corpo de minério	Capa	Lapa
	Fo	Fo	Fo
A céu aberto	3	4	4
Abatimento em blocos	0	0	1
Realces em subníveis	4	5	3
Abatimento em subníveis	2	1	2
Paredes longas	1	2	-
Câmaras e pilares	6	6	-
Recalque	4	4	3
Corte e enchimento	3	2	2
Corte de fatias superiores	0	2	1
Alargamento com estruturas retangulares	0	0	0

Com os pesos mencionados nas tabelas acima, se construiu um ranking com os métodos de lavra mais indicados para o pegmatito Facheiro (Tabela 65).

Tabela 65 - Rankings dos métodos de lavra mais indicados para o pegmatito Facheiro, de acordo com o Método de Nicholas Modificado.

Facheiro	
Método de Lavra	Soma
Realces em subníveis	41
A céu aberto	35
Abatimento em subníveis	30
Corte e enchimento	29
Abatimento em blocos	20
Corte das fatias superiores	16
Alargamento com estruturas retangulares	8
Recalque	-15
Câmaras e pilares	-71
Paredes longas	-82

5.5.2.2 Mina Velha

Da mesma forma que fora procedido para o pegmatito Facheiro, se construiu as tabelas 66 e 67 com as características geométricas, distribuição de teores e geomecânicas para o

pegmatito Mina velha e suas encaixantes (Capa e Lapa), as quais são requeridas para a aplicação desta metodologia de seleção de método de lavra.

Tabela 66 - Características geométricas, distribuição de teores e propriedades geomecânicas do corpo pegmatítico Mina Velha para diferentes métodos de lavra.

1) Formato geral	Irregular
2) Espessura	149 m – Muito Espesso
3) Mergulho	72° - Forte Mergulho
4) Profundidade	100 m – Pouco Profundo
5) Distribuição de teores	Errática
6) RMR:	62 - Competente
7) RSS:	12,74 - Moderado

Tabela 67 - Propriedades geomecânicas da rocha encaixante do pegmatito Mina Velha(Capa e Lapa).

6) RMR	72 - Competente
7) RSS:	20,49 - Forte

A partir do conhecimento das características citadas acima, foram construídas as tabelas 68, 69 e 70 com os pesos referentes aos métodos de lavra em relação a estas características.

Tabela 68 - Pesos para geometria e distribuição de teores do pegmatito Mina Velha para diferentes métodos de lavra.

Métodos de lavra	Formato geral	Espessura	Mergulho	Distribuição de teores	Profundidade
	I	MEp	FM	E	PP
A céu aberto	3	4	1	2	4
Abatimento em blocos	0	4	4	2	2
Realces em subníveis	1	3	4	3	3
Abatimento em subníveis	1	4	4	2	3
Paredes longas	-49	-49	-49	0	2
Câmaras e pilares	2	-49	-49	0	3
Recalque	2	-49	4	2	3
Corte e enchimento	4	0	4	4	2
Corte de fatias superiores	0	1	0	1	2
Alargamento com estruturas retangulares	4	0	2	3	1

Tabela 69 - Pesos para a classificação do maciço rochoso RMR (*Rock Mass Rating*) do corpo de minério Mina Velha e rocha Encaixante para diferentes métodos de lavra.

Método de lavra	Corpo de minério	Capa	lapa
	C	C	C
A céu aberto	3	4	4
Abatimento em blocos	0	2	2
Realces em subníveis	4	4	3
Abatimento em subníveis	1	2	3
Paredes longas	2	3	-
Câmaras e pilares	5	5	-
Recalque	3	4	3
Corte e enchimento	3	3	2
Corte de fatias superiores	1	3	2
Alargamento com estruturas retangulares	0	0	0

Tabela 70 - Pesos para o RSS (*Rock Substance Strength*) do corpo pegmatítico Mina Velha e Encaixante para diferentes métodos de lavra.

Métodos de lavra	Corpo de minério	Capa	Lapa
	M	Fo	Fo
A céu aberto	3	4	4
Abatimento em blocos	1	0	1
Realces em subníveis	4	5	3
Abatimento em subníveis	3	1	2
Paredes longas	2	2	-
Câmaras e pilares	3	6	-
Recalque	3	4	3
Corte e enchimento	3	2	2
Corte de fatias superiores	1	2	1
Alargamento com estruturas retangulares	1	0	0

Com os pesos definidos na etapa anterior, se construiu o ranking dos métodos de lavra mais indicados para o pegmatito Facheiro (Tabela 71).

Tabela 71 - Ranking dos métodos de lavra mais indicados para o pegmatito Mina Velha, de acordo com o Método de Nicholas Modificado.

Mina Velha	
Método de Lavra	Soma
Realces em subníveis	37
A céu aberto	36
Corte e enchimento	29
Abatimento em subníveis	26
Abatimento em blocos	18
Corte das fatias superiores	14
Alargamento com estruturas retangulares	11
Recalque	-18
Câmaras e pilares	-74
Paredes longas	-136

5.6 DISCUSSÕES

Viu-se então que os três melhores métodos de lavra para os corpos pegmatíticos, de acordo com a ferramenta desenvolvida por Nicholas, foram:

Pegmatito Facheiro

- 1 – A céu aberto
- 2 – Abatimento em subníveis
- 3 – Realces em subníveis

Pegmatito Mina Velha

- 1 – A céu aberto
- 2 – Realces em subníveis
- 3 – Abatimento em subníveis

Já de acordo com o método de seleção de método de lavra desenvolvido pela UBC (Nicholas modificado) se teve como resultado os seguintes métodos:

Pegmatito Facheiro

- 1 – Realces em subníveis
- 2 – A céu aberto
- 3 – Abatimento em subníveis

Pegmatito Mina Velha

- 1 – Realces em subníveis
- 2 – A céu aberto
- 3 – Corte e enchimento

Estas duas ferramentas utilizadas aqui neste trabalho baseiam-se somente nos fatores técnicos e operacionais para seleção do método de lavra mais viável, entretanto, deve-se buscar também o método mais rentável economicamente, e a partir desse resultado se afirmar com maior precisão o método de lavra mais indicado. Outros fatores devem ser levados em consideração para a seleção do método de lavra, como por exemplo a segurança e saúde dos trabalhadores na execução das operações produtivas da lavra e a sustentabilidade ambiental, que é fator importante em todo o projeto da mineração.

Sabendo que os pegmatitos Facheiro e Mina Velha afloram, é viável ressaltar que seria mais conveniente se iniciar a lavra por método a céu aberto, visto que o capeamento tem espessura de alguns poucos metros, o que adiantaria o retorno financeiro da atividade, assim como resultaria em produções maiores, custos relativamente menores e métodos de perfuração para desmonte a seco, pois viu-se que a água é escassa na região dessas ocorrências.

O método a céu aberto que pode ser aplicado aos pegmatitos Facheiro e Mina Velha é o de Bancadas, pelas características geométricas e geomecânicas destes corpos e pelo valor e utilidade do minério, viu-se na tabela 2 que este método possui grande produtividade, baixos custos de operação, requer pouco desenvolvimento, principalmente pela pequena espessura do capeamento destes pegmatitos, possui também alta estabilidade das escavações e boa segurança, porém tem como pontos negativos o alto risco de impacto ambiental e a intensa disposição de estéril. Contudo, foi retratado em capítulo anterior que mesmo com o aumento nos custos de reabilitação ambiental, os métodos de lavra a céu aberto ainda apresentam menores custos de lavra, fazendo deste um dos mais promissores.

A partir da tabela abaixo vê-se as características operacionais dos métodos de lavra subterrâneos que foram selecionados também como interessantes para o pegmatito Facheiro (Abatimento em subníveis e realce em subníveis) e para o pegmatito Mina Velha (Realces em subníveis, abatimento em subníveis e corte e enchimento).

