



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ - CAMPUS DE CRATEÚS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**

**JEFFERSON GONÇALVES FARIAS**

**CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇO ROCHOSO EM UMA  
MINERAÇÃO ARTESANAL PARALISADA NO MUNICÍPIO DE TAUÁ-CE**

**CRATEÚS**

**2021**

JEFFERSON GONÇALVES FARIAS

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇO ROCHOSO EM UMA  
MINERAÇÃO ARTESANAL PARALISADA NO MUNICÍPIO DE TAUÁ-CE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Ceará-Campus de Crateús, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Ms. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira

CRATEÚS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

F238c Farias, Jefferson Gonçalves.  
Caracterização geomecânica de maciço rochoso em uma mineração artesanal paralisada no município de Tauá-CE / Jefferson Gonçalves Farias. – 2021.  
76 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2021.

Orientação: Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira.  
Coorientação: Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva.

1. Mineração. 2. Geomecânica. 3. Mineração artesanal. 4. Estabilidade. I. Título.

CDD 622

---

JEFFERSON GONÇALVES FARIAS

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇO ROCHOSO EM UMA  
MINERAÇÃO ARTESANAL PARALISADA NO MUNICÍPIO DE TAUÁ-CE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Ceará-Campus de Crateús, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Ms. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira  
(Orientador) Universidade Federal do Ceará – Campus  
de Crateús (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva  
(Coorientador) Universidade Federal do Ceará –  
Campus de Crateús (UFC)

---

Prof. Ms. Rafael Chagas Silva  
Universidade Federal do Ceará – Campus de Crateús (UFC)

---

Prof. Ms. Kennedy Da Silva Ramos  
Universidade Federal do Ceará – Campus de Crateús (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Josimar e Eveline.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus, por ter me fornecido ideias e força, para colocá-las em ação, bem como agradecer pelas bençãos e as oportunidades na vida acadêmica e profissional.

Agradeço também aos meus Orientadores Prof. Ms. Emanuel Itaquê e Prof. Dr. Francisco Diones, pela grande ajuda e pelo empenho dedicado para realização desta grande pesquisa. Não poderia deixar de agradecer ao Prof. Ms. Kennedy Ramos, pelo apoio e incentivo ao tema dessa pesquisa, e pela grande parceria ao longo da trajetória acadêmica.

Aos meus pais Eveline Farias e Josimar Gonçalves, e ao meu irmão Jean Farias, ressalto a minha eterna gratidão pelo incentivo e apoio em toda minha vida. Em especial agradeço aos meus avós de consideração, Prof(a) Amélia Farias e Prof. Feitosa, pelo incentivo e apoio ao longo de muitos anos da minha trajetória estudantil, também agradeço ao Tio Feitosa Filho, por sempre ter me ajudado e me apoiado. A minha avó paterna, dona Maria deixo minha gratidão e admiração, por representar na minha vida o grande sentimento de superação e amor.

Agradeço ao município de Tauá-CE, em nome do vereador Alaor Mota, por abraçar e ajudar no desenvolvimento desse trabalho. Em nome do Secretário do Meio Ambiente de Tauá Dr. Agildo Nogueira, agradeço o apoio da SUPERMATA (Superintendência Municipal do Meio Ambiente) em fomentar a construção desse trabalho.

Quero agradecer também aos meus grandes mestres na Universidade, Dr. Rodrigo Cortez, Ms. Carlos Eduardo, Ms. Rafael Silva, Ms. Tiany Guedes, pelos grandes ensinamentos. Aos meus grandes amigos e companheiros Dr. Miranda, Márcio, Jérica, Willian Alves, Lucas Rafael, Paulo Gildânio, Luan Sales, Francisco da Costa Maia, Flávio, Harianne, deixo registrado meu grande apreço.

“Quem dera fossemos apenas  
homens, mas somos Demolays.”

Walt Disney

## RESUMO

O interesse pela mineração artesanal de ametistas, que se encontra paralisada, localizado no serrote do Quinamuiú na cidade de Tauá, surgiu da necessidade de se analisar a estabilidade das escavações com vista a atestar a segurança das escavações, que constantemente são acessadas por visitantes no serrote. O objetivo geral do trabalho foi desenvolver um estudo das condições geomecânicas do maciço rochoso, bem como a análise da geologia local e estudo das discontinuidades. Como metodologia deste trabalho foram realizados o modelo digital do terreno, visando o reconhecimento topográfico da área de estudo; também, o reconhecimento geológico local e os estudos de estabilidade das galerias subterrâneas onde em cada trecho analisado, foram realizadas aferições de medidas em campo dos afloramentos, paredes e tetos da galeria visando a caracterização das discontinuidades, isso foi realizado, analisando parâmetros como orientação espacial, frequência, espaçamento, persistência, rugosidade, resistência à compressão, abertura e preenchimento das fraturas, culminando na realização da classificação com os tradicionais sistemas de classificações geomecânicos, representados por RQD - *Rock Quality Designation*, RMR - *Rock Mass Rating*, Q - *Tunneling Quality Index*, e GSI ("*Geological Strength Index*"). De posse de todos os dados, os padrões das discontinuidades atuantes no maciço rochoso foram analisados com os softwares *Stereonet* e *Stereonet/app visible geology*. De acordo com a geologia local da antiga mineração artesanal a caracterização geológica permitiu identificar como rochas encaixantes gnaisses migmatizados, diatexitos, granodioritos e paragnaisses, pertencentes ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria e como litologia do serrote do Quinamuiú rochas ácidas com alto teor de sílica formadas por riolitos de granulação fina. Com a análise das famílias de discontinuidades pode-se constatar que a maior influência das juntas como condicionantes de instabilidades na parte externa da galeria possuem atitude média de  $098^{\circ}/50$  e  $041^{\circ}/56$  com predomínio de direção WNW-ESE. Os resultados indicaram uma faixa de classificação entre razoável a ruim entre as janelas, logo, dessa forma a entrada na galeria não é considerada segura para os visitantes de acordo com os resultados obtidos no estudo.

**Palavras chaves:** Estabilidade; Geomecânica; Mineração; Risco de colapso; Segurança.



## ABSTRACT

The interest in artisanal mining of amethysts, which is at a standstill, located in the Quinamuiú mountain range in the city of Tauá, arose from the need to analyze the stability of the excavations in order to attest to the safety of the excavations, which are constantly being visited by visitors. on the saw. The general objective of the work was to develop a study of the geomechanical conditions of the rock mass, as well as the analysis of the local geology and the study of discontinuities. As a work methodology, the digital terrain model was carried out, specifically the topographical recognition of the study area; also, the local geological reconnaissance and stability studies of the underground galleries where, in each analyzed section, measurements were carried out in the field of the outcrops, walls and ceilings of the gallery to complement the characterization of discontinuities, this was carried out, analyzing parameters such as orientation, frequency, spacing, persistence, roughness, compressive strength, opening and filling of fractures, culminating in the classification with traditional geomechanical classification systems, represented by RQD - Rock Quality Designation, RMR - Rock Mass Rating, Q - Tunneling Quality Index , and GSI (“Geological Strength Index”). With all the data in hand, the patterns of discontinuities acting in the rock mass were pushed with the software Stereonet and Stereonet / visible geology app. According to the local geology of the ancient small-scale artisanal mining, the geological characterization scores identify migmatized gneisses, diatexites, granodiorites and paragneisses as enclosing rocks, belonging to the Tamboril-Santa Quitéria Complex and as a lithology of the Quinamuiú mountain range, acid rocks with high content of silica formed by fine-grained rhyolites. With the analysis of families of discontinuities, it can be seen that the greatest influence of the joints as conditions of instabilities in the external part of the gallery have an average attitude of  $098^{\circ}/50$  and  $041^{\circ}/56$ , with a predominance of the WNW-ESE direction. The results indicated a range of classification between reasonable and poor between windows, therefore, entry into the gallery is not considered safe for visitors, according to the results obtained in the study.

**Keywords:** Stability; Geomechanics; Mining; risk of collapse; Safety.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1: Mapa de localização do antiga mineração artesanal de pequeno porte subterrânea de ametistas, no município de Tauá-CE, foco do estudo.....pág. 14
- Figura 2: Supercontinente Gondwana Oeste com a presença das regiões cratônicas e as faixas móveis do Brasiliano Pan -Africano.....pág. 15
- Figura 3: Compartimentação da Província Borborema.....pág.16
- Figura 4: Embocadura do ádito de acesso à frente de lavra.....pág.21
- Figura 5: Diagrama em blocos com um conjunto de três famílias de juntas distintas.....pág.24
- Figura 6: Índice de resistência geológica (GSI) para maciços rochosos (Marinos *et al.*, 2005).....pág.33
- Figura 7: Índice de resistência geológica (GSI) para maciços rochosos heterogêneos (Marinos *et al.*, 2005). Tradução Maia .....pág.34
- Figura 8: Fluxograma com as principais etapas da classificação geomecânica.....pág.36
- Figura 9: Medições das estruturas planas, tais como: direção, mergulho e sentido de mergulho. planar.....pág.37
- Figura 10: Registro dos afloramentos, com elementos de escala e identificação.....pág.38
- Figura 11: Foto a galeria estudada, e seção transversal ilustrando suas dimensões.....pág.41
- Figura 12: Perfil longitudinal do Serrote do Quinamuiú com direção do eixo maior do serrote NNE-SSW.....pág.46
- Figura 13: Afloramento 05 estudado representando a rocha encaixante, composta por gnaisses bandados com orientação NNE-SSW e intrusões discordantes de pegmatitos ácidos compostos por feldspatos potássicos e quartzo. Coordenadas: Longitude UTM: 354.940 m E e Latitude UTM: 9.333.998 m S, ZONA 24 S.....pág.47
- Figura 14: Afloramento 06 estudado formado por granodioritos e paragnaisses pertencentes complexo Tamboril – Santa Quitéria. Coordenadas: Longitude UTM: 355.636 m E e Latitude UTM: 9.333.912 m S, ZONA 24.....pág.48
- Figura 15: Afloramento rochoso 01 estudado formado por riolitos com a presença de três famílias de fraturas. Coordenadas: Longitude UTM: 355.163 m E e Latitude UTM: 9.334.703 m S, ZONA 24 S.....pág.49
- Figura 16: Afloramento de riolitos com alto teor de sílica, apresentando coloração branca a branco marfim, com intenso fraturamento hidráulico de composição silicática destacados em vermelho.....pág.50

Figura 17: Afloramento 02 estudado com a presença de enxames de venulações silicosas e a direita uma amostra de mão representando a rocha sã com coloração avermelhada e granulação fina. Coordenadas: Longitude UTM: 355.167 m E e Latitude UTM: 9.334.633 m S, ZONA 24 S.....	pág.50
Figura 18: Afloramento 03 estudado representando um maciço rochoso com elevado nível de alteração superficial e intenso fraturamento superficial. Coordenadas: Longitude UTM: 355.184 E m e Latitude UTM: 9.334.571 m S, ZONA 24 S.....	pág.51
Figura 19: Amostra de mão do afloramento 03 representando o padrão de venulações silicosas e indícios de fraturamento hidráulico com geódos centimétricos destacados em vermelho.....	pág.51
Figura 20: Afloramento 04 estudado com três famílias de fraturamento F1, F2 e F3 com nível elevado de persistência e orientações respectivamente ESE-WNW, NE-SW e NNE-SSW. Coordenadas: Longitude UTM: 355.155 m E e Latitude UTM: 9.334.622 m S, ZONA 24 S .....	pág.51
Figura 21: Mapa geológico local e afloramentos estudados.....	pág.53
Figura 22: Janela 01, estudada.....	pág.54
Figura 23: Janela 02, estudada.....	pág.55
Figura 24: Janela 03, estudada.....	pág.56
Figura 25: Janela 04, estudada.....	pág.57
Figura 26: Mapa hipsométrico destacando a topografia local da área de estudo.....	pág.58
Figura 27: Estereograma representando os polos dos planos de fraturas no perímetro externo da mina, com atitude média com F1: 098°/50, F2: 041°/56 e F3: 005°/70.....	pág.60
Figura 28: Diagrama de rosetas apresentando a direção WNW-ESE como direção preferencial das descontinuidades estudadas, n=36.....	pág.60
Figura 29: As três famílias de fraturas F1, F2 e F3 analisadas no estudo, com atitude média de 098°/50, 041°/56 e 005°/70 respectivamente.....	pág.61
Figura 30: Estereograma representando os polos dos planos de fraturas referentes a família 01.....	pág.62
Figura 31: Estereograma representando os polos dos planos de fraturas referentes a família 02.....	pág.63

Figura 32: Estereograma representando os polos dos planos de fraturas referentes a família 03..... pág.64

Figura 33: Descontinuidades no interior da galeria, representadas pela letra D.....pág.65

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação RQD.....	pág.24
Quadro 2 - Parâmetros de classificação e suas classificações.....	pág.26
Quadro 3 - Classificação das condições das descontinuidades, parâmetro 4.....	pág.27
Quadro 4 - Ajuste para orientações das descontinuidades.....	pág. 27
Quadro 5 - Classificação do maciço rochoso de acordo com o método RMR.....	pág.28
Quadro 6 - Classificação numérica do $J_n$ .....	pág.29
Quadro 7 - Classificação numérica em função da qualificação $J_r$ .....	pág.29
Quadro 8 - Classificação numérica em função da qualificação $J_a$ .....	pág.30
Quadro 9 - Classificação numérica em função da qualificação $J_w$ .....	pág.31
Quadro 10 - Classificação do maciço rochoso de acordo com o sistema Q.....	pág.31
Quadro 11 - Estimativas de resistências à compressão uniaxial.....	pág.44
Quadro 12 - Conjunto de descontinuidades pertencentes a família 1.....	pág.61
Quadro 13 - Conjunto de descontinuidades pertencentes a família 2.....	pág.63
Quadro 14 - Conjunto de descontinuidades pertencentes a família 3.....	pág.64
Quadro 15 - Conjunto de descontinuidades no interior da galeria analisadas nas janelas.....	pág.65
Quadro 16 - Resistência da rocha intacta das janelas estudadas.....	pág.65
Quadro 17 - Classificação pelo índice RQD.....	pág.67
Quadro 18 - Resultado da classificação Q, e distribuição dos pesos relativos aos parâmetros adotados.....	pág.68
Quadro 19 - Resultado da classificação RMR básico, e distribuição dos pesos relativos aos parâmetros.....	pág.68
Quadro 20 - Resultado da classificação GSI, destacado em vermelho.....	pág.69

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANM Agência Nacional de Mineração

CE – Ceará

CPRM Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais

DNPM Departamento Nacional de Produção Mineral

E - Leste

F1 – Corresponde a fratura enumerada como número 1

F2 – Corresponde a fratura enumerada como número 2

F3 – Corresponde a fratura enumerada como número 3

GIS - *Geological Strength Index*

GPS – *Global Positioning System*

GSA - *Geological Society of America*

ISRM Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas

MDT Modelo Digital do Terreno

NASA *National Aeronautics and Space Administration*

NIMA *National Imagery and Mapping Agency*

RIMA Relatório de Impactos Ambientais

RMR *Rock Mass Rating*

RQD *Rock Quality Designation*

SE – Sudeste

SEMACE Superintendência Estadual do Meio Ambiente

SIG Sistema de Informações Geográficas

SW – Sudoeste

UFC – Universidade Federal do Ceará

W – Oeste

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>3.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1.</b>	<b>Localização, vias de acesso e infraestrutura</b> .....	<b>14</b>
<b>3.2.</b>	<b>Geologia Regional</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1.1.</b>	<i>Província da Borborema</i> .....	<b>14</b>
<b>3.1.2.</b>	<i>Subprovíncia setentrional</i> .....	<b>15</b>
<b>3.1.3.</b>	<i>Domínio médio Coreau</i> .....	<b>16</b>
<b>3.1.4.</b>	<i>Domínio Rio Grande do Norte</i> .....	<b>17</b>
<b>3.1.5.</b>	<i>Domínio Ceará Central</i> .....	<b>17</b>
<b>4.</b>	<b>AMETISTAS</b> .....	<b>19</b>
<b>5.</b>	<b>HISTÓRICO DAS ATIVIDADES GARIMPEIRAS DESENVOLVIDAS</b> .....	<b>20</b>
<b>6.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>22</b>
<b>6.1.</b>	<b>Sistemas de classificação geomecânico</b> .....	<b>22</b>
<b>6.1.1.</b>	<i>RQD Volumétrico</i> .....	<b>22</b>
<b>6.1.2.</b>	<i>Rock Mass Rating (RMR)</i> .....	<b>24</b>
<b>6.1.3.</b>	<i>Rock Tunnelling Quality Index (Q)</i> .....	<b>28</b>
<b>6.1.4.</b>	<i>Índice de Resistência Geológica (GSI)</i> .....	<b>31</b>
<b>6.1.4.1.</b>	<i>Maciços rochosos heterogêneos</i> .....	
<b>7.</b>	<b>MATERIAIS E METODOLOGIA</b> .....	<b>36</b>
<b>7.1.</b>	<b>Levantamento topográfico da área de estudo</b> .....	<b>38</b>
<b>7.2.</b>	<b>Mapeamento geológico local da área de estudo</b> .....	<b>38</b>
<b>7.2.1.</b>	<i>Medições em campo</i> .....	<b>38</b>
<b>7.3.</b>	<b>Reconhecimento visual preliminar da área de estudo</b> .....	<b>40</b>
<b>7.4.</b>	<b>Seleção dos trechos para estudo</b> .....	<b>40</b>
<b>7.4.1.</b>	<i>Análise das discontinuidades e coleta de dados ordenada</i> .....	<b>41</b>
<b>7.5.</b>	<b>Mapeamento de falhas e fraturas</b> .....	<b>42</b>
<b>7.6.</b>	<b>Caracterização geotécnica estrutural</b> .....	<b>42</b>
<b>7.7.</b>	<b>Resistência à compressão uniaxial da rocha</b> .....	<b>43</b>
<b>7.8.</b>	<b>Análise estrutural</b> .....	<b>44</b>
<b>7.9.</b>	<b>Materiais utilizados</b> .....	<b>45</b>

<b>8.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>45</b>
<b>8.1.</b>	<b>Geologia local</b>	<b>45</b>
<b>8.2.</b>	<b>Caracterização geológica da rocha e das discontinuidades</b>	<b>54</b>
<b>8.3.</b>	<b>Modelo topográfico da região estudada</b>	<b>57</b>
<b>8.4.</b>	<b>Análise estrutural</b>	<b>59</b>
<b>8.4.1.</b>	<i>Família de discontinuidades 01</i>	<b>61</b>
<b>8.4.2.</b>	<i>Família de discontinuidades 02</i>	<b>62</b>
<b>8.4.3.</b>	<i>Família de discontinuidades 03</i>	<b>63</b>
<b>8.5.</b>	<b>Descontinuidades estudadas no interior da galeria</b>	<b>64</b>
<b>8.6.</b>	<b>Classificação geomecânica com os sistemas Q, RMR e GSI</b>	<b>65</b>
<b>8.6.1.</b>	<i>Determinação da resistência com o martelo geológico</i>	<b>66</b>
<b>8.6.2.</b>	<i>Cálculo do RQD</i>	<b>66</b>
<b>8.6.3.</b>	<i>Classificação Q-Barton</i>	<b>67</b>
<b>8.6.4.</b>	<i>Classificação RMR básico</i>	<b>67</b>
<b>8.6.5.</b>	<i>Classificação GSI</i>	<b>68</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>70</b>
<b>10.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>71</b>
<b>11.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTARES</b>	<b>73</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A escavação de uma mina subterrânea envolve uma série de estudos voltados para sua viabilidade técnico-econômica, que levam em consideração além das características tecnológicas do minério, as características e propriedades das rochas a serem escavadas. O estudo do comportamento geomecânico de um maciço rochoso é de suma importância para o entendimento da estabilidade das aberturas de uma mina, seja a céu aberto ou subterrâneas, de forma que se entenda os riscos de colapso do maciço rochoso.

Para o estudo geomecânico de um maciço rochoso, torna-se necessário o mapeamento geológico e geotécnico da escavação, afim de se reconhecer os tipos litológicos e estruturas que pertencem ao maciço rochoso. As classificações geomecânicas do maciço rochoso identificam características da rocha intacta, das descontinuidades que o interceptam e as classificam segundo parâmetros descritos para cada método, na tentativa de se quantificar o grau de estabilidade daquele maciço escavado, segundo Fiori, A., (2016).

A lavra de ametistas registrada pela antiga mineração artesanal, encontra-se a Oeste da sede municipal de Tauá, está inserida no Serrote do Quinamuiú na região Sertões dos Inhamuns, localizado há 344,7 km da capital Fortaleza e é tido como um dos grandes atrativos turísticos do município, juntamente com o mirante da serra. Estes foram formados no passado geológico pela orogênese Brasileira/Pan-Africana que deixou seus registros bem marcados através da Zona de Cisalhamento de Tauá (ZCT) e do magmatismo associado (CPRM; 2019). De acordo com (FRONDEL, 1962; WEBSTER, 1983), o quartzo na sua variedade de ametista, cuja coloração é designada em roxo claro ou violeta azulado, é uma das mais desejadas e valorizadas dentre os minerais da família do quartzo.

O estado do Ceará, geologicamente apresenta um potencial para extração de ametistas, representado principalmente pela jazida de Batoque no município de Santa Quitéria, porém, existem outras ocorrências de ametistas em menor expressividade ou até em quantidades desconhecidas em outras cidades, como é o caso da cidade de Tauá, onde se localiza uma mineração artesanal subterrânea paralisada no serrote do Quinamuiú. Esta mineração artesanal, foco do estudo dessa pesquisa, registrou no passado uma parcela pequena de extração de ametistas, comparada aos estados que são os maiores produtores, como o estado do Rio Grande Do Sul. (ANUÁRIO MINERAL ESTADUAL., 2018).

A segurança dos visitantes às galerias motivou o tema desta pesquisa, que buscou acrescentar informações sobre características geomecânicas e o seu grau de estabilidade.

O presente trabalho abordou as características topográficas da área de estudo, o reconhecimento geológico regional e local e os estudos de estabilidade das galerias subterrâneas, por meio da avaliação dos afloramentos, paredes e tetos das galerias com os tradicionais sistemas de classificações geomecânicos representados por RQD - *Rock Quality Designation* (DEERE et al., 1966), RMR - *Rock Mass Rating* (BIENIAWSKI, 1973), Q - *Tunneling Quality Index* (BARTON et al., 1974), e GSI ("*Geological Strength Index*") muito utilizados para execução do diagnóstico de qualidade das rochas. Com todos os dados coletados, os padrões das descontinuidades atuantes no maciço rochoso foram analisados com os softwares Stereonet e app Visible Geology para entendimento geral das descontinuidades.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo geral é conhecer e avaliar as características topográficas, geológicas e geomecânicas da escavação subterrânea para a geração de informações de utilidade pública com relevância na segurança das estruturas da mina desativada de ametistas.

Os objetivos específicos do trabalho são:

**i.** reconhecer localmente a geologia, na busca do conhecimento dos tipos litológicos, onde está inserida a antiga mineração artesanal;

**ii.** gerar um modelo digital do terreno, visando o reconhecimento topográfico da área de estudo; e

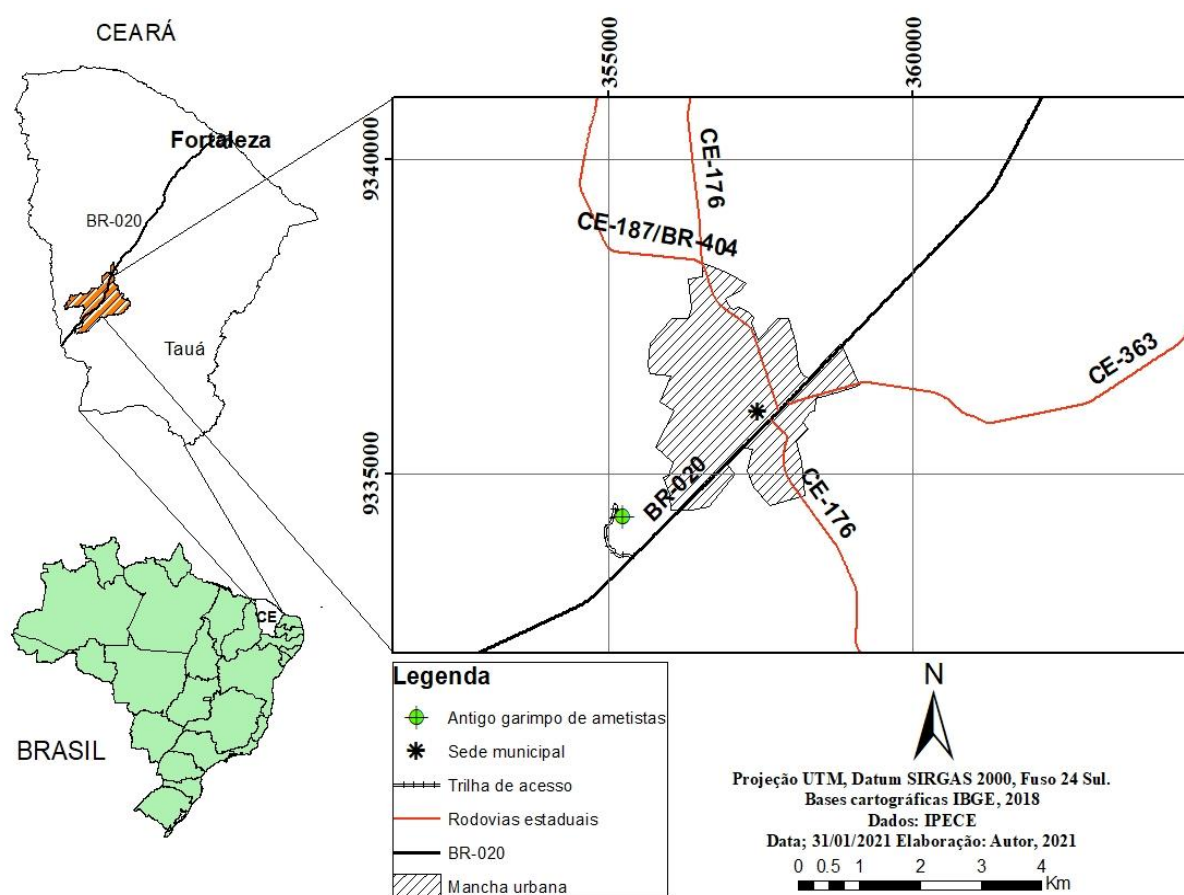
**iii.** avaliar geomecanicamente o maciço rochoso, com enfoque na análise das descontinuidades, para averiguação da estabilidade da abertura subterrânea.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1. Localização, vias de acesso e infraestrutura

A antiga mineração artesanal de ametistas está localizada a Oeste da sede municipal de Tauá, e está inserida nos limites territoriais do município de Tauá, com as seguintes coordenadas, latitude UTM 9334357 m S e longitude UTM 355180 m E, com elevação de 412 metros em relação ao nível do mar. O acesso à área a partir de Fortaleza se dá através da rodovia federal BR-020 (sentido SW), com a distância de Fortaleza a Tauá de 344,7 km, de acordo com a Figura 1.