Tabela 72 - Comparativo entre os métodos de lavra subterrâneos promissores para os pegmatitos estudados

Método	Realces em subníveis	Corte e enchimento	Abatimento em subníveis
Custo relativo (%)	30	60	15
Taxa de produção	Alta	Moderada	Alta
Produtividade (t/homem/turno)	Alta (15-30)	Moderada (10-20)	Alta (20-50)
Custos operacionais típicos (US\$/t)	7-35	20-70	10-30
Recuperação	70-80	90-100	90-100
Diluição	Moderada	Baixa	Moderada
Emissão de poeira (kg/t)	0,1-0,3	0,2-0,6	0,3-0,4
Desenvolvimento requerido	Moderado, lento e caro	Moderado, lento e caro	Amplo, lento e caro
Investimento de capital	Moderado a alto	Moderado	Moderado a alto
Flexibilidade	Inflexível	Moderada	Inflexível
Seletividade	Não seletivo	Seletivo	Não seletivo
Estabilidade das aberturas	Alta	Alta	Moderada
Subsidência	Pouca	Pouca	Muita
Segurança	Boa	Moderada	Boa
Outras características relevantes	Muito popular e moderno	Usa enchimento	Abatimento deve ser controlado

Fonte: Curi, 2017.

Com a ajuda da tabela anterior pode-se buscar o método de lavra que mais corrobore com o sucesso do empreendimento mineiro, tendo em vista os objetivos de longo prazo do mesmo. Porém a situação ideal seria se elaborar projetos envolvendo os métodos de lavra mais pontuados pelos dois métodos utilizados neste trabalho e com isso se afirmar com maior precisão e riqueza de detalhes aquele mais promissor.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Como resultado, foi estabelecido por este trabalho que os três métodos de lavra para os pegmatitos estudados, com base na metodologia de Nicholas, foram:

Pegmatito Facheiro

- 1 – A céu aberto
- 2 – Abatimento em subníveis
- 3 – Realces em subníveis

Pegmatito Mina Velha

- 1 – A céu aberto
- 2 – Realces em subníveis
- 3 – Abatimento em subníveis

Já de acordo com o método de seleção de método de lavra desenvolvido pela UBC (Nicholas modificado) se teve como resultado os seguintes métodos:

Pegmatito Facheiro

- 1 – Realces em subníveis
- 2 – A céu aberto
- 3 – Abatimento em subníveis

Pegmatito Mina Velha

- 1 – Realces em subníveis
- 2 – A céu aberto
- 3 – Corte e enchimento

Deve-se estudar projetos de lavra para os corpos pegmatíticos em questão tomando como base principalmente os três métodos de lavra indicados pelas metodologias de Nicholas e de Nicholas modificado para cada corpo, e a partir destes se afirmar com maior precisão o melhor método de lavra para cada um dos pegmatitos estudados, tomando aquele método mais ajustado técnica e economicamente, porém, que forneça um ambiente mais saudável e seguro para os trabalhadores, sempre buscando a sustentabilidade ambiental.

Interessante seria a coleta de mais dados geológicos e geotécnicos para uma melhor interpretação do maciço rochoso, principalmente sondagens, e que são cruciais para um melhor entendimento da geologia dos depósitos minerais, na busca de uma maior assertividade na seleção do método de lavra.

REFERÊNCIAS

ABAD, J. CELADA, B. CHACON, E. GUTIERREZ, V. HIDALGO, E.. Application of Geomechanical Classification to Predict the Convergence of Coal Mine Galleries and, to Design Their Supports. In: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. Congress. 5., Melbourne. Australian. Geomechanical Society. 1983. p. 15-19.

ÁVILA, C. R. **Determinação das propriedades mecânicas de maciços rochosos e/ou descontinuidades utilizando classificações geomecânicas – uma comparação entre os diversos métodos de classificação.** 233. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais. 2012.

ALMEIDA, F.F.M.; BRITO NEVES, B.B. de; FUCK, R.A. Províncias estruturais brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8, 1977, Campina Grande. Atas. Campina Grande, SBG, 1977. p. 363-391.

ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO: Principais Substâncias metálicas. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. 2016.

BARTON, N., LIEN, R., LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of rock support. Rock Mechanics 6, 1974, p. 189-236.

BARTON, N. The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. In: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering Congress, 8., 1995, Tokyo, Balkema, Rotterdam. Keynote Lecture, 3. 1995. p.1023-1032.

BELTRÃO, B. A. MORAIS, F. MASCARENHAS, J. C. MIRANDA, J. L. F. JUNIOR, L. C. S. MENDES, V. A. Diagnóstico do município de Tenório. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Paraíba. CPRM. 2005.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. *The Civil Engineer*, South Africa, 1973, p. 335-344.

BIENIAWSKI, Z.T. ORR, C.M. (1976): Rapid Site Appraisal for Dam Foundations by the Geomechanics Classification. In: ICOLD CONGRESS ON LARGE DAMS, 12., Mexico City, ICOLD , pp. 483-501.

BIENIAWSKI, Z. T. Estimating the Strength of Rock Materials. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1974, p. 312-320.

BIENIAWSKI, Z. T. 1989. Engineering rock mass classifications. 1. Ed. Wiley Interscience, 1989. p. 249.

BRAGA, P. F. A. FRANÇA, F. C. A. DOS SANTOS, R. L. C. Panorama da indústria de Lítio no Brasil. In: SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIAIS DO NORDESTE. 2., 2010, Campina Grande. Anais do II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste, Campina Grande (PB), CETEM/UFPE, 2010. p. 237-247.

BRAGA, P. F. A. SAMPAIO, J. A. Capítulo 26: Lítio. In: DA LUZ, A. B. LINS, F. A. F. (Org.). *Rochas e Minerais Industriais: Usos e especificações*. Rio de Janeiro. CETEM. 2008. p. 585-603.

CAVALCANTE, R. et al. Metalogenia das províncias minerais do Brasil: área seridó leste, extremo nordeste da província borborema (RN-PB). Estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba. Gestão Programa Geologia do Brasil. CPRM. 2016. p 105.

CONDE, R. P. YAMAMOTO, J. K. Avaliação de reservas por métodos convencionais: um estudo de caso na Mina de Canoas 2 (PR). Bol. IG-USP, Sér. Cient., 26. 1995. p. 13-26.

CURI. A. Lavra de minas. São Paulo, SP. Oficina de Textos, 2017. p. 774.

CURI. A. Minas a céu aberto: planejamento de lavra. São Paulo, SP. Oficina de Textos, 2011. p. 223.

DA LUZ, A.B. LINS, F. A. F. PIQUET, B. COSTA, M. J. COELHO, J. M. Pegmatitos do Nordeste: diagnóstico sobre o aproveitamento racional e integrado. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2003. p 97.

DA SILVA, M.R.R. HOLL, R. BEURLIN. H. Borborema Pegmatitic Province: geological and geochemical characteristics. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 8, 1995, p 355-364.

DEERE, D.U., DEERE, D.W. The rock quality designation (RQD) index in practice. In Rock classification systems for engineering purposes. In: Kirkaldie L (Ed). ASTM Special. 1988. p 91-101.

DEERE, D.U., HENDRON, A.J., PATTON, F.D., CORDING, E.J. Design of surface and near surface construction in rock. In: FAIRHURST, C. (Ed) *Failure and breakage of rock, proc. 8th. U.S. symp. Rock mech.*, New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs. 1967. p. 237-302.

FREITAS, S. B. N. **Caracterização Geomecânica e Classificações RMR (Bieniavski) e SMR (Romana) de Maciços Rochosos em Taludes do Funchal.** p. 123. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade da Madeira. Funchal, Portugal. 2011.