**Figura 1:** Mapa de localização da antiga mineração artesanal subterrânea de ametistas, no município de Tauá-CE, foco do estudo



Fonte: IPECE

#### 3.2. Geologia Regional

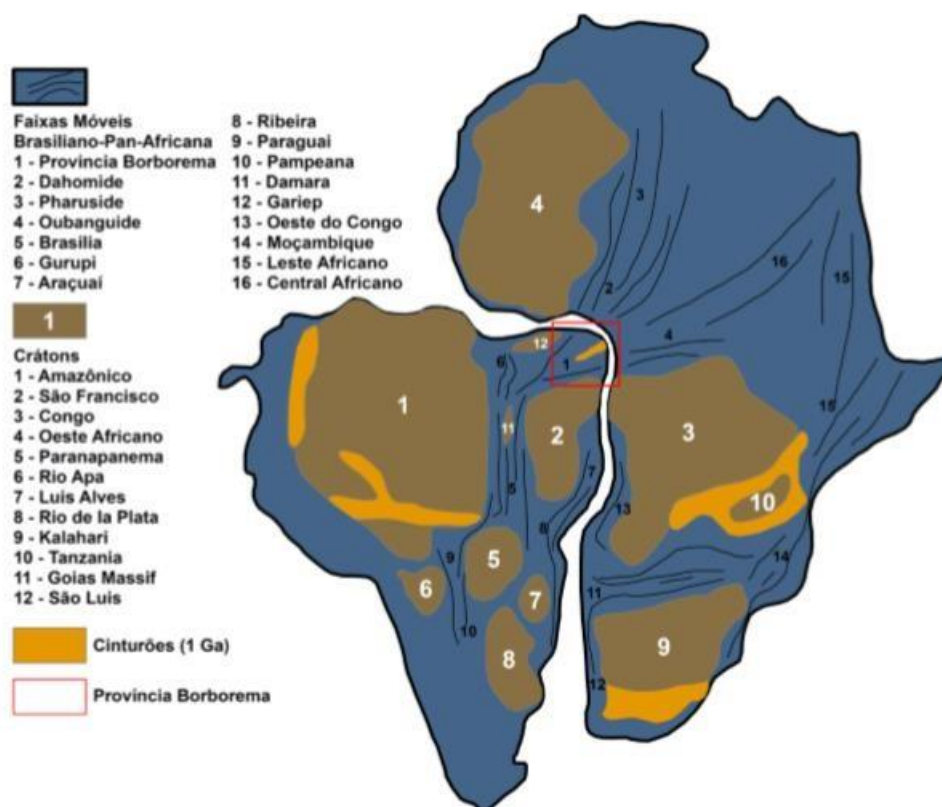
##### 3.1.1. Província da Borborema

De acordo com Almeida *et al.* (1977), a província da Borborema, ocupa em sua extensão em torno de 380.000 km<sup>2</sup>, desenvolvida no transcorrer do ciclo brasileiro, está localizada no Nordeste brasileiro com limites no norte da Bahia, sudoeste do Piauí e noroeste do Ceará.

Conceitualmente é tida como uma complexa região de domínio tectonoestratigráficos, associada ao evento Brasiliano-Pan-Africano ocorrido no Neoproterozoico, estruturada pela colagem dos crátons Amazônico, São Luis-Oeste Africano e São Francisco-Congo, também com a participação do cráton Saariano, segundo Almeida *et al.* (1981). Tendo como resultado o supercontinente Gondwana Oeste Figura 2.

Essa província é integrada por três segmentos tectônicos fundamentais, limitados por importantes zonas de cisalhamento brasilianas, denominados de Subprovíncia Setentrional, Subprovíncia da Zona Transversal ou Central e Subprovíncia Externa ou Meridional, que foram subdivididas em domínios, terrenos ou faixas, baseados no patrimônio litoestratigráfico, feições estruturais, dados geocronológicos e assinaturas geofísicas de acordo com Bizzi *et al.* (2003), Figura 2.

**Figura 2:** Supercontinente Gondwana Oeste com a presença das regiões cratônicas e as faixas móveis do Brasiliano Pan-Africano

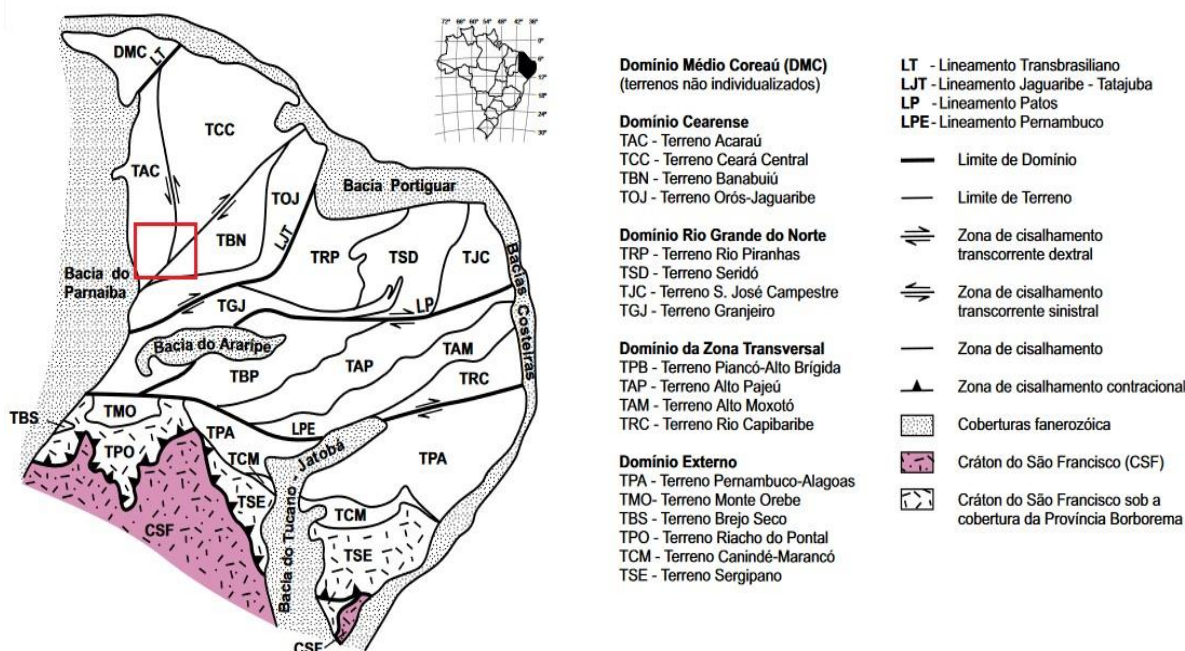


Fonte: (Schobbenhaus & Campos, 1984; Trompette, 1994; De Wit *et al.*, 2008 *apud* Bezerra, E. 2016).

### 3.1.2. Subprovíncia setentrional

Compreende a porção da Província Borborema situada a norte do Lineamento Patos, subdividida, de oeste para leste, nos domínios Médio Coreaú, Ceará Central e Rio Grande do Norte, segundo Bizzi *et al.* (2003), Figura 3.

**Figura 3: Compartimentação da Província Borborema**



Fonte: CPRM, 2016

### 3.1.3. Domínio médio Coreaú

Segundo Bizzi *et al.* (2003), tal domínio com aproximadamente 10.000 km<sup>2</sup> corresponde ao segmento da subprovíncia situado a NW da Zona de cisalhamento Sobral–Pedro II, componente do Lineamento Transbrasiliano–Kandi, uma megaestrutura de direção NE–SW, caráter transcorrente dextral e idade neoproterozóica, que o separa do Domínio Ceará Central. Compreende o Terreno Granja e a Faixa Martinópole–Ubajara, que constituem fatias crustais limitadas por zonas de cisalhamento transcorrente- transpressivas de direção NE–SW e idade neoproterozóica, Figura 3.

Segundo Santos *et al.*, (2008a) o embasamento paleoproterozóico é formado por gnaisses migmatíticos e granulitos de estrutura juvenil, os quais estão cobertos por rochas do Paleoproterozóico tardio e Neoproterozóico, intrudidas por granitos sin a pós- tectônicos. Também são compostos por ortognaisses e migmatitos (Complexo Granja), rochas vulcano-sedimentares (Unidade saquinho), rochas Neoproterozoicos (Grupos Martinópole e Ubajara), e granitóides pós-colisionais Chaval e Tucunduva (590 Ma); Meruoca e Mucambo (530 Ma) Santos *et al.*, (2008a; 2009).

### 3.1.4. *Domínio Rio Grande do Norte*

De acordo com Bizzi *et al.* (2003), este domínio compõe-se das faixas Orós– Jaguaribe e Seridó, e dos terrenos Rio Piranhas, São José do Campestre e Granjeiro. Limita-se a oeste pela zona de cisalhamento Orós Oeste/Aiuaba e ao sul pela Zona de Cisalhamento (lineamento) Patos. A leste e a norte, o domínio está encoberto pelas rochas sedimentares da Província Costeira e da Bacia do Apodi, respectivamente (Figura 3).

Compreende um núcleo arqueano (Maciço São José do Campestre), sequências supracrustais paleoproterozoicas (Faixa Orós-Jaguaribe), rochas neoproterozoicas (Faixa Seridó) e Complexo gnáissico-migmatítico (Complexo Caicó), além de corpos granitóides neoproterozoicos, segundo Parente & Arthaud, (1995); Dantas *et al.*, (2004).

### 3.1.5. *Domínio Ceará Central*

Limitado, ao norte, pela zona de cisalhamento Sobral–Pedro II, que o separa do Domínio Médio Coreaú, e pela Província Costeira; a oeste, pela Província Sedimentar do Parnaíba; a leste e ao sul faz fronteira com a Faixa Orós–Jaguaribe por meio da Zona de Cisalhamento Orós Oeste/Aiuaba. O Domínio Ceará–Central compreende o Bloco Tróia– Pedra Branca, também denominado Maciço Tróia–Tauá (BRITO NEVES., 1975) e a Faixa Ceará Central, Figura 3.

Segundo Caby e Arthaud., (1986), esse domínio é composto por ortognaisses félsicos de alto grau e migmatitos que são principalmente de composição tonalítica a granodiorítica. Os gnaisses desse domínio foram postulados para representar o retrabalho de protólitos arqueanos.

Na atual conjuntura, encontram-se as divisões tectono-estratigráficas do domínio Ceará Central englobando um embasamento arqueano-paleoproterozoico circundado por terrenos acrescionários paleoproterozoicos, além de uma extensa cobertura metassedimentar, em que seus constituintes exibem características de sedimentos de margem passiva de idade meso a neoproterozoica. Vale ressaltar a presença de expressivos corpos granitóides intrusivos sin- a pós-colisionais brasileiros, associados às megas zonas de cisalhamento que seccionam este domínio, que também ocorrem, localmente, pequenas bacias molassóides de idade paleozóica, de acordo com Bizzi *et al.* (2003).

O Domínio Ceará Central (DCC), através de todos os estudos realizados, podemos dividi-lo em: **i)** Núcleo Arqueano (TTG/Granito e Greenstone Belt), representados pela Unidade Tróia, Unidade pedra branca, Unidade Mombaça e Unidade Cedro; **ii)** Embasamento gnáissico Paleoproterozóico, representados pela Unidade Algodões e Suíte Madalena que cortam o Complexo Cruzeta; **iii)** Supracrustais Proterozóicas Indivisa ao Neoproterozóico, representado

pelas Unidades Canindé, Independência, Quixeramobim e Arneiroz CAVALCANTE *et al.*, (2003); **iv**) Complexo Tamboril-Santa Quitéria; e **v**) Granitóides Neoproterozóico ao Cambriano, representados pelas Suítes Quixadá Quixeramobim e Granitóide Chaval tidos no primeiro episódio pós-colisional (tardi-proterozóico) e segundo episódio, Cambro-Ordoviciano, destacado pelos granitoides anorogênicos Mucambo, Meruoca, Serra da Barriga, Pagé, Serrote São Paulo e Complexo Anelar Quintas, FETTER; (1999); CASTRO; (2004); CASTRO *et al.*, (2012;).



#### 4. AMETISTAS

De acordo com Klein e Dutrow (2012), as ametistas pertencem a classe mineral do quartzo, com sistema cristalino trigonal, apresentando fórmula química  $\text{SiO}_2$ . Na escala de Mohs apresenta dureza 7, densidade entre 2,63 e 2,65  $\text{g/cm}^3$ , propriedades de diafanidade com cores violeta, púrpura, roxo claro ao escuro, possuindo brilho vítreo com fluorescência fraca ou ausente e fratura conchoidal ou quebradiça. Em termos de qualidade gemológica as inclusões são um dos fatores principais que determinam o grau de pureza da ametista, dessa forma quanto menor a quantidade de inclusões maior o valor e melhor a classificação.

Segundo Schumann, W. (1995) *et al.*, a ametista é a variedade violeta ou púrpura do quartzo, que advém da presença de impurezas de ferro, traços de alumínio e algumas com variedades oriundas da exposição à radiação. Apresentam cores que variam do púrpura ou roxo claro ao escuro, sendo que as escuras com maior incidência de transparência apresentam-se de forma mais conceituadas e mais caras.

O mercado de ametistas dispõe de preços bem acessíveis, no entanto as variedades mais valorizadas se localizam em poucos locais. Estas, representadas por cores mais profundas, púrpuras ou violetas. Os depósitos mais importantes encontram-se no Brasil, porém, o total de 3% das ametistas brasileiras produzidas são adequadas à lapidação e utilizáveis em jóias. No entanto o restante é aplicado para a produção do citrino, e ainda, utilizado em artigos de decoração ou peças para colecionadores. Outros importantes depósitos estão no Uruguai, Índia, Rússia, Sri Lanka, Madagascar e Estados Unidos. Também são produtores de ametista a Argentina, Bolívia, México, Namíbia, Zâmbia, África do Sul e Canadá, por apresentarem tonalidades e nuances diferentes, estes minerais costumam receber o nome do país de origem, ex. ametista brasileira, boliviana, etc (ANUÁRIO MINERAL ESTADUAL., 2018).