GELVEZ, J. I. R. **Selección de métodos extractivos y su impacto en la productividad minera – estudio de caso en la minería de carbón colombiana.** p. 167. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Faculdade de engenharia, Departamento de Engenharia Industrial. Universidade Nacional da Colômbia. Bogotá. Colômbia. 2012.

GOMES, V.L.L. **Perfil do migrante rural na periferia da cidade de Tenório-PB.** 2014. p. 60. Monografia de Conclusão de Curso de Licenciatura Plena em Geografia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. 2014.

HARTMAN, H.L. MUTMANSKY, J.M. Introductory mining engineering: Stages of mining: development and exploitation. 2. ed. John Wiley and Sons. 2002. p. 96-118.

HUSTRULID, W. A. BULLOCK R. L. Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2001, p. 718.

JOAQUIM, L. G. JÚNIOR, R. F. P. Sumário Mineral. Feldspato. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Vol. 35. p64-65 . 2015.

JOHNSTON Jr., W.D. Beryl-tantalite pegmatites of Northeastern Brazil. Geological Society of América Bulletin, v.56 ,p.1015-1070, 1945.

JÚNIOR, R. F. P. Nióbio. Departamento de Produção Mineral – DNPM. p 129-147. 2009.

JÚNIOR, R. F. P. SUMÁRIO MINERAL. NIÓBIO. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Vol. 35. p 88-89. 2015.

LAUBSCHER, D. H. Cave Mining – The state of the art. In: HUSTRULID, W. A. BULLOCK R. L. (Eds). Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2001, p. 455–463.

LIMA, T. M. SUMÁRIO MINERAL. MICA. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Vol. 35. p. 84-85 . 2015.

LIRA, B. B. RODRIGUES, G. FILHO, L. L. C. MADEIRA, V. S. COMBOIM, J. E. L. Estudos dos pegmatitos da província da Borborema - Paraíba: Minerais e minérios de interesse tecnológico. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. São Paulo, SP. Vol.13, n. 1. p. 113-119. 2016.

MACÊDO. A.J.B. BAZANTE. A.J., BONATES. E. J. L. Seleção do método de lavra: Arte e ciência. *Revista Escola de Minas – REM*. Ouro Preto, MG. Vol. 54. nº3. P. 221-225. 2001.

MILLER-TAIT, L., PAKALNIS R., POULIN R., UBC mining method selection, Mine Planning and Equipment Selection. 1995. p. 163-168.

MUTMANSKY, J.M. et al. SME MINING ENGINEERING HANDBOOK: Cost Comparisons. 2 ed. Society for Mining Engineering. Metallurgy and Exploration, 1992. p. 2070–2089.

NICHOLAS, D.E. Selection Procedure, SME Mining Engineering Handbook, second edition, Society for Mining Engineering, Metallurgy and Exploration, Inc., 1992, p. 2090–2106.

PALMSTROM, A. The volumetric joint count – a usefull and simple measure of the degree of rock mass jointing. In: IV Congress International Association of Engineering Geology. New Delhi. 1982. p. 221-228.

PONTES, E. P. SUMÁRIO MINERAL. TÂNTALO. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Vol. 35. p 106-107. 2015.

RAMOS, L. J. Balanço Mineral Brasileiro: Felspato. Departamento Nacional de Produção Mineral. 2001.

ROCHA, G. A. SUMÁRIO MINERAL. QUARTZO. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Vol. 35. p 98-99. 2015.

RODRIGUES, A. F. S. Tântalo. Departamento de Produção Mineral – DNPM. p. 493-515. 2009.

ROMANA, M. New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes. In: Proc. Int. Symp. Rock Mech. Excav. Min. Civ. Works, ISRM, Mexico City, 1985. p. 59-68.

SANTOS E. J. Belém de São Francisco, Folha SC.24-X-A: Estados de Pernambuco, Alagoas e Bahia. Brasília: CPRM, 1999. 1 CD-ROM, Escala 1:250.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB.

SANTOS, E. J. FERREIRA, C. A., SILVA JÚNIOR, J. M. F. Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba. Escala 1:500.000: Texto explicativo dos mapas geológico e de recursos minerais do Estado da Paraíba. Recife: CPRM, 2002. 142 p. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB. Subprograma Mapas Estaduais.

SANTOS, Edilton José dos. Ensaio preliminar sobre terrenos e tectônica acrescionária na Província Borborema. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, 1-6 set. 1996, Salvador-Bahia. Anais. Salvador: SBG. Núcleo Nordeste, 1996. 7v. v.6 p.47-50.

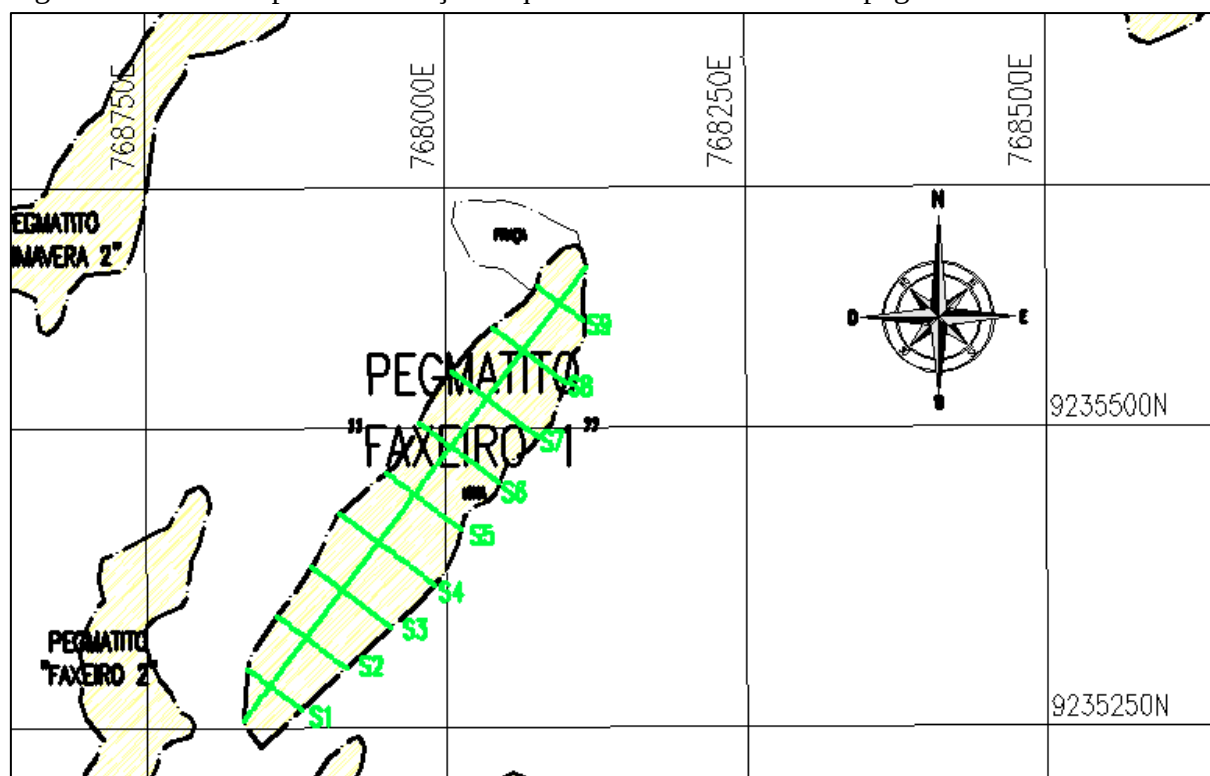
SOARES, D. R. Contribuição à petrologia de pegmatitos mineralizados em elementos raros e elbaítas gemológicas da província pegmatítica da Borborema, nordeste do Brasil. p. 286. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco. 2004.

SOARES, D. R. GONZAGA, F. A. S. FERREIRA, A. C. M. CAITANO, H. K. C. FARAIS, A. B. SOUSA, D. B. Aspectos técnicos da lavra do pegmatito “alto” feio, pedra lavrada, Paraíba. *Holos*. Ano 32. Vol. 1. p. 404-412. 2016.

WICKHAM, G. E., TIEDEMANN, H.R. SKINNER, E.H. Support determination based on geologic predictions. In: Rapid Excavation and Tunneling Conference, 1972, Chicago. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs. 1972. p. 43-64.

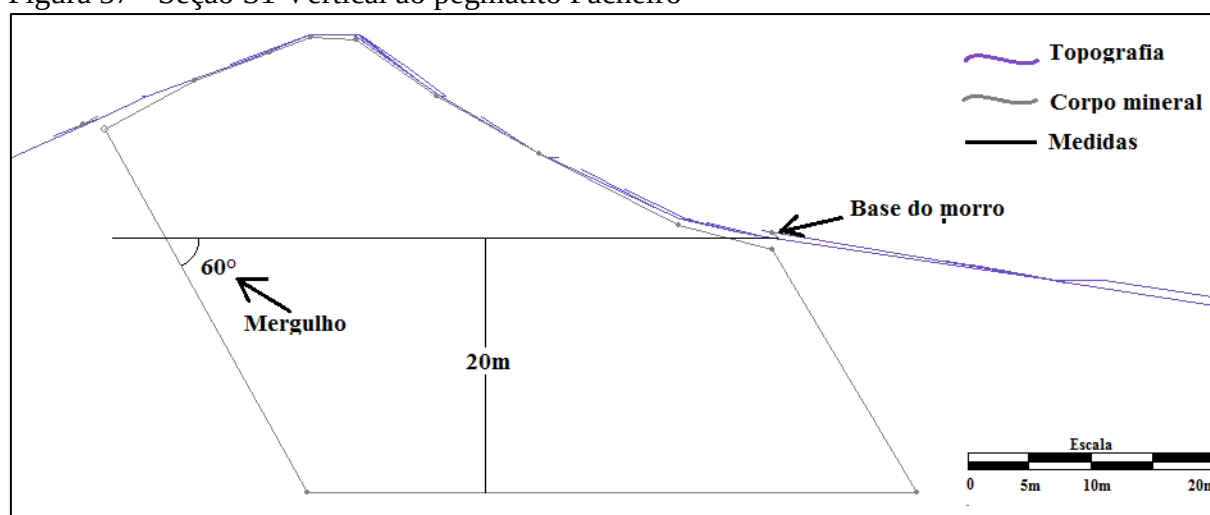
APÊNDICE A - SEÇÕES VERTICAIS EQUIDISTANTES EM 50 METROS DO PEGMATITO FACHEIRO

Figura 56 - Vista de planta das seções equidistantes executadas no pegmatito Facheiro.



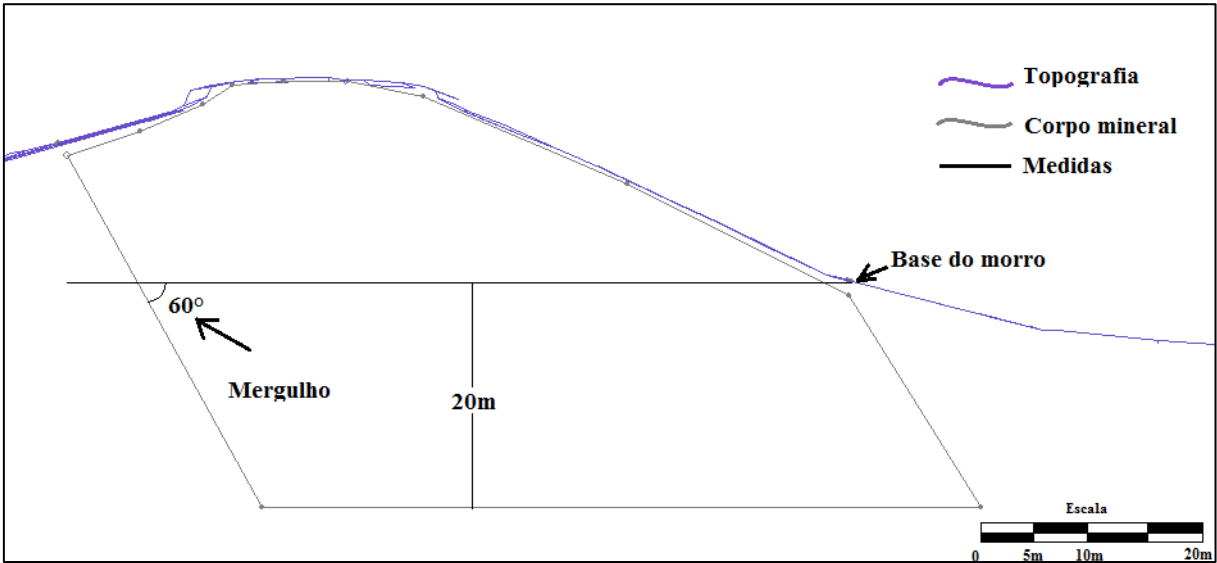
Fonte: Imagem obtida através do software AutoCAD.

Figura 57 - Seção S1 Vertical ao pegmatito Facheiro



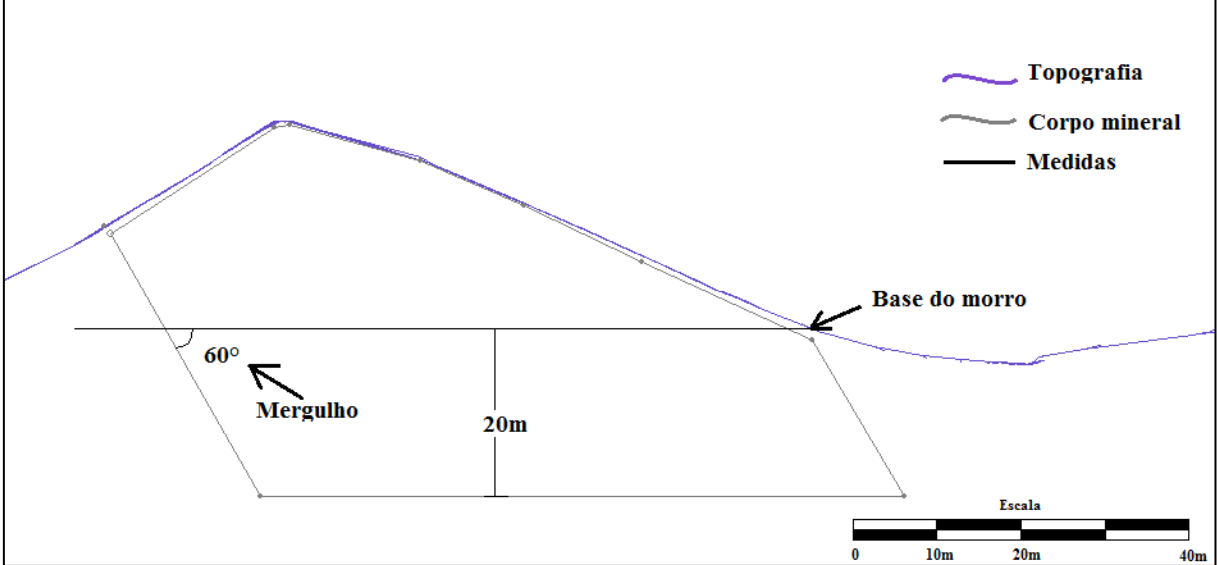
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 58 - Seção S2 Vertical ao Pegmatito Facheiro