Segundo Castro *et al.* (2012), Svisero & Franco,(1991); Cassedane, (1991) *apud* Luiz. P, (1999), no Brasil são conhecidos depósitos de ametista nos estados do Pará, Bahia, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Goiás, Tocantins, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Dentre eles, destacam-se os depósitos de Marabá e Pau D' Arco, no Pará, Jacobina, na Bahia e os do Rio Grande do Sul, pelos grandes volumes de produção e qualidade dos cristais. O Brasil é considerado um dos maiores produtores de ametistas, no entanto a maioria das ametistas brasileiras é tratada e vendida como citrino aquecido.

## 5. HISTÓRICO DAS ATIVIDADES GARIMPEIRAS DESENVOLVIDAS

Segundo, notícia jornalística. “DNPM fecha empresa de extração no Serrote Quinamuiú, em Tauá”. **Diário do Nordeste**, [Fortaleza], 7 setembro de 2005. A operação foi realizada pelo DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral); devido a empresa estar operando sem as devidas autorizações do órgão e por infringir a Lei de Crimes Ambientais de N° 9.605 de 12 de fevereiro de 1998, assim esta vinha realizando a lavra clandestina de ametistas no Serrote do Quinamuiú na cidade de Tauá;

A descoberta da lavra clandestina de ametistas foi ocasionada durante um trabalho de georreferenciamento das inscrições rupestres no município e circunvizinhança entre os dias 14 a 22 de abril no ano de 2005. O laudo técnico realizado pela equipe do DNPM, tendo à frente os geólogos José Betimar Melo Filgueira e José Artur de Andrade, descreveu que as galerias não possuíam nenhuma espécie de estudo geomecânico durante o período de lavra para atestar estabilidade das estruturas, ou seja, expondo os trabalhadores a uma fonte de perigo com risco desconhecido.

Foram constatados, com a equipe de trabalhadores, a presença de maquinários, como compressores que forneciam ar comprimido para equipamentos pneumáticos, martelotes para execução de furos, picaretas, marretas, luvas e muito explosivo fora das embalagens originais, que pelo mau armazenamento poderiam gerar graves acidentes. Em relação à disposição de estéreis, que não faz parte do escopo desse trabalho, era realizada totalmente de forma desordenada, caracterizando como uma espécie de bota fora, que gerou um grande talude e durante o período de chuvas configura uma estrutura perigosa aos visitantes e ao meio ambiente por apresentar uma possibilidade de ruptura do talude e que pode ser objeto de estudos futuros.

Hoje, a antiga mineração artesanal subterrânea de ametistas, Figura 04, inserida no Serrote do Quinamuiú, faz parte do Parque Ecológico Quinamuiú Joaquim de Castro Feitosa (Lei Municipal 1231, de 02 de abril de 2004) e foi declarado área de interesse para proteção ambiental (Lei Municipal 1317, de 29 de Abril de 2005), foi tornada Unidade de Conservação e Proteção Integral. A exploração de minerais existentes na área só é permitida mediante a apresentação do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) com a elaboração do Estudo de Impactos Ambientais (EIA), segundo a aprovação do órgão regulador ambiental da Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE) e emissão de licenças.

**Figura 4:** Embocadura do ádito de acesso à frente de lavra



Fonte: Mapio Net

## 6. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta os sistemas de caracterização geomecânica que foram utilizados para classificar o maciço rochoso da antiga mineração artesanal de ametistas.

### 6.1. Sistemas de classificação geomecânico

A estabilidade de um maciço rochoso depende de uma série de fatores, incluindo as propriedades geomecânicas, características geométricas das aberturas, profundidade e o seu método construtivo, de acordo com Adilson, C. (2017). A instabilidade e o futuro colapso de um maciço rochoso podem ser oriundos da; **i)** sobrecarga das rochas intactas sobrejacentes e **ii)** movimento relativo dos blocos, ocasionados pela aceleração da gravidade, pressão da água ou através da presença de tensões *in situ*, alerta Bieniawski., (1989).

As classificações geomecânicas objetivam a identificação de parâmetros que influenciam o comportamento do maciço rochoso, divisão de uma determinada formação rochosa em grupos de comportamento semelhante e o fornecimento de uma base de dados e de comunicação entre profissionais da área, (BIENIAWSKI, 1989).

O primeiro sistema proposto foi elaborado por Terzaghi em 1946, para aplicação em escavações de túneis com suporte metálico, segundo Adilson, C. (2017). Entre as várias classificações propostas ao longo tempo; podemos citar as mais representativas como os trabalhos de Ikeda (1970), Wickham, Tiedemann e Skinner (1974), Barton, Lien e Lunde (1974), Rocha (1976), Bieniawski (1976, 1989, 1993) e Franklin (1933). Porém, foram utilizados para classificação geomecânica da antiga lavra apenas os sistemas, RQD - *Rock Quality Designation* (DEERE et al., 1966), RMR - *Rock Mass Rating* (BIENIAWSKI, 1973), Q - *Tunneling Quality Index* (BARTON et al., 1974) e GSI - *Geological Strength Index* (HOEK., 1994).

#### 6.1.1. RQD Volumétrico

O RQD (*Rock Quality Designation*) é um índice utilizado como parâmetro para alguns sistemas de classificação, embora não seja suficiente para uma descrição completa geomecânica de um maciço, foi muito utilizado em aplicações de tunelamento como um guia para seleção de suporte de túneis, segundo Bieniawski; (1989). Foi criado por Deere *et al.* (1966), com o propósito de se obter um índice numérico para estimativa da qualidade da rocha de maneira célere e eficiente, tendo como base de dados os testemunhos de sondagem dos furos feitos durante a avaliação geotécnica de um maciço, antes do início da escavação. É um processo simples, barato

e de maneira reprodutível de avaliar a qualidade do maciço rochoso (DEERE *et al.*, 1967).

De acordo com Bieniawski (1989), o cálculo desse índice é obtido através do somatório dos comprimentos das partes dos testemunhos de sondagem acima de 10 cm dividido pelo comprimento total perfurado, multiplicado por 100, de acordo com a Equação 1.1 abaixo.

$$\text{RQD} = \frac{\sum \text{pedaços de testemunho } >10 \text{ cm} \times 100 (\%)}{\text{Comprimento total perfurado}} \quad (\text{Eq.1.1})$$

As partes do testemunho de sondagem inferiores a 10 cm, são ignoradas, pois são considerados inerentes ao cisalhamento próximo, união ou intemperismo do maciço rochoso. O RQD desconsidera a orientação, tipo de descontinuidade e preenchimento. De acordo com a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM), para determinação desse índice, recomenda-se barriletes com diâmetro de 54mm.

No entanto, para a produção desse trabalho, o grau de fraturamento foi obtido através, das paredes e tetos das galerias (e em alguns afloramentos localizados próximas à mina.) e não de furos de sondagem. O RQD volumétrico proposto por Palmstrom (1982), propõe uma correlação entre RQD volumétrico e  $J_v$  (Índice volumétrico – número total de descontinuidades por unidade de comprimento), de acordo com a Equação 1.2, abaixo.

$$\text{RQD Volumétrico} = 115 - 3.3 \times J_v \quad (\text{Eq.1.2})$$

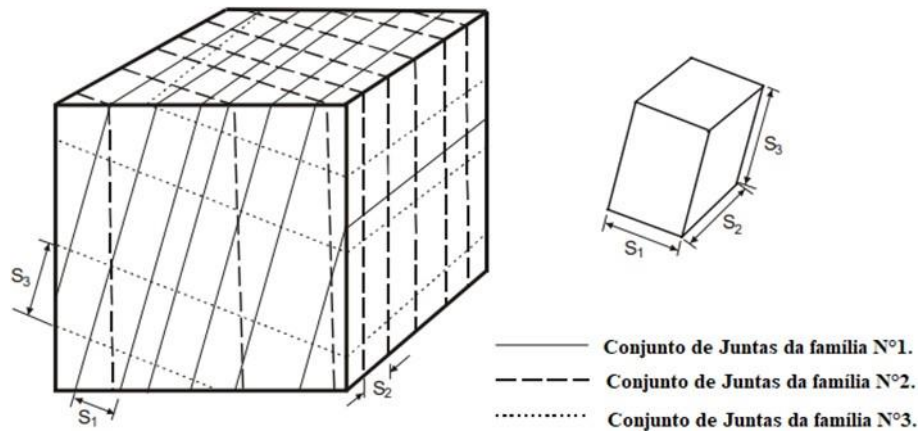
Palmstrom (1982), propôs que, quando não estivesse disponível os testemunhos de sondagem, o RQD poderia ser estimado a partir do número de descontinuidades por unidade de volume, no qual seria adicionado o número de juntas por metro para cada conjunto de juntas. Na Eq. 1.2, o  $J_v$  representa o número total de juntas por metro cúbico. O valor é obtido através do somatório do inverso do espaçamento médio ( $S$ ) das famílias de descontinuidades, Eq.1.3 abaixo.

$$J_v = 1/S_1 + 1/S_2 + 1/S_3 \quad (\text{Eq.1.3})$$

A Figura 5, representa um diagrama de blocos com três famílias de juntas, com espaçamentos  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ . A frequência de juntas (número de juntas por unidade de

comprimento) para cada conjunto será  $1/S_1$ ,  $1/S_2$  e  $1/S_3$ , respectivamente.

**Figura 5:** Diagrama em blocos com um conjunto de três famílias de juntas distintas



Fonte: Adaptado de Palmstrom, 1982

A Tabela 1, registra a relação entre o índice RQD e a qualidade da rocha, proposta por Deere (1968). Os índices obtidos são tidos como dados de entrada para uma classificação geomecânica dos maciços rochosos. Essa classificação foi utilizada como parâmetro para análise do grau de fraturamento das regiões escolhidas para o estudo.

Quadro 1- Classificação RQD

RQD (%)	Classe	Qualidade da rocha
<25	1	Muito fraco
25 - 50	2	Fraco
50 - 75	3	Razoável
75 - 90	4	Bom
90 - 100	5	Excelente

Fonte: Deere, 1968

### 6.1.2. Rock Mass Rating (RMR)

Desenvolvido por Bieniawski durante os anos 1972-1973, o sistema Rock Mass Rating (RMR) se baseou originalmente na investigação de 49 casos em 1973, em 1984 investigadas 62 minas de carvão e em 1987, foram 78 casos em túneis de construção civil e minas subterrâneas

(BIENIAWSKI, 1989).

Ao longo dos anos o sistema RMR, de Bieniawski, passou por algumas modificações; à medida que novos estudos de casos se tornaram disponíveis e em conformidade com as normas e procedimentos internacionais. O mesmo foi reajustado e embasado em 351 casos de estudos reais (BIENIAWSKI., 1989). Sua gama de aplicações ao longo do tempo apontou grande aceitação do sistema de classificação, devido a sua facilidade e versatilidade em projetos de engenharia envolvendo túneis, câmaras, declives e fundações (BIENIAWSKI, 1979).

O sistema de classificação geomecânico RMR, se baseia na atribuição de pesos, distribuídos em seis parâmetros que Bieniawski considerou ter grande relevância para o comportamento dos maciços rochosos, principalmente em obras subterrâneas, (OLIVEIRA *et al.*, 1998). Os seis parâmetros utilizados para classificar uma massa rochosa segundo o sistema de classificação RMR, estão listados abaixo e o somatório dos pesos de cada parâmetro constitui o índice RMR, de acordo com o Quadro 2.

1. Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
2. Rock Quality Designation (RQD);
3. Espaçamento das descontinuidades;
4. Condição das descontinuidades;
5. Condições da água subterrânea;
6. Orientação das descontinuidades;

Quadro 2- Parâmetros de classificação e suas classificações

Parâmetros		Coeficientes							
1	Resistência da rocha intacta	Carga pontual (Mpa)	> 10	4-10	2-4	1-2	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial (Mpa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	pesos	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2 m	0,6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	pesos		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, não contínuas, sem separação, paredes de rocha não alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes ligeiramente alteradas	Superfícies ligeiramente rugosas, separação < 1 mm, paredes muito alteradas	Superfícies polidas ou enchimento com espessura < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1 - 5 mm	Enchimento mole com espessura > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm		
	pesos		30	25	20	10	0		
5	Condições da água subterrânea	Caudal por 10 m de comprimento do túnel	Nenhum	< 10 l/min	10 - 25 l/min	25 - 125 l/min	> 125 l/min		
		Relação pressão da água vs tensão principal máxima	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
	Condições Gerais		Completamente seco	Água intersticial	Úmido	Escorrimentos	Entrada de água		
	pesos		15	10	7	4	0		

Fonte: Modificado de BIENIAWSKI, 1989



Com foco no detalhamento e melhor descrição do parâmetro 4, condição das descontinuidades, o quadro 3 abaixo trata com maior ênfase, atribuindo pesos às características relevantes como: persistência, abertura, rugosidade, preenchimento e grau de alteração, já que o Quadro 2 não descreve de maneira detalhada tais aspectos. O somatório destes pesos do Quadro 3; foi utilizada no lugar do parâmetro 4 do Quadro 2.

Quadro 3- Classificação das condições das descontinuidades, parâmetro 4

<b>Parâmetro</b>	<b>Classificação</b>				
<b>(persistência / continuidade)</b>	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
<b>Peso</b>	6	4	2	1	0
<b>Separação (abertura)</b>	Nenhuma	< 0,1 mm	0,1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
<b>Peso</b>	6	5	4	1	0
<b>Rugosidade</b>	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Liso	Polido
<b>Peso</b>	6	5	3	1	0
<b>Preenchimento</b>	Nenhum	Duro com espessura < 5 mm	Duro com espessura > 5 mm	Mole com espessura < 5 mm	Mole com espessura > 5 mm
<b>Peso</b>	6	4	2	2	0
<b>Grau de alteração</b>	Não alteradas	Ligeiramente alteradas	Moderadamente alteradas	Muito alteradas	Em decomposição
<b>Peso</b>	6	5	3	1	0

Fonte: Modificado de BIENIAWSKI, 1989

O Quadro 4 está representado o parâmetro orientação de descontinuidades, de acordo com os pesos atribuídos para essa classificação.