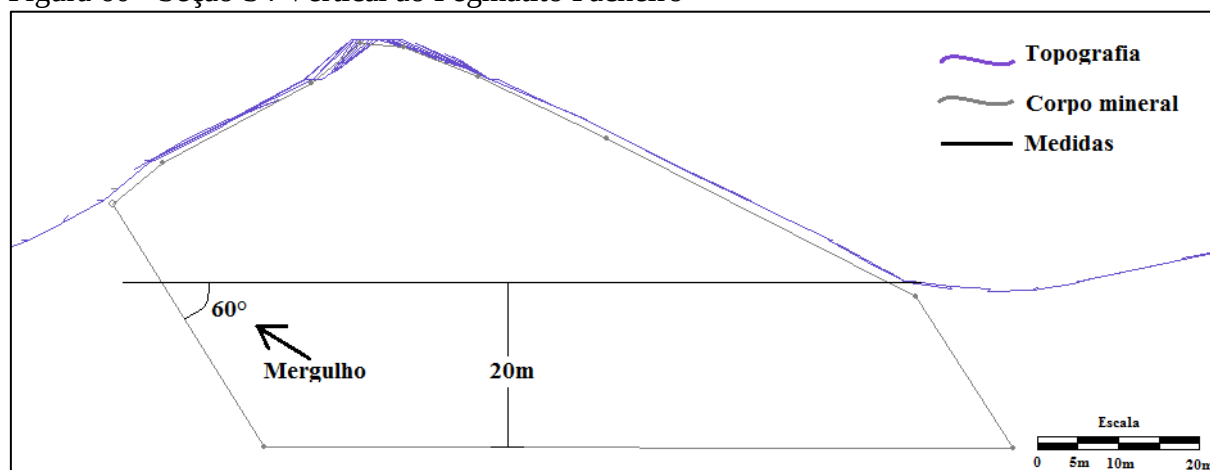
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 59 - Seção S3 Vertical ao Pegmatito Facheiro



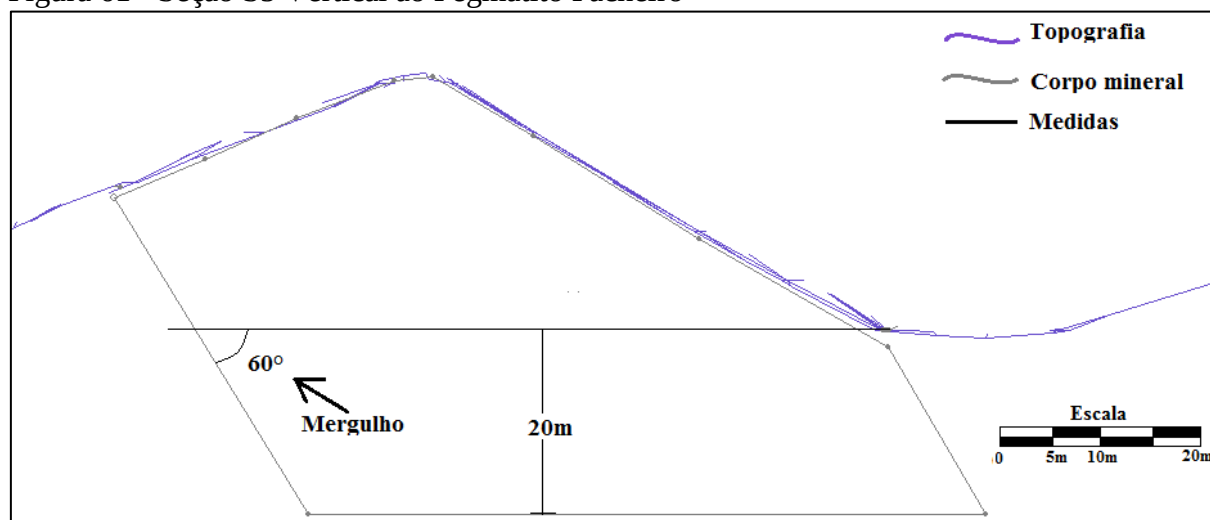
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 60 - Seção S4 Vertical ao Pegmatito Facheiro



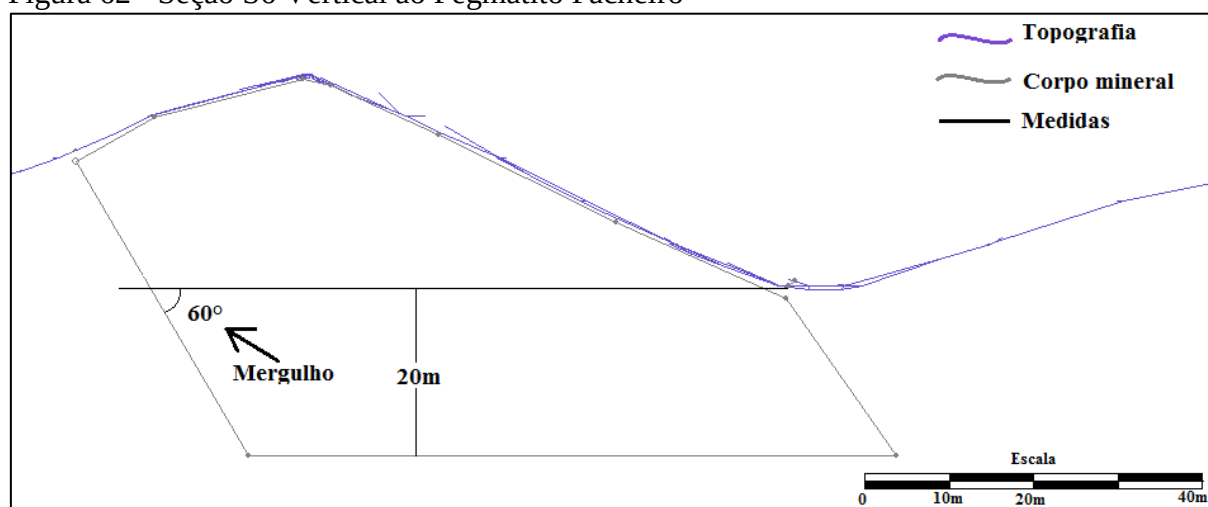
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 61 - Seção S5 Vertical ao Pegmatito Facheiro



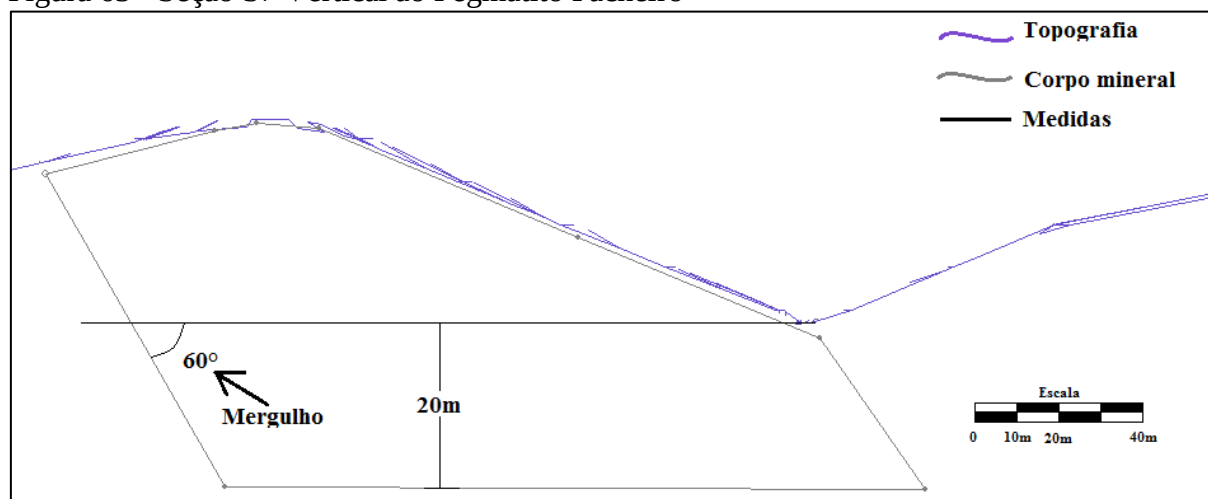
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 62 - Seção S6 Vertical ao Pegmatito Facheiro



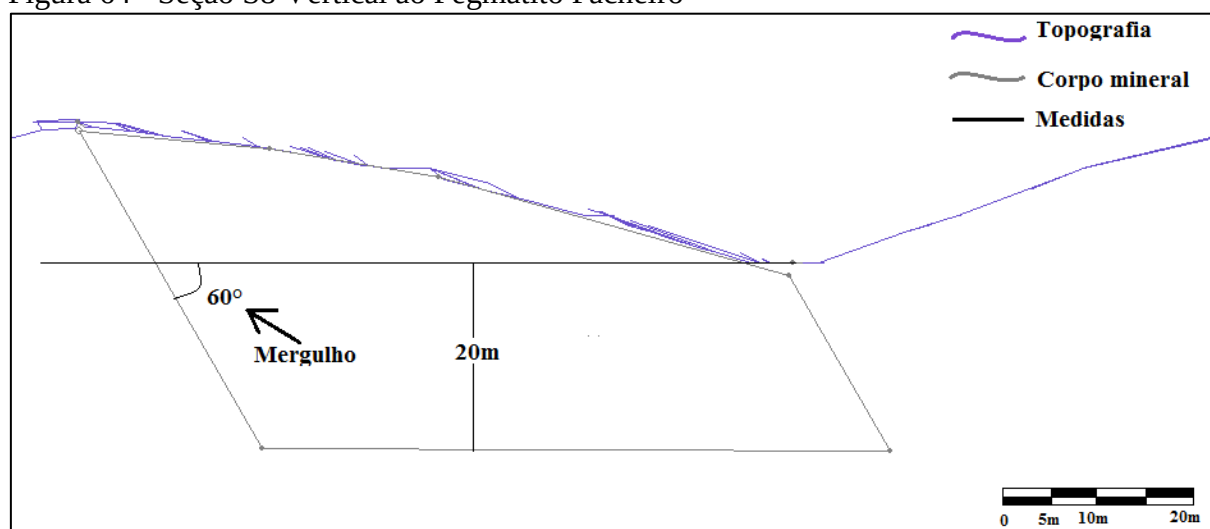
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 63 - Seção S7 Vertical ao Pegmatito Facheiro



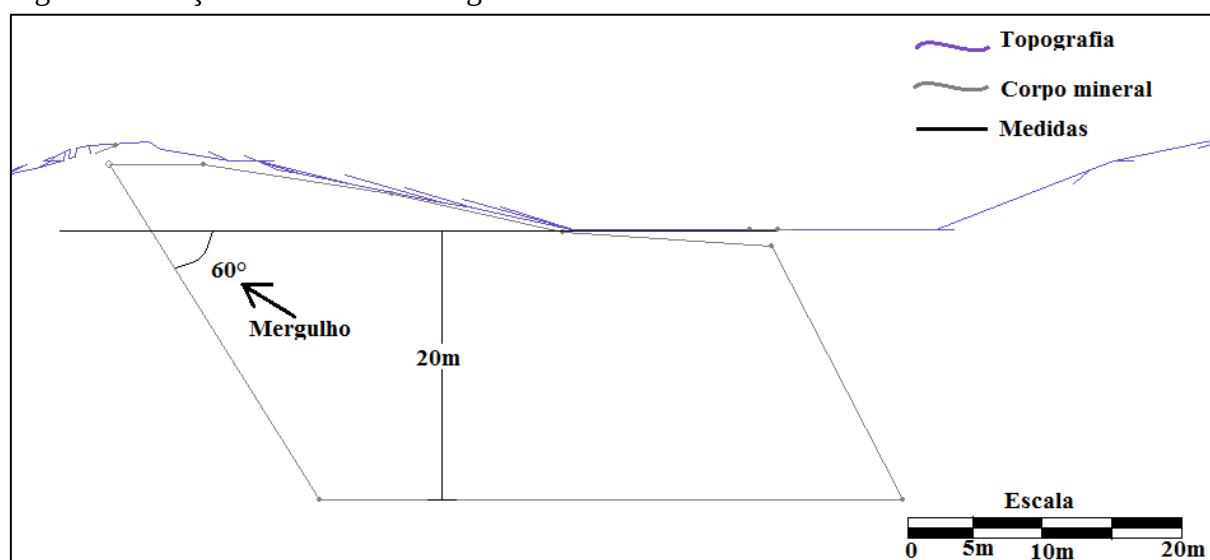
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 64 - Seção S8 Vertical ao Pegmatito Facheiro



Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

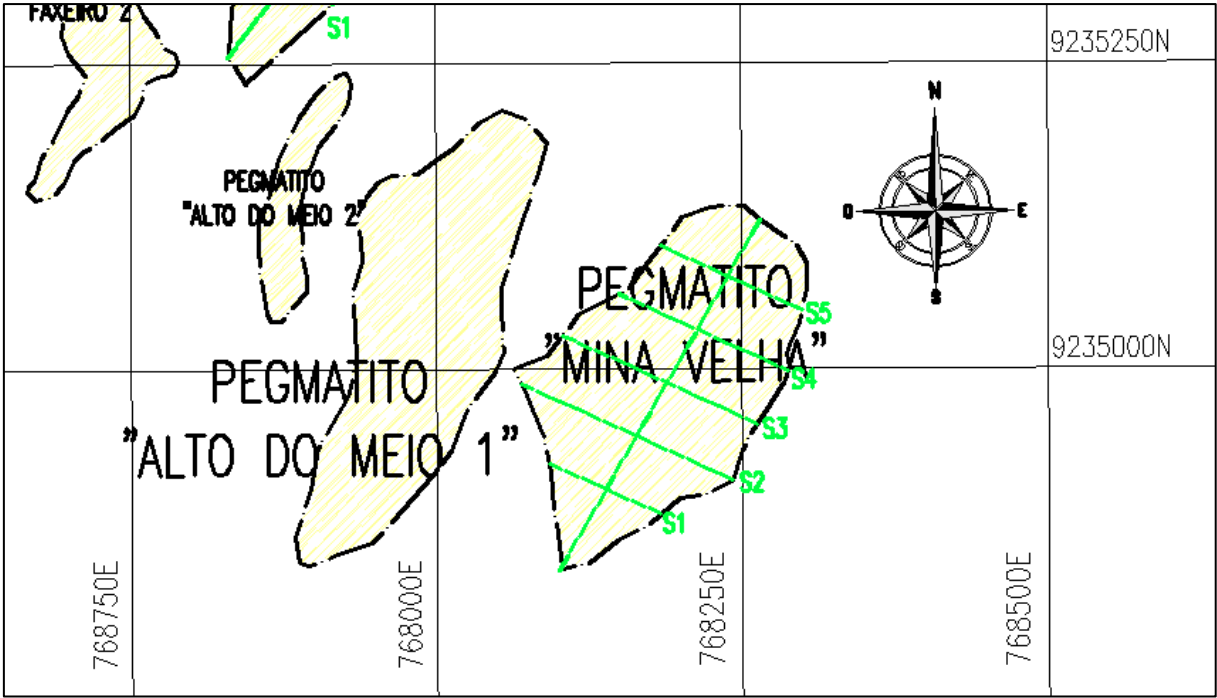
Figura 65 - Seção S9 Vertical ao Pegmatito Facheiro



Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

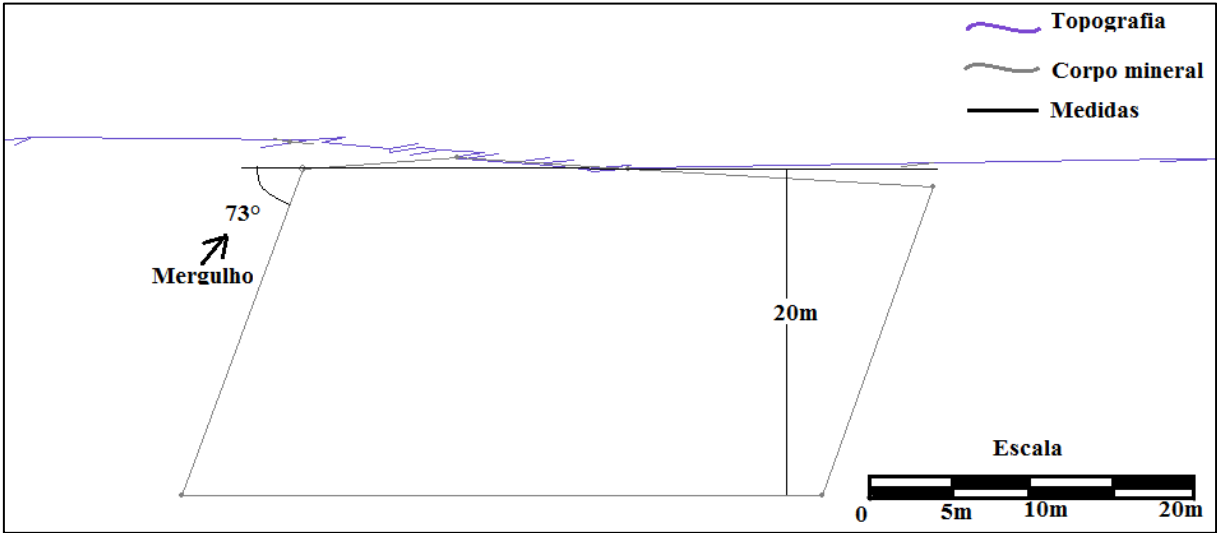
APÊNDICE B - SEÇÕES VERTICAIS EQUIDISTANTES EM 50 METROS DO PEGMATITO MINA VELHA

Figura 66 - Vista de planta das seções equidistantes executadas no pegmatito Mina Velha



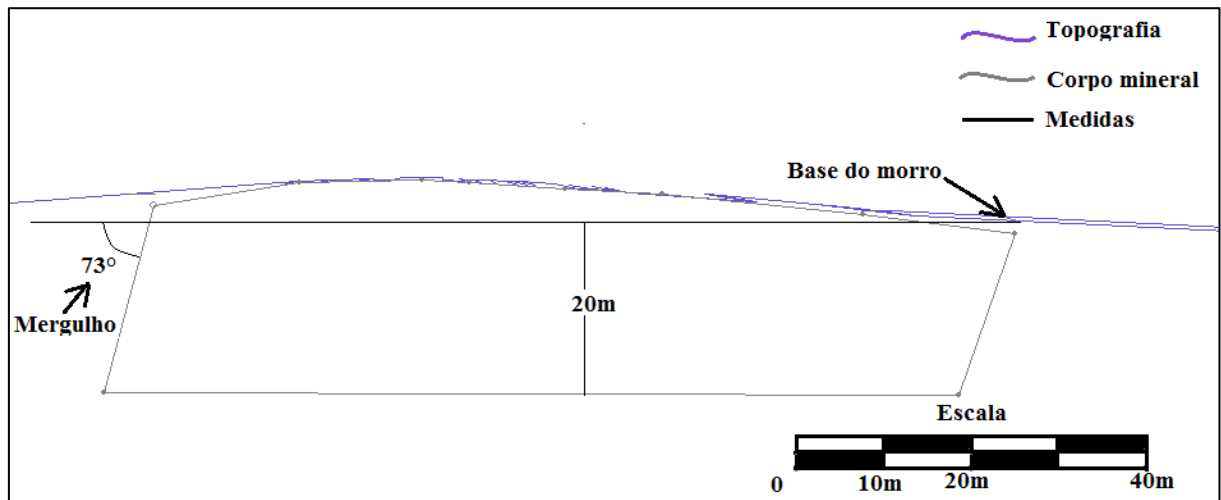
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 67 - Seção S1 Vertical ao Pegmatito Mina Velha



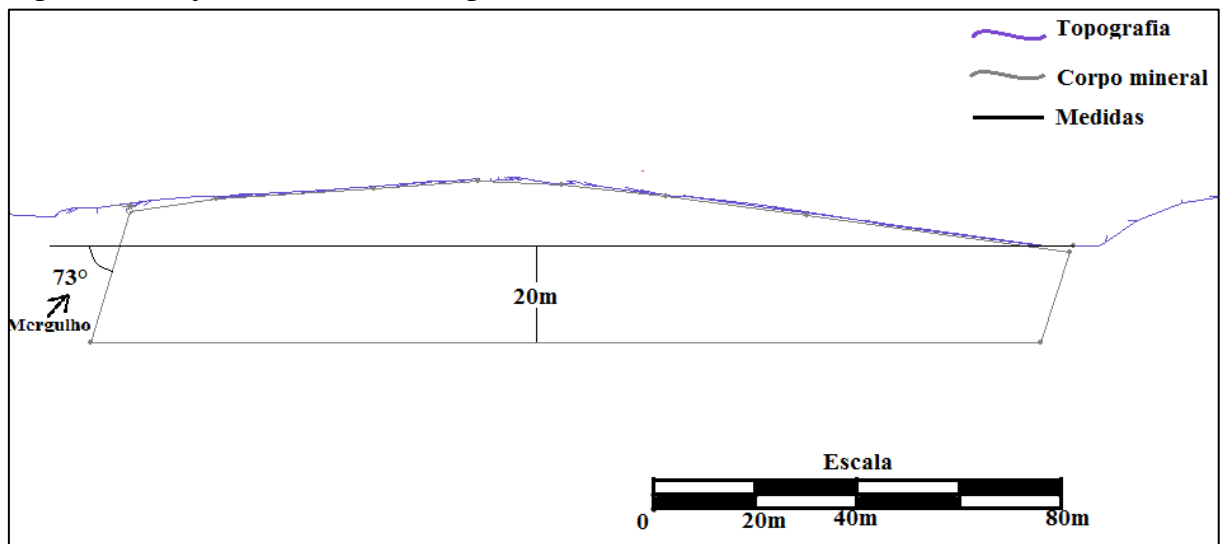
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 68 - Seção S2 Vertical ao Pegmatito Mina Velha



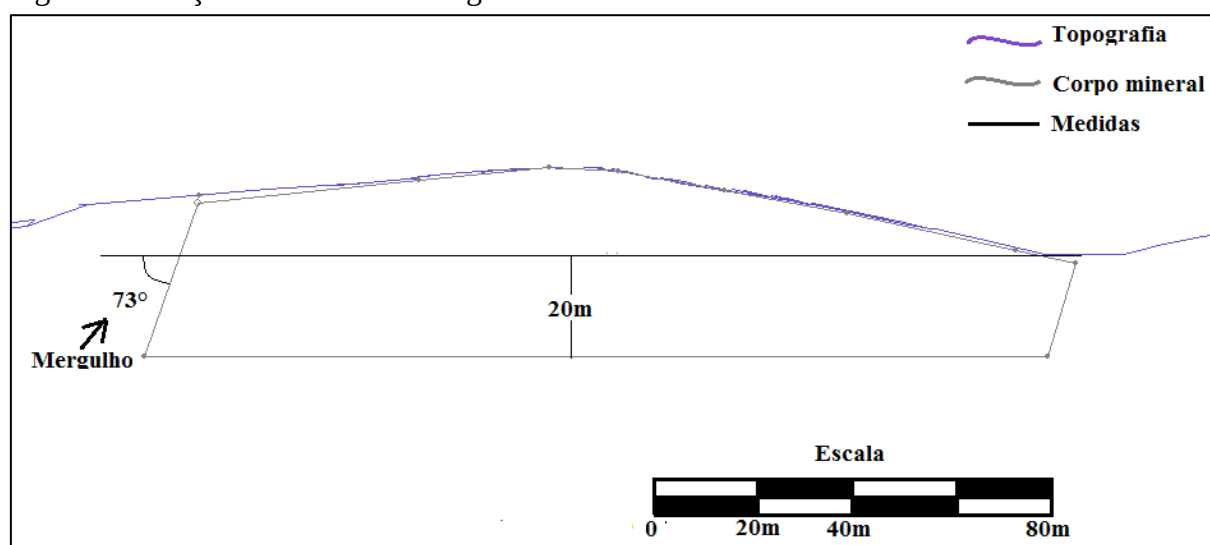
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 69 - Seção S3 Vertical ao Pegmatito Mina Velha