Quadro 4- Ajuste para orientações das descontinuidades

<b>Direção e mergulho das descontinuidades</b>		<b>Muito favorável</b>	<b>Favorável</b>	<b>Razoável</b>	<b>Desfavorável</b>	<b>Muito desfavorável</b>
<b>Pesos</b>	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-15
	Encostas	0	-5	-25	-50	-60

Fonte: Modificado de BIENIAWSKI, 1989

O Quadro 5, representa a classificação geomecânica RMR, segundo os resultados gerados na avaliação do maciço rochoso.

Quando 5- Classificação do maciço rochoso de acordo com o método RMR

RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito Bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito Fraco

Fonte: Modificado de BIENIAWSKI, 1989

### 6.1.3. *Rock Tunnelling Quality Index (Q)*

Criado na Noruega, no Instituto Geotécnico da Noruega (NGI) em 1974, por Barton, Lien e Lunde, o *Rock Tunnelling Quality Index (Q)*, teve seu desenvolvimento a partir de 212 estudos de casos de túneis com diferentes litotipos, de acordo com Barton *et al.* (1974). Com o objetivo de não apenas classificar, e sim quantificar o comportamento geomecânico de maciço rochosos, distintamente de outros sistemas de classificação como, por exemplo, o RMR, o Q-Barton é o mais sensível à avaliação da influência da resistência das descontinuidades, sendo este, o fator de maior importância para estimar o design de sistemas de suporte em escavações; (FONTES, 2016). O sistema Q é caracterizado utilizando seis parâmetros diferentes, baseado em uma avaliação numérica da qualidade do maciço rochoso.

1. Rock Quality Designation (RQD);
2. Número de famílias de fratura ( $J_n$  - joint set number);
3. Rugosidade das descontinuidades ( $J_r$  - joint roughness number);
4. Grau de alteração e preenchimento das juntas ( $J_a$  - joint alteration number);
5. Afluência de água ( $J_w$  - joint water reduction factor);
6. Estado de tensão do maciço rochoso (SRF - Stress Reduction Factor);

Na Equação 1.4 abaixo, evidencia-se todos os seis parâmetros distribuídos na multiplicação de três razões entre si, onde a razão  $RQD/J_n$  representa o tamanho dos blocos, a razão  $J_r/J_a$  representa a caracterização das condições cisalhantes inter-blocos e a razão  $J_w/SRF$  corresponde ao stress presente no maciço rochoso (BARTON *et al.*, 1974).

Os Quadros 6, 7, 8 e 9 representam os pesos atribuídos aos parâmetros que constituem o sistema Q.

$$Q = RQD/J_n \times J_r/J_a \times J_w/SRF \quad (\text{Eq.1.4})$$

Quadro 6- Classificação numérica do Jn

<b>Número de famílias de fratura (Jn) - Joint Set Number</b>	
Maciço, com nenhuma ou poucas juntas	0.5 - 1
Uma família de juntas	2
Uma família de juntas + aleatórias	3
Dois famílias de juntas	4
Dois famílias de juntas + aleatórias	6
Três famílias de juntas	9
Três famílias de juntas + aleatórias	12
Quatro ou mais famílias	15
Rocha triturada	20

Fonte: Modificado de BARTON *et al.*, 1974

Observação: **i)** Para interseções das galerias, utilizar (3.0 x Jn);

**ii)** Para portais, utilizar (2.0 x Jn);

Um dos parâmetros mais complexos, o SRF depende de testes *in-situ* para sua quantificação e caracterização das cargas atuantes no maciço rochoso, no entanto, como a lavra subterrânea de ametistas se encontra sobre uma profundidade pequena, para fins de aproximação optou-se por utilizar um valor de SRF=1 indicados para maciços com ausência de tensões *in situ*. De acordo com Barton *et al.* (1974), este valor representa condições favoráveis de estresse normal, já que a abertura não alcançou grandes profundidades que pudessem gerar a presença de *Rock Burst* (explosões de rocha gerados por tensões elevadas) ou a própria deformação das paredes e do teto, em decorrência de altos níveis de estresse. O Quadro 10 estabelece uma classificação do maciço rochoso de acordo com o sistema Q.

Quadro 7- Classificação numérica em função da qualificação Jr

<b>Rugosidade das descontinuidades (Jr) - Joint Roughness Number</b>	
<b>I – Parede das juntas em contato</b>	
<b>II – Paredes com menos de 10 cm de cisalhamento</b>	
Juntas descontinuas	4
Rugosa e irregular, ondulada	3
Lisa e ondulada	2
Estrias de fricção e ondulada	1.5
Rugosa ou irregular e plana	1.5
Lisa e Plana	1
Estrias de fricção e plana	0.5
<b>III – Sem contato entre paredes, zonas cisalhadas</b>	
Zonas contendo argilo-minerais com espessuras suficientes para impedir contato entre paredes	1

Arenosa; ou fragmentada com espessura suficiente para impedir o contato entre paredes	1
---	---

Fonte: BARTON *et al.*, 1974

Observação: i) Adiciona-se 1.0 ao parâmetro Jr se o espaçamento médio do conjunto de juntas principal for maior que 3 m;

ii) Jr = 0,5 pode ser usado para juntas planas lisas que apresentam lineações, desde que sejam favoravelmente orientadas;

Quadro 8- Classificação numérica em função da qualificação Ja

<b>Grau de alteração e preenchimento das juntas (Ja) - Joint alteration number</b>		
<b>I- Contato entre paredes sem películas</b>	<b>Φ (Aproximado)</b>	<b>Ja</b>
Selada, duro, impermeável, preenchida por quartzo, calcita, etc.	-	0,75
Paredes sãs, superfície descolorida somente.	25°- 35°	1
Parede pouco alterada, sem minerais brandos recobrando, sem argila e rocha desintegrada.	25°- 30°	2
Paredes com silte ou areno argilosa, pouca argila.	20° 25°	3
Materiais brandos com baixo atrito, argilominerais, caolinita ou micas. Também clorita, talco, gipsita, etc. e pouca quantidade de minerais expansivos.	8° - 16°	4
<b>II- Paredes com menos de 10 cm de cisalhamento, preenchimento fino</b>		
Partículas arenosas, sem argilominerais e rocha decomposta.	25°- 30°	4
Argila rígida dura, contínua, porém < 5 mm.	16°- 4°	6
Argila pouco a medianamente consolidada, contínua, porém < 5 mm.	12°-16°	8
Argilominerais expansivos, esmectitas, contínua, porém < 5 mm; valor de Ja dependerá da % de argila expansivas e acesso a água., etc.	6°- 12°	8-12
<b>III- sem contato entre paredes, zonas cisalhadas</b>		
Zonas ou bandas desintegradas, rocha fragmentada e argila.	6°- 24°	6, 8, ou 8-12
Zonas ou bandas de silte ou argilo arenoso e pouco argilominerais, dura.	-	5
Espessa, contínua zona ou banda de argila.	6°- 24°	10, 13 ou 13 - 20

Fonte: Modificado de BARTON *et al.*, 1974

Quadro 9- Classificação numérica em função da qualificação Jw

<b>Afluência de água (Jw) - Joint water reduction factor</b>	
	<b>Jw</b>
Escavação seca ou gotejamento, < 5 l/min localmente	1
Vazão média ou pressão, pode lavar o preenchimento	0.66
Vazão alta ou alta pressão em rocha competente e juntas não preenchidas	0.5
Vazão alta ou pressão, considerável lavagem das juntas	0.33
Excepcionais vazões após a detonação, caindo no tempo	0.2-0.1
Excepcionais vazões após a detonação, sem diminuição significativa	0.1- 0.05

Fonte: Modificado de BARTON *et al.*, 1974

Quadro 10- Classificação do maciço rochoso de acordo com o sistema Q

<b>Q</b>	<b>Classe</b>	<b>Descrição</b>
400 a 1000	I	Excepcionalmente bom
100 a 400	II	Extremamente bom
40 a 100	III	Muito bom
10 a 40	IV	Bom
4 a 10	V	Razoável
1 a 4	VI	Fraco
0,1 a 1	VII	Muito fraco
0,1 a 0,01	VIII	Extremamente fraco
0,001 a 0,01	IX	Excepcionalmente fraco

Fonte: Modificado de BARTON *et al.*, 1974

#### **6.1.4. Índice de Resistência Geológica (GSI)**

Resultado de anos de discussões entre geólogos, com quem E. Hoek manteve contato em todo o mundo, o GSI (“*Geological Strength Index*”) teve seu início em Toronto, com dados de geologia de engenharia de David Wood (HOEK *et al.* 1992). Desde 1998, Evert Hoek e Paul Marinos, através de experiências com materiais difíceis encontrados em túneis na Grécia, desenvolveram o sistema GSI até a sua forma atual, para incluir maciços rochosos de baixa qualidade e que também estenderam sua aplicação para maciços rochosos heterogêneos. (HOEK *et al.*, (1998); MARINOS e HOEK (2000, 2001)).

A essência da classificação GSI é uma descrição geológica de engenharia aplicada a um maciço rochoso que é essencialmente qualitativa, já que os números associados aos sistemas RMR e Q eram amplamente insignificantes para maciços rochosos fracos e heterogêneos, como

descrito na Figura 6 (MARINHOS & HOEK, 2005).

Os sistemas de classificação RMR e Q são fortemente dependentes da classificação RQD introduzida por Deere (1964), e como o RQD para a grande maioria de maciços fracos é próximo de zero ou sem sentido, tornou-se necessária a consideração de um sistema de classificação alternativo que enfatizasse as observações geológicas básicas das características do maciço rochoso, refletindo o material, sua estrutura e sua história geológica (MARINHOS & HOEK, 2005).

O GSI é baseado em uma avaliação da litologia, estrutura e condição das superfícies das discontinuidades no maciço rochoso e é estimado através do diagnóstico visual do maciço exposto em afloramentos, escavações na superfície, corte de estradas e em facéis de túneis e núcleos de sondagens como descrito na Figura 6 (MARINHOS & HOEK, 2005).







Este índice permite a obtenção de dados relativos às propriedades dos maciços rochosos, dados necessários para simulações numéricas ou que permitem o dimensionamento de estruturas como túneis, taludes ou fundações rochosas. O caráter geológico do material rochoso, juntamente com o diagnóstico visual é usado como uma entrada direta para a seleção de parâmetros relevantes para a previsão da resistência e deformabilidade do maciço rochoso. (HOEK *et al.*, 1992).

A utilização do sistema GSI não é recomendada nos seguintes casos: em maciços rochosos resistentes com poucas discontinuidades espaçadas de grande extensão ou que detenham comportamento mecânico anisotrópico; e quando o maciço rochoso for muito pobre e extremamente cisalhado com  $GSI < 35$ . O sistema GSI é baseado na hipótese de que a massa rochosa possui um número suficiente de discontinuidades orientadas aleatoriamente de modo que se comporte como uma massa isotrópica (MARINHOS & HOEK, 2005).

Considerado eficiente para uso na engenharia; o GSI permite que os aspectos múltiplos da rocha sejam quantificados, aprimorando a lógica geológica e reduzindo as incertezas da engenharia. O comportamento do maciço rochoso pode ser explanado de forma mais clara, já que sua utilização permite a avaliação das variáveis que compõem o maciço. Tal sistema permite ajustes das suas classificações para abranger uma ampla gama de maciços e condições, e que também aceita entender os limites de sua aplicação.