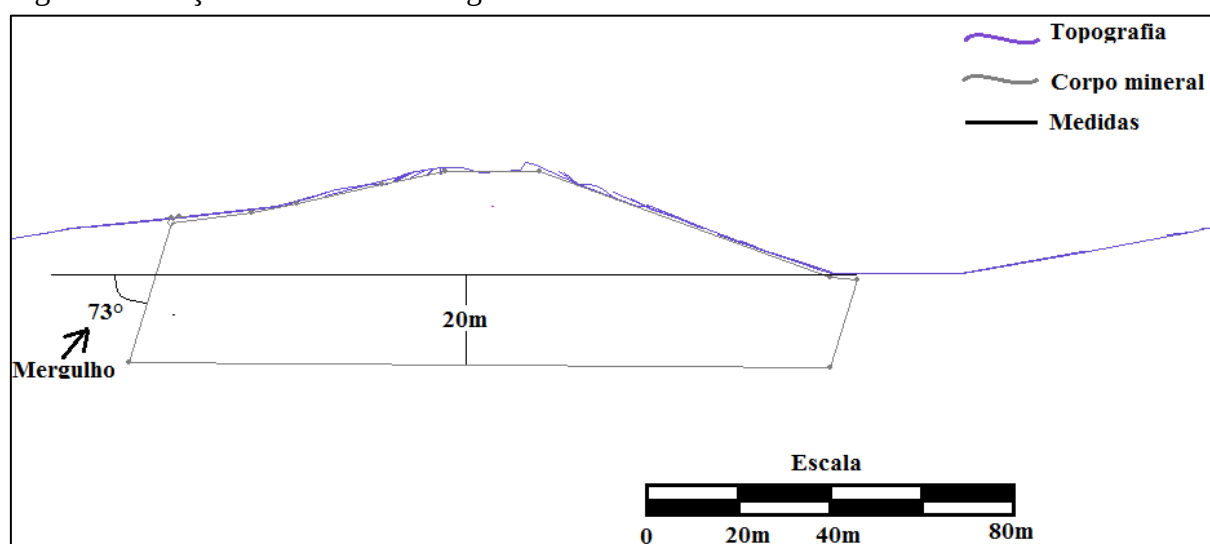
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 70 - Seção S4 Vertical ao Pegmatito Mina Velha



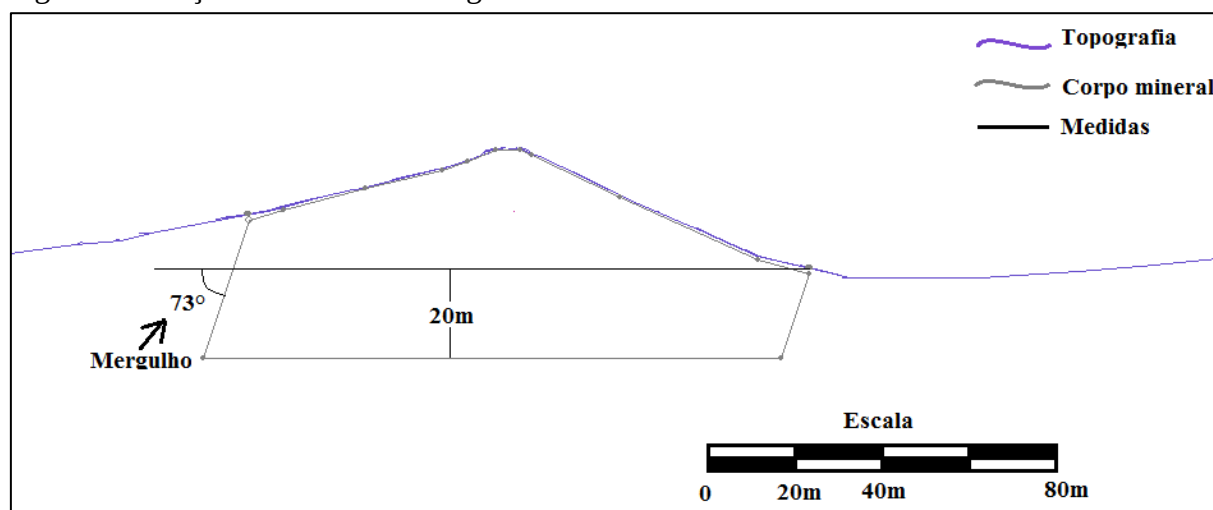
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 71 - Seção S5 Vertical ao Pegmatito Mina Velha



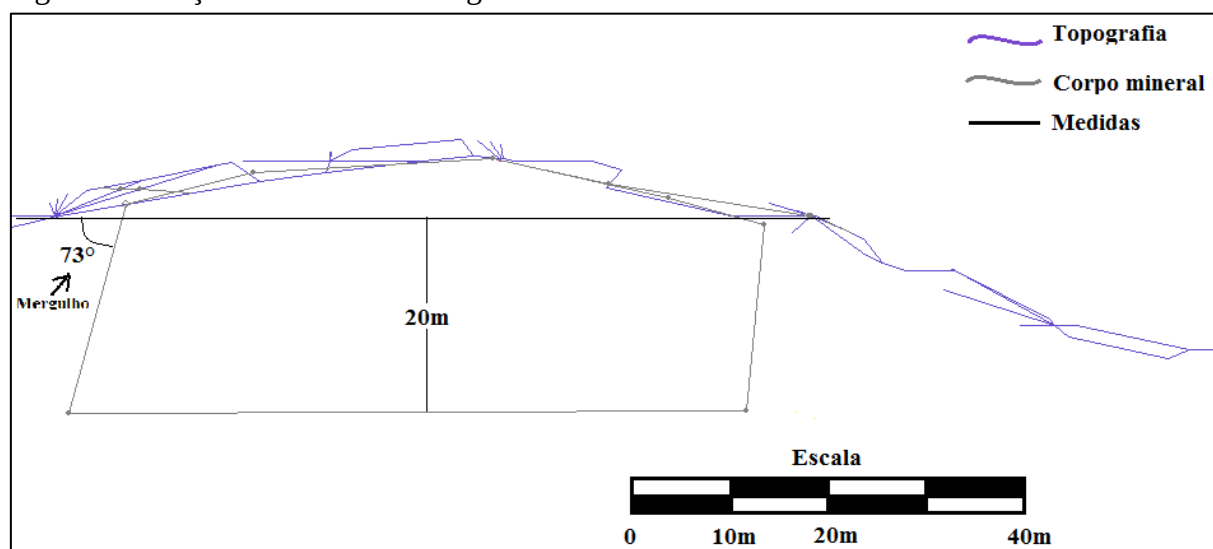
Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 72 - Seção S6 Vertical ao Pegmatito Mina Velha



Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.

Figura 73 - Seção S7 Vertical ao Pegmatito Mina Velha



Fonte: Imagem obtida através do software Datamine Studio.