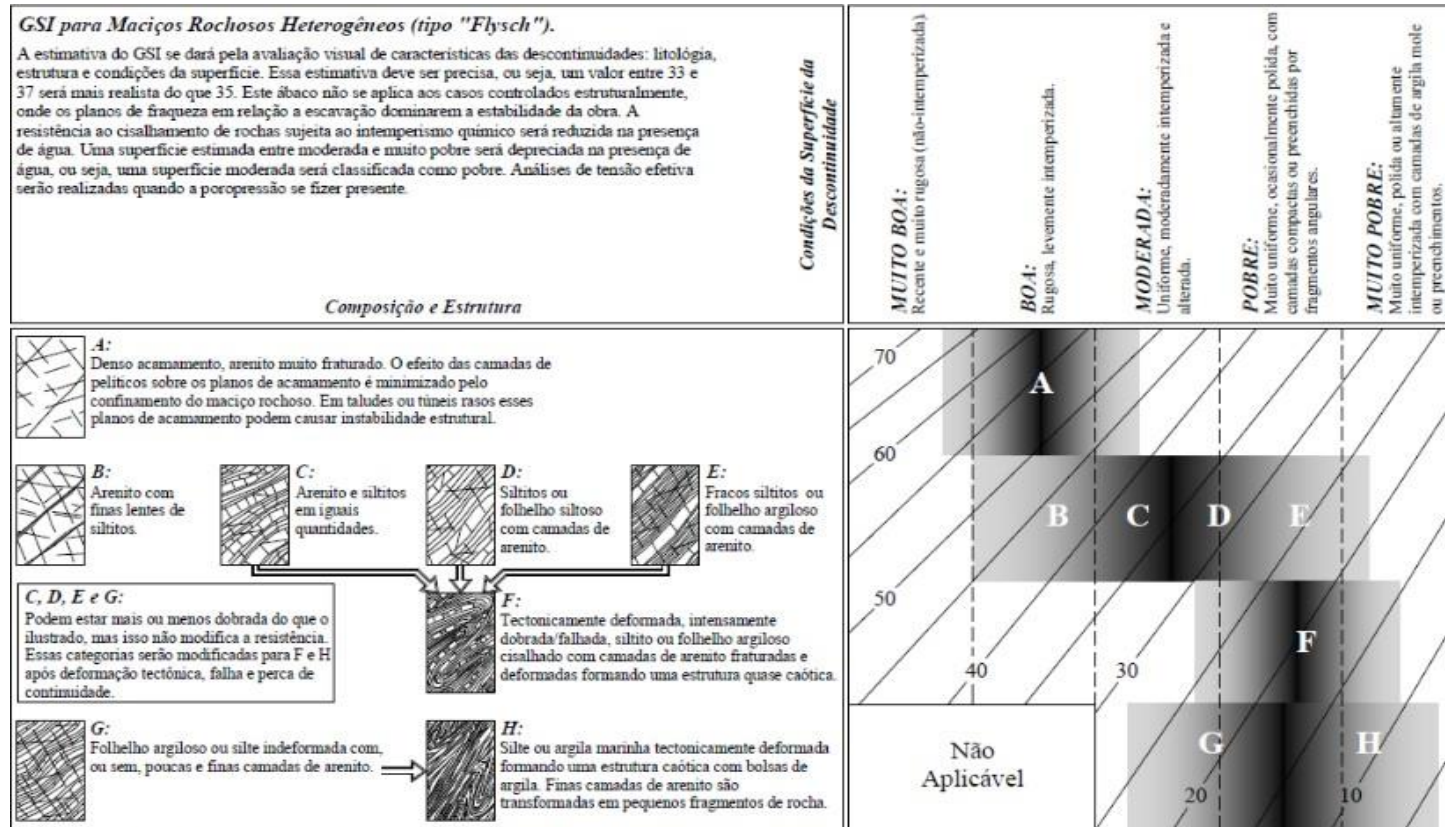


Figura 6: Índice de resistência geológica (GSI) para maciços rochosos

<p>ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICA PARA MACIÇOS FRATURADOS (Hoek &amp; Marinos, 2000)</p> <p>A partir da litologia, estrutura e condições da superfície das discontinuidades, estima-se o valor médio de GSI. Não tente ser tão preciso. Citar um alcance de 33 a 37 é mais realístico do que afirmar que GSI = 35. Observe que a tabela não é aplicável a rupturas controladas estruturalmente. Onde existir planos estruturais de fraqueza com orientação desfavorável em relação à face da escavação, estes controlarão o comportamento do maciço rochoso. A resistência ao cisalhamento de superfícies rochosas propensas a sofrer deterioração com as variações de umidade será reduzida quando existir presença de água. Quando trabalhar com rochas de categoria razoável a muito pobre, um deslocamento para a direita pode ser feito em condições de saturação. Pressão de água é avaliada através de análises de tensão efetiva.</p>		CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE				
ESTRUTURA		MUITO BOA Muito rugosa, superfícies são não intemperizadas	BOA Rugosa, levemente intemperizada, superfícies manchadas de ferro ("enferrujadas")	RAZOÁVEL Lisa, superfícies moderadamente intemperizadas e alteradas	POBRE Polidas, superfícies altamente intemperizadas com camadas compactas ou preenchimentos ou fragmentos angulares	MUITO POBRE Polidas, superfícies altamente intemperizadas com camadas de argila mole ou preenchimentos
		DECRÉSCIMO DA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE →				
<p>DECRÉSCIMO DO INTERTRAVAMENTO DE BLOCOS ROCHOSOS ↓</p>	 <p>INTACTA OU MACIÇA – rocha intacta ou maciça com poucas discontinuidades, largamente espaçadas</p>	90	80		N/A	N/A
	 <p>FRATURADA – maciço rochoso bem intertravado não perturbado constituído por blocos cúbicos formados por três famílias de discontinuidades que se interceptam</p>		70			
	 <p>MUITO FRATURADA – intertravado, maciço parcialmente perturbado com blocos angulares com várias faces formados por quatro ou mais famílias de discontinuidades</p>		60			
	 <p>FRATURADA/PERTURBADA/"COSTURADA" – dobrada com blocos angulares formados por muitas famílias de discontinuidades interceptadas. Persistência de planos de acamamentos ou xistosidades</p>		50			
	 <p>DESINTEGRADA – pobremente intertravada, maciço rochoso intensamente quebrado, com uma mistura de pedaços rochosos angulares e arredondados</p>		40		30	
	 <p>LAMINADA/CISALHADA – ausência de blocos devido ao estreito espaçamento de xistosidades fracas ou planos de cisalhamento</p>	N/A	N/A		20	10

Fonte: MARINOS *et al.*, 2005

**Figura 7:** Índice de resistência geológica (GSI) para maciços rochosos heterogêneos



Fonte: Marinos & Hoek., 2000



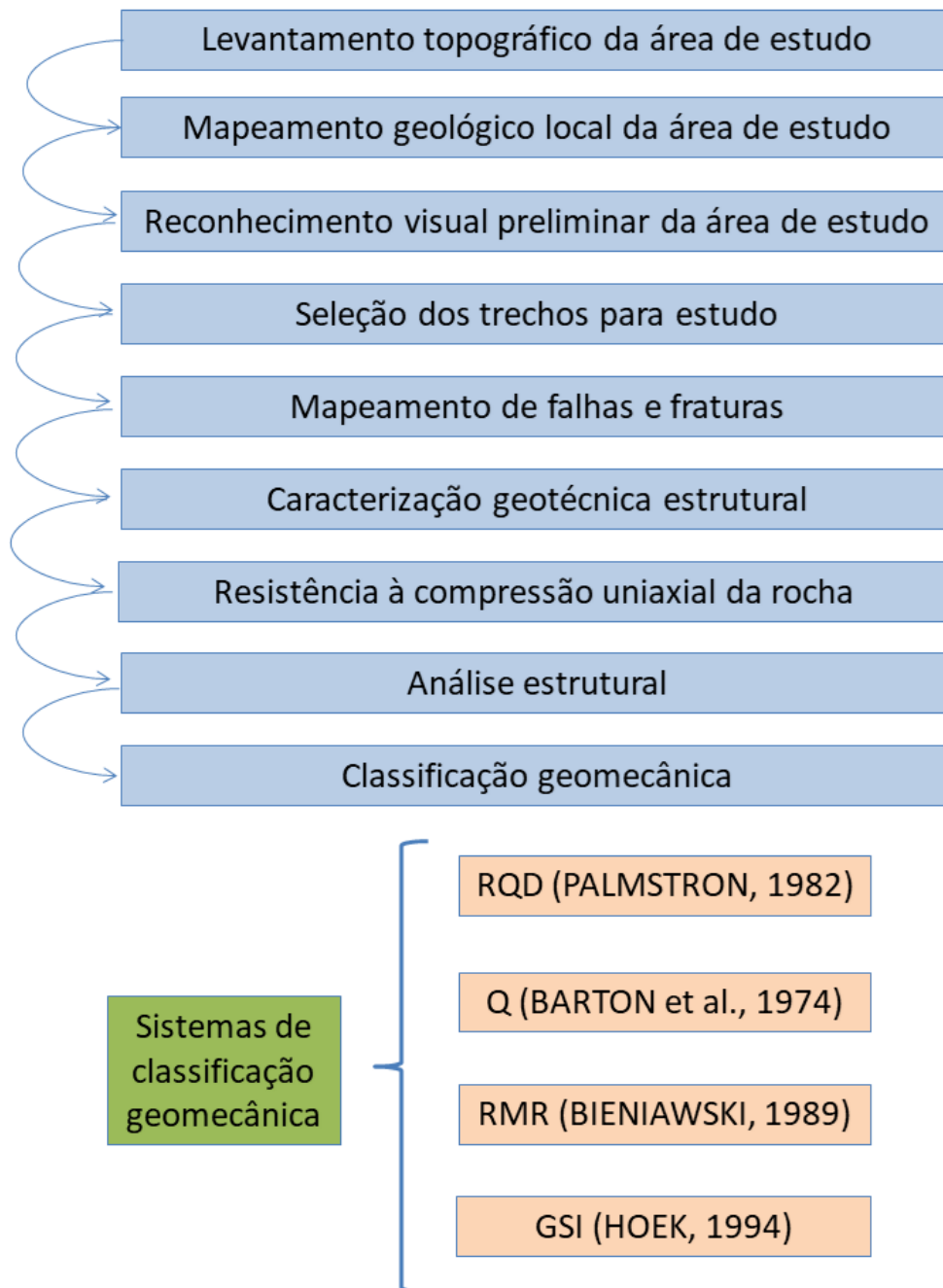
#### *6.1.4.1. Maciços rochosos heterogêneos*

O ábaco do GSI para maciços rochosos heterogêneos (tipo “flysch”), representado pela Figura 7, foi proposto por Marinatos & Hoek (2000) com o objetivo de descrever importantes variáveis do maciço rochoso. Tais variáveis podem estar presentes em maciços rochosos de pobre qualidade e extremamente cisalhados compostos por materiais xistosos (siltitos, xistos argilosos ou filitos), bem como, maciços rochosos onde tenham a presença de acamamentos de rochas duras (arenitos, calcários ou quartzitos).

## 7. MATERIAIS E METODOLOGIA

Com o objetivo de descrever todos os métodos e as etapas para a classificação geomecânica da antiga mineração artesanal este capítulo detalha as etapas desenvolvidas ao longo de todo o processo. O fluxograma abaixo representado pela Figura 8 ilustra a sequência das atividades desenvolvidas.

**Figura 8:** Fluxograma com as principais etapas da classificação geomecânica



Fonte: Modificado de (ALBERTO. L, 2016)

## 7.1. Levantamento topográfico da área de estudo

O modelo digital do terreno, conhecido como MDT, auxilia na visualização da superfície terrestre em três dimensões e representa o comportamento de um fenômeno que ocorre em uma região da superfície terrestre (FELGUEIRAS, 2002). Sua importância é indiscutível, já que existem inúmeras aplicações na área de geoprocessamento no ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), neste trabalho, o MDT foi obtido através da aquisição de imagens ALOS PALSAR/NASA que possuem resolução espacial de 12,5 metros e do Google Earth Pro.

O modelo digital de terreno, de acordo com (FELGUEIRAS,1999) possibilita as seguintes análises:

- I. Geração de imagens sombreadas e temáticas;
- II. Cálculos de volumes de aterros e corte;
- III. Análises de perfis sobre trajetórias;
- IV. Mapas derivados como de declividade, exposição, curva de nível e de visibilidade; No entanto, para esse trabalho o objetivo principal foi expressar a topografia local, onde está situado a antiga mineração artesanal de ametistas e discutir a respeito dos fenômenos geológicos associados a esta configuração topográfica.

Para construção desse mapa utilizou-se o QGIS *software version 3.8.3* para aplicação de técnicas de geoprocessamento e tratamento de imagens de satélite, durante a construção do mapa hipsométrico prezou-se pelo uso de imagens de satélites de alta resolução espacial, pois dessa forma se obteria uma melhor qualidade na imagem topográfica da área. Com uma resolução espacial de 12,5 metros a imagem de satélite ALOS PALSAR foi obtida através da plataforma *ASF DATA SEARCH* vinculada a NASA, após o download da imagem de satélite prosseguiu-se com as técnicas de geoprocessamento *Hillshade* para criação de um relevo sombreado que realçaria as formações geológicas com ênfase na altimetria.

## 7.2. Mapeamento geológico local da área de estudo

O mapeamento geológico local trata-se do conjunto de atividades, que visam a realização e o registro de observações geológicas objetivas em campo (LISLE, R. J.; BRABHAM, Peter J.; BARNES, J. W., 2014). A primeira etapa do mapeamento consistiu em uma seleção de afloramentos e pontos através de imagens de satélite, com a utilização do Google Earth, para seleção de possíveis alvos a serem avaliados e reconhecidos de acordo com as Figuras 9 e 10, com os objetivos de analisar:

- I. Tipo de rocha;
- II. Estrutura geral da textura, composição e granulometria;
- III. Condições das fraturas, juntas, falhas, fissuras;
- IV. Intemperismo;

### 7.2.1. Medições em campo

Um dos objetivos do mapeamento foi elucidar as estruturas da região estudada. Foram realizadas medições da atitude das estruturas planas conforme apresenta a Figura 9, com enfoque na direção, mergulho e sentido de mergulho de tais estruturas.

**Figura 9:** Medição das discontinuidades do maciço rochoso.



Fonte: Autor, 2021

Também foram feitos registros das características dos afloramentos através de fotos com

escala e identificação, muito importantes para análise do tipo de rocha, identificação do estado de alteração e condições de fraturas, juntas e falhas, Figura 10.

**Figura 10:** Registro dos afloramentos, com elementos de escala e identificação



Fonte: Autor, 2021

### **7.3. Reconhecimento visual preliminar da área de estudo**

Para seleção das janelas (trechos para análise geomecânica) escolhidas para o levantamento de dados foi realizado um reconhecimento visual preliminar, com o objetivo de identificar os trechos com características geomecânicas semelhantes. As características levadas em consideração visualmente foram: litotipo, grau de faturamento, número e tipo de descontinuidades predominantes e tamanho dos blocos.

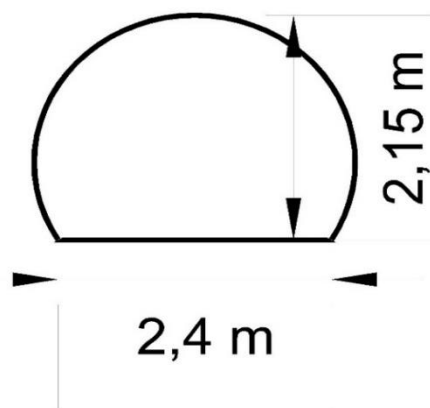
### **7.4. Seleção dos trechos para estudo**

Para seleção das janelas foram considerados os trechos mais próximos da embocadura da galeria, ou seja, foram analisados os 10 metros iniciais da abertura subterrânea como forma de prevenção a acidentes durante a análise geomecânica das janelas. Optando-se por trechos homogêneos, de forma que as classificações geomecânicas fossem atribuídas de maneira mais representativa possível.

O levantamento buscou escolher os trechos que mais penalizariam o maciço rochoso, de tal forma que, cada janela possuísse 1 metro quadrado para análise sendo analisada a parte mais penalizada dentro da janela, pois de acordo com os trabalhos de Bieniawski; (1989) & SALA, Leonardo Alberto, (2016) é suficiente para analisar tais características. Após selecionadas as janelas de tamanhos definidos, prosseguiram-se os trabalhos de coletas de dados e o mapeamento das mesmas para a classificação geomecânica.



**Figura 11:** Foto da galeria estudada, e seção transversal ilustrando suas dimensões



Fonte: Autor, 2021

#### **7.4.1. Análise das descontinuidades e coleta de dados ordenada**

As descontinuidades são planos de fraqueza na rocha, onde o material rochoso apresenta-se estruturalmente descontínuo e com menor resistência ao cisalhamento, podendo a resistência ser nula, dependendo de características como frequência e natureza do preenchimento das mesmas (FIORI, A; 2016).

Muitos estudiosos perceberam que a resistência de um maciço rochoso depende mais das suas descontinuidades do que propriamente da resistência da rocha intacta, por isso, a grande importância de um estudo detalhado das características geométricas e espaciais das mesmas, para estudar a estabilidade de um determinado maciço rochoso.

De acordo com Fiori, A.; (2016), as descontinuidades podem ser de diferentes tipos como falhas, juntas, planos de acamamento, laminação, planos de foliação, zonas de cisalhamento, fendas de tração, veios ou diques. Para o estudo da influência dessas estruturas

no comportamento estrutural de um maciço rochoso é necessário levar em consideração fatores como natureza da descontinuidade, abertura, espaçamento, frequência, orientação, rugosidade, persistência ou extensão, grau de alteração e a presença de água, já que apenas a resistência à compressão de uma amostra de rocha intacta não é o suficiente para análise de estabilidade.

Os polos das descontinuidades foram plotados em um diagrama de igual área, e as direções, em um diagrama de rosetas. Este tratamento de dados foi feito com auxílio do *software Stereonet e App visible geology*.

### **7.5. Mapeamento de falhas e fraturas**

As falhas são descontinuidades com deslocamento paralelo às suas paredes e geradas por mecanismos de deformação rúptil (FOSSEN, H., 2012). Tais estruturas assim como as fraturas, são superfícies num volume de rocha onde não se observa deslocamento perpendicular à estrutura, que influenciam diretamente no grau de faturamento de um maciço rochoso, tendo como resultado, sua instabilidade geomecânica. O mapeamento dessas estruturas foi um procedimento utilizado para identificação e delimitação de zonas de cisalhamento, as falhas foram caracterizadas segundo atitude (bússola Brunton), quanto ao tipo de rejeito, foram classificadas em normal, inversa, transcorrente ou oblíqua. Com relação ao tipo de preenchimento classificaram-se em não existente, grafita, gouge ou brecha. Já quanto às espessuras, as mais significativas (>30m).

### **7.6. Caracterização geotécnica estrutural**

Destacando principalmente a caracterização das descontinuidades, a análise dos trechos e afloramentos, foram descritas seguindo os parâmetros litológicos, geotécnicos e estruturais, como espaçamento, frequência, persistência, rugosidade, abertura de juntas e resistência ao cisalhamento do material que as preenche (BARTON *et al.*, 1974; BIENIAWSKI, 1989).

A resistência do maciço rochoso depende de um ou mais desses fatores, a orientação espacial é expressa em termos de sua direção e mergulho, aferidas com o auxílio de uma bússola, a influência da orientação é evidenciada no deslizamento de blocos de rocha em vertentes ou taludes ao longo de uma ou mais descontinuidades segundo Fiori. A.; (2016). O espaçamento ou frequência expresso abaixo pela Equação 1.5, das descontinuidades é definido em termos da distância média entre as descontinuidades, onde as medidas devem ser realizadas ao longo de três direções mutuamente perpendiculares, tomadas ao longo de linhas de varredura.

$$Fd = N/L \qquad \text{Eq. (1.5)}$$



Onde a frequência ( $F_d$ ) é tida como número de juntas por metro de linha de varredura, e o  $N$  é o número de traços de descontinuidades interceptadas pela linha de varredura e  $L$  é o comprimento em metros da linha de varredura.

O espaçamento médio ( $E_d$ ) expresso pela Equação 1.6 abaixo, ou distância média entre as descontinuidades, é representado pelo inverso da frequência ( $F_d$ ) e é obtida com a seguinte relação:

$$E_d = 1/F_d \quad \text{Eq. (1.6)}$$

A frequência de descontinuidades influencia diretamente na qualidade ou resistência do maciço rochoso, mesmo a rocha com alta resistência intacta, sua resistência será reduzida a uma massa pouco resistente quando sujeita a uma numerosa quantidade de juntas ou com espaçamento médio muito denso das mesmas segundo Fiori. A.; (2016). Porém, em maciços rochosos com espaçamentos médios de juntas grandes, seu comportamento será controlado fortemente pelas características da rocha intacta.

Outra característica geométrica muito importante é a persistência ou extensão da fratura/junta, sendo estas definidas pelo comprimento do traço da descontinuidade nos afloramentos. A rugosidade, característica geométrica não menos importante, trata-se de uma característica muito relevante no comportamento da resistência ao cisalhamento, principalmente nos casos de juntas não preenchidas. Definida por Deere *et al*, (1967), como irregularidades de segunda ordem, a rugosidade são variações de relevo que se pode dar em uma superfície.

Por fim, a abertura de uma junta, pode ser expressa em termos da distância média de afastamento dos blocos adjacentes ou o espaço entre as paredes da junta. Podem ser fechadas, mas, caso haja aberturas pode haver a percolação de água, alterações de suas paredes e preenchimento por algum tipo de mineral ou material.

## **7.7. Resistência à compressão uniaxial da rocha**

A configuração da resistência de um maciço rochoso está relacionada com a capacidade que o mesmo tem, em absorver uma determinada tensão sem sofrer deformações que possam

gerar rupturas (BROW E.T., 1981). Tal resistência depende de uma série de fatores, mas, sobretudo a coesão entre os minerais e a composição mineralógica, temos como exemplo a comparação da resistência entre uma rocha gnáissica e uma rocha sedimentar, cuja estratificação e suas descontinuidades induzem em sua menor resistência em relação ao gnaisses segundo Fiori. A.; (2016).

Determinada através de ensaios de campo, ensaios de laboratório ou através de análises expeditas por meios empíricos desenvolvidos ao longo de décadas, a obtenção dos valores de resistência da rocha torna-se imprescindível para processos de classificação dos maciços rochosos, que são insumo para cálculos de fatores de segurança para estruturas de rocha. Temos no quadro 11 abaixo, uma estimativa de compressão uniaxial, obtido através de experiências profissionais, publicada e utilizada sistematicamente por vários profissionais da área de mecânica de rochas.

Quadro 11: Estimativas de resistências à compressão uniaxial

<b>GRAU</b>	<b>DESIGNAÇÃO</b>	<b><math>\sigma_c</math> (Mpa)</b>	<b>ANÁLISE EXPEDIDA</b>
R6	Extremamente resistente	>250	A rocha lasca depois de sucessivos golpes de martelo e ressoa quando batida
R5	Muito resistente	100 a 250	Requer muitos golpes de martelo para quebrar pedaços da rocha
R4	Resistente	50 a 100	Pequenos pedaços de rocha seguros com a mão são partidos com um único golpe de martelo
R3	Medianamente resistente	25 a 50	Um golpe firme com a ponta do martelo geológico faz sulcos de até 5mm; o canivete consegue raspar a superfície da rocha
R2	Branda	5 a 25	Canivete corta a amostra
R1	Muito branda	1 a 5	Esmigalha-se com o impacto da ponta do martelo, pode ser raspada com o canivete
R0	Extremamente branda	0.25 a 1	Pode ser marcado com a unha

Fonte: Modificado de Brow E.T., 1981

### 7.8. Análise estrutural

No campo da geologia e engenharia, os dados de atitudes tridimensionais, como fraturas, falhas, estratificações, foliações, dentre outros geralmente são projetados em duas dimensões através das projeções estereográficas ou estereogramas. De acordo com os métodos existentes para analisar os dados de medidas estruturais, temos: diagrama de roseta, histograma

e as projeções estereográficas. As projeções estereográficas utilizadas nesse estudo tratam-se da representação da atitude de estruturas planas e lineares em um diagrama de duas dimensões, ou seja, a atitude de um plano é representada ao imaginarmos que esse plano atravessa o centro de uma esfera (FOSSEN, H., 2012).

### **7.9. Materiais utilizados**

Para realização da coleta dos dados referentes ao mapeamento geológico-geotécnico da mineração artesanal localizado na cidade de Tauá-CE, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- I. Bússola geológica, tipo Brunton;
- II. GPS de mão da marca Garmin, modelo Map 64S;
- III. Trena curta de 10 metros;
- IV. Régua graduada;
- V. Caderneta geológica;
- VI. *Spray* com tinta preta removível;
- VII. Martelo geológico da marca Estwing; e
- VIII. Lupa de bolso com ampliação de 20x;

## **8. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através da metodologia aplicada, bem como, a discussão referente aos resultados gerados.

### **8.1. Geologia local**

A antiga lavra artesanal localizada a Oeste da sede municipal de Tauá está inserida no Serrote do Quinamuiú Figura 12, a elevação formada no passado geológico pela orogênese Brasileira/Pan-Africana deixou seus registros bem marcados através da Zona de Cisalhamento de Taúa (ZCT) e do magmatismo associado (CPRM, 2019).

A Figura 13 é composta por gnaisses migmatizados – migmatitos (diatexitos), pertencentes ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria, entre as unidades, segundo Torres *et al.* (2007): Granitóide Santa Quitéria (NP3gtsq) e Diatexito (NP3tsd), com estrutura foliada, granulação grossa, com alternância de bandas com minerais claros compostos por quartzo e feldspatos potássicos/plagioclásio e minerais escuros compostos por biotita e anfibólios Figura 21.

**Figura 12:** Perfil longitudinal do Serrote do Quinamuiú com direção do eixo maior do serrote NNE-SSW



Fonte: Autor, 2021

A foliação do complexo Tamboril - Santa Quitéria é incipiente a moderadamente desenvolvida, de baixo ângulo de mergulho. São comuns enclaves microgranulares máficos Figura 14, com formas irregulares, compostos por biotita, anfibólio, quartzo, plagioclásio, e não raro, contaminados por fenocristais da encaixante de acordo com Torres *et al.* (2007). Diatexitividade que corresponde a migmatitos de composição sienogranítica Figura 14, subordinamente, monzogranítica, granodiorítica, quartzo monzonítica e quartzo sienítica de acordo com Torres *et al.* (2007). São rochas leucocráticas, de coloração cinza com tons rosados, de granulação fina a média e alteração fraca. Geralmente exibem foliação incipiente ou são isotrópicos, por vezes inequigranulares porfiríticos. Localmente são observados leucognaisses migmatíticos bandados Figura 13, cortados por monzogranitos equigranulares de granulação grossa e estrutura maciça. Apresentam tanto enclaves microgranulares máficos com formas irregulares, compostos por anfibólio e plagioclásio, como de gnaisses associados a anfibolitos e rochas calcissilicáticas.

**Figura 13:** Afloramento 05 estudado representando a rocha encaixante, composta por gnaisses bandados com orientação NNE-SSW e intrusões discordantes de pegmatitos ácidos compostos por feldspatos potássicos e quartzo. Coordenadas: Longitude UTM: 354.940 m E e Latitude UTM: 9.333.998 m S, ZONA 24 S



Fonte: Autor, 2021

Conforme divisão citada pela CPRM 2016: Granitóide Santa Quitéria - representado pela Figura 14, apresenta granodioritos, monzogranitos, quartzo monzonitos e sienogranitos, de granulação média a grossa. Apresentam coloração variando de cinza claro a cinza com tons rosados, com baixo a moderado grau de alteração.



**Figura 14:** Afloramento 06 estudado formado por granodioritos porfíricos e paragnaisses pertencentes complexo Tamboril – Santa Quitéria. Coordenadas: Longitude UTM: 355.636 m E e Latitude UTM: 9.333.912 m S, ZONA 24

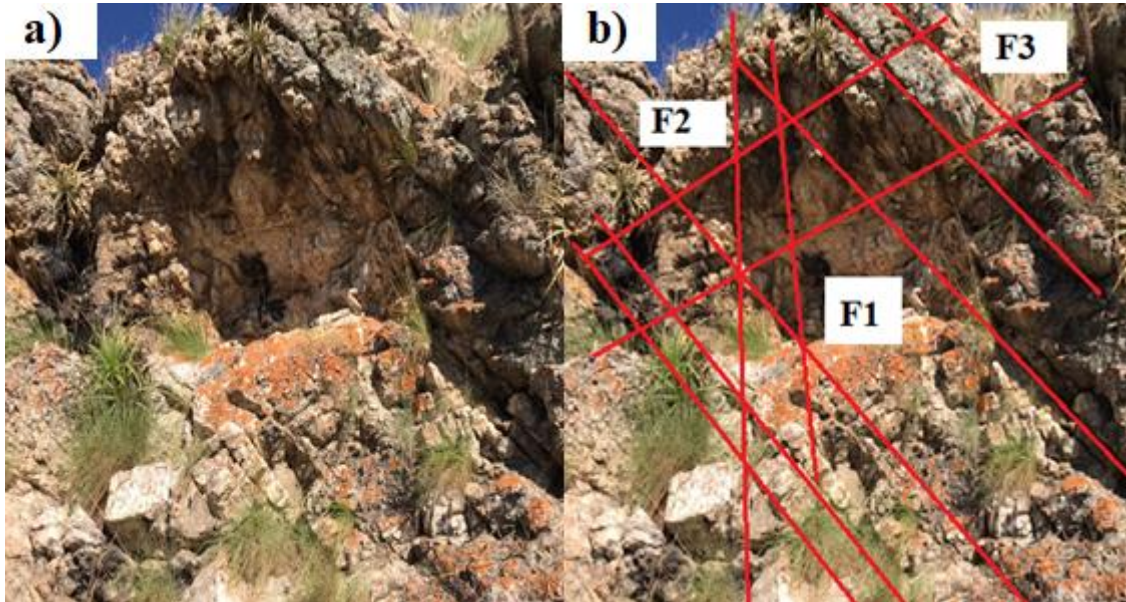


Fonte: Autor, 2021

O afloramento representado pela Figura 15, apresenta uma formação composta por riolitos constituídos essencialmente por quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino. A rocha possui textura afanítica e se apresenta com elevado grau de alteração indicadas pela presença de concreções de ferro e presença de musgo e líquen, localizadas entre as fraturas resultantes do processo de intemperismo físico e químico da rocha.

O presente afloramento é composto por três famílias de fraturas com elevadas persistências, com orientação ESE-WNW, ENE-WSW e NE-SW. O riolito compõe a geologia local na qual está inserida a antiga lavra artesanal de ametistas.

**Figura 15:** Afloramento rochoso 01 estudado formado por Riolitos. Coordenadas: Longitude UTM: 355.163 m E e Latitude UTM: 9 .334.703 m S, ZONA 24 S. a) Representação do afloramento 01, b) Interpretação com relação a presença de 3 famílias de fraturas



Fonte: Autor, 2021

O serrote Quinamuiú é composto por rochas ácidas com alto teor de sílica, apresentando coloração branca a branco marfim, com intenso fraturamento hidráulico de composição silicática, Figura 16. As rochas no serrote exibem porções com coloração avermelhada, provavelmente por produtos de alteração intempérica e concreções de óxido de ferro Figura 17. Também foi observado que nas rochas ácidas as fraturas apresentam a mesma direção do eixo maior do serrote NNE-SSW e além de exibir cavidade abertas (geódos centimétricos a milimétricos) em vários locais do afloramento, Figura 19.



**Figura 16:** Afloramento de riolitos com alto teor de sílica, apresentando coloração branca a branco marfim, com intenso fraturamento hidráulico de composição silicática destacados em vermelho



Fonte: Autor, 2021

**Figura 17:** Afloramento 02 estudado com a presença de enxames de venulações silicosas e a direita uma amostra de mão representando a rocha sã com coloração avermelhada e granulação fina. Coordenadas: Longitude UTM: 355.167 m E e Latitude UTM: 9.334.633 m S, ZONA 24 S



Fonte: Autor, 2021



**Figura 18:** Afloramento 03 estudado representando um maciço rochoso com elevado nível de alteração superficial e intenso fraturamento superficial. Coordenadas: Longitude UTM: 355.184 E m e Latitude UTM: 9.334.571 m S, ZONA 24 S



Fonte: Autor, 2021

**Figura 19:** Amostra de mão do afloramento 03 representando o padrão de venulações silicosas e indícios de fraturamento hidráulico com geódos centimétricos destacados em vermelho



Fonte: Autor, 2021

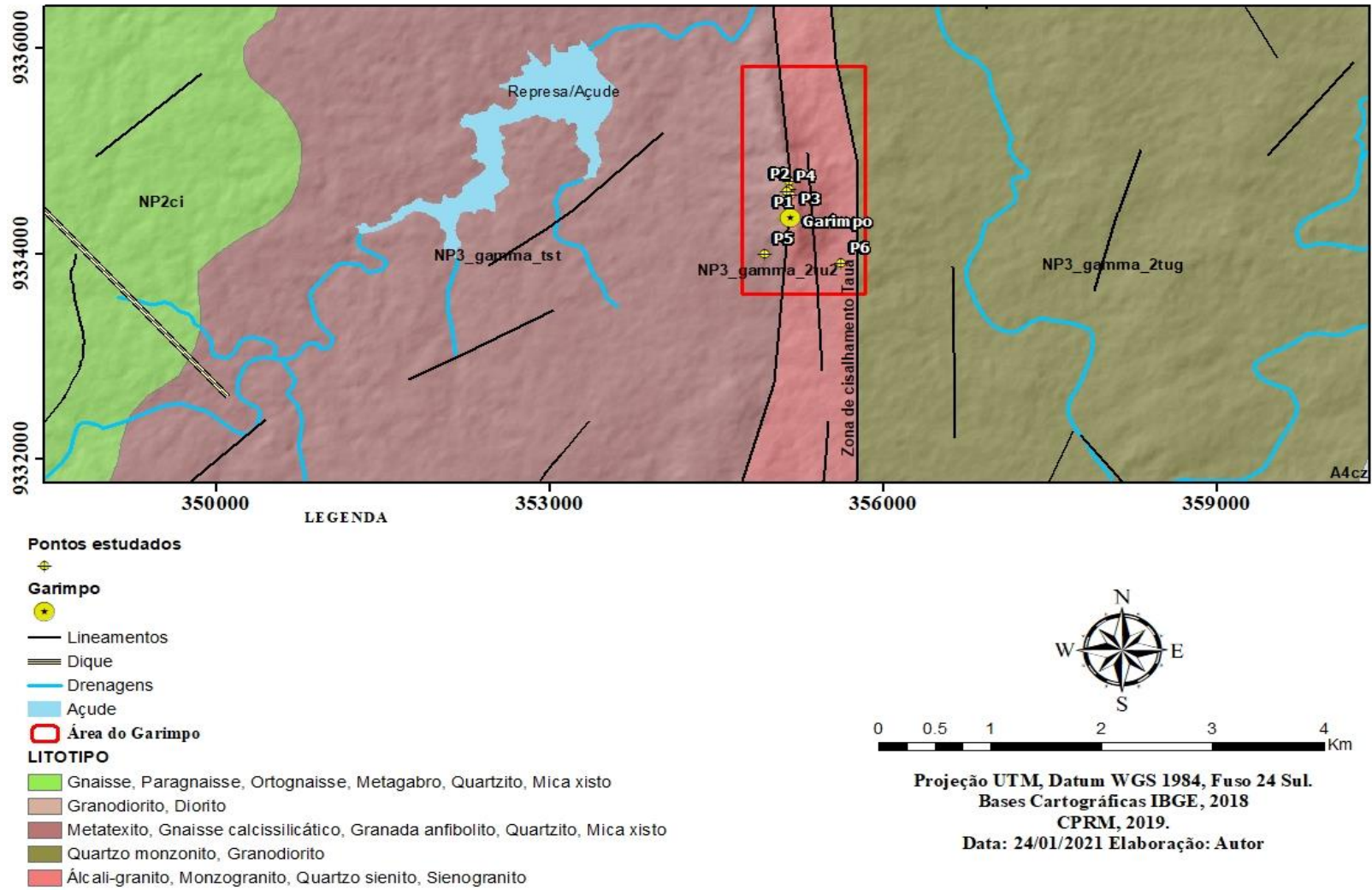
**Figura 20:** Afloramento 04 estudado com três famílias de fraturamento F1, F2 e F3 com nível elevado de persistência e orientações respectivamente ESE-WNW, NE-SW e NNE-SSW. Coordenadas: Longitude UTM: 355.155 m E e Latitude UTM: 9.334.622 m S, ZONA 24 S



Fonte: Autor, 2021



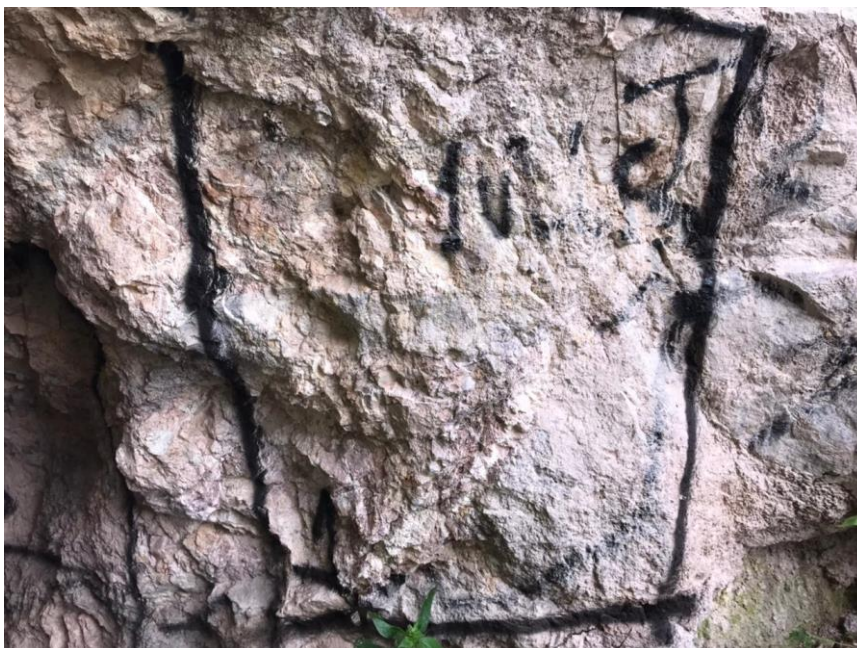
Figura 21: Mapa geológico local e afloramentos estudados



## 8.2. Caracterização geológica da rocha e das descontinuidades

Como descrito anteriormente, cada janela estudada apresenta um tamanho de análise de 1m<sup>2</sup>, sendo que foram analisados os trechos que mais penalizariam a estabilidade da galeria. A rocha destacada pela janela 1 apresenta-se em estágio forte de intemperismo, onde é possível destacar a presença de silte/argila oriundos da decomposição de minerais presentes na matriz da rocha, apresenta bastante quartzo em sua forma microcristalina com textura afanítica e forte presença de ferro na composição da rocha, destacada pela coloração e alteração. A Figura 22 representa a janela 01, a mesma está localizada próxima a embocadura da galeria, tal fato torna necessário uma maior penalização segundo o sistema de Barton, de tal forma, que seu  $J_n$  seja multiplicado por 2 para cálculo do  $Q$  de Barton. A rocha se apresenta medianamente resistente, apresentando espaçamento das descontinuidades entre 200 - 600 mm, com persistência entre 1 - 3 metros, grau de abertura entre 1-5 mm, rugosidade entre as paredes das fraturas lisa, tendo material de preenchimento mole com espessura < 5 mm e grau de alteração elevado sem a presença de água.

**Figura 22:** Janela 01, estudada

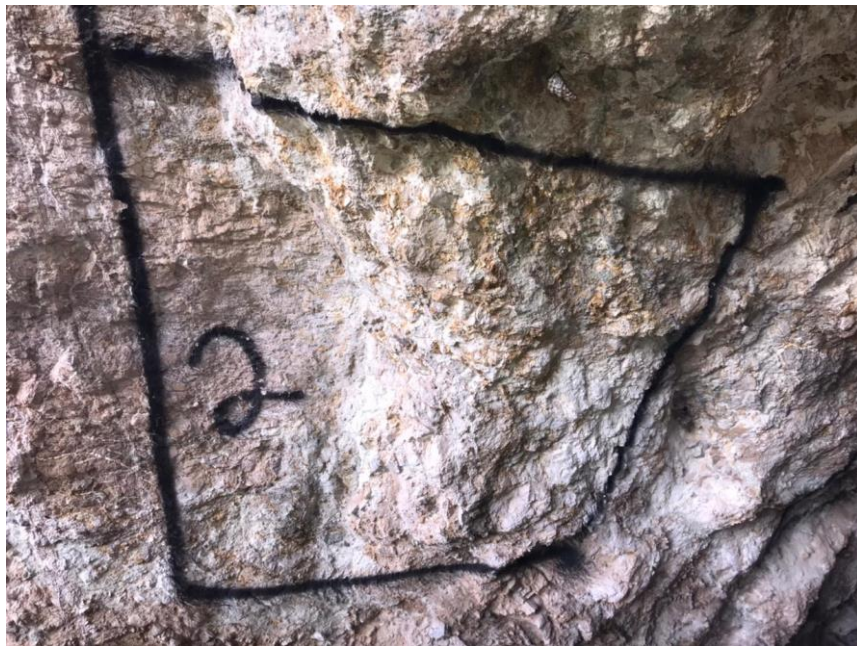


Fonte: Autor, 2021

A janela 02 representada pela Figura 23, assim como a janela 01 está localizada nas proximidades da embocadura da escavação, tal fato torna necessário que seu  $J_n$  seja multiplicado por 2 para cálculo do  $Q$  de Barton. A janela é formada por rochas medianamente

resistentes, com granulação fina, presença de bastantes minerais siltosos/argilosos oriundos do processo de alteração da rocha sã. A janela 2 apresentou espaçamento das descontinuidades entre 200 - 600 mm, com persistência entre 1-3 metros, com abertura entre 0,1-1 mm, com as paredes entre as fraturas rugosa, preenchimento mole com espessura  $> 5$  mm com grau de alteração elevado.

**Figura 23:** Janela 02, estudada



Fonte: Autor, 2021

A janela 03 representada pela Figura 24 abaixo é composta por uma rocha mais resistente diferentemente das rochas apresentadas nas janelas 01 e 02, entretanto apresentando espaçamento menor entre as descontinuidades com 60 – 200 mm, nível de persistência maior entre 3 – 10 m, abertura entre 1 – 5 mm, com as superfícies das fraturas lisas, tendo preenchimento entre as fraturas mole com espessura  $< 5$  mm e grau de alteração alto. É possível verificar a presença de uma zona contato litológico entre um material mais competente e cristalizado ao lado esquerdo e ao lado direito um material altamente alterado proveniente de uma zona de falha.



**Figura 24:** Janela 03, estudada



Fonte: Autor, 2021

A janela 04 representada pela Figura 25 assim como a janela 01 e 02 é formada por uma rocha medianamente resistente, que apresentou espaçamento das discontinuidades entre 200 - 600 mm, nível de persistência alto entre 3 - 10 metros, com grau de abertura entre 1 - 5 mm, com preenchimento das fraturas mole com espessura < 5 mm e com elevado grau de alteração apresentando estágio de decomposição.

**Figura 25:** Janela 04, estudada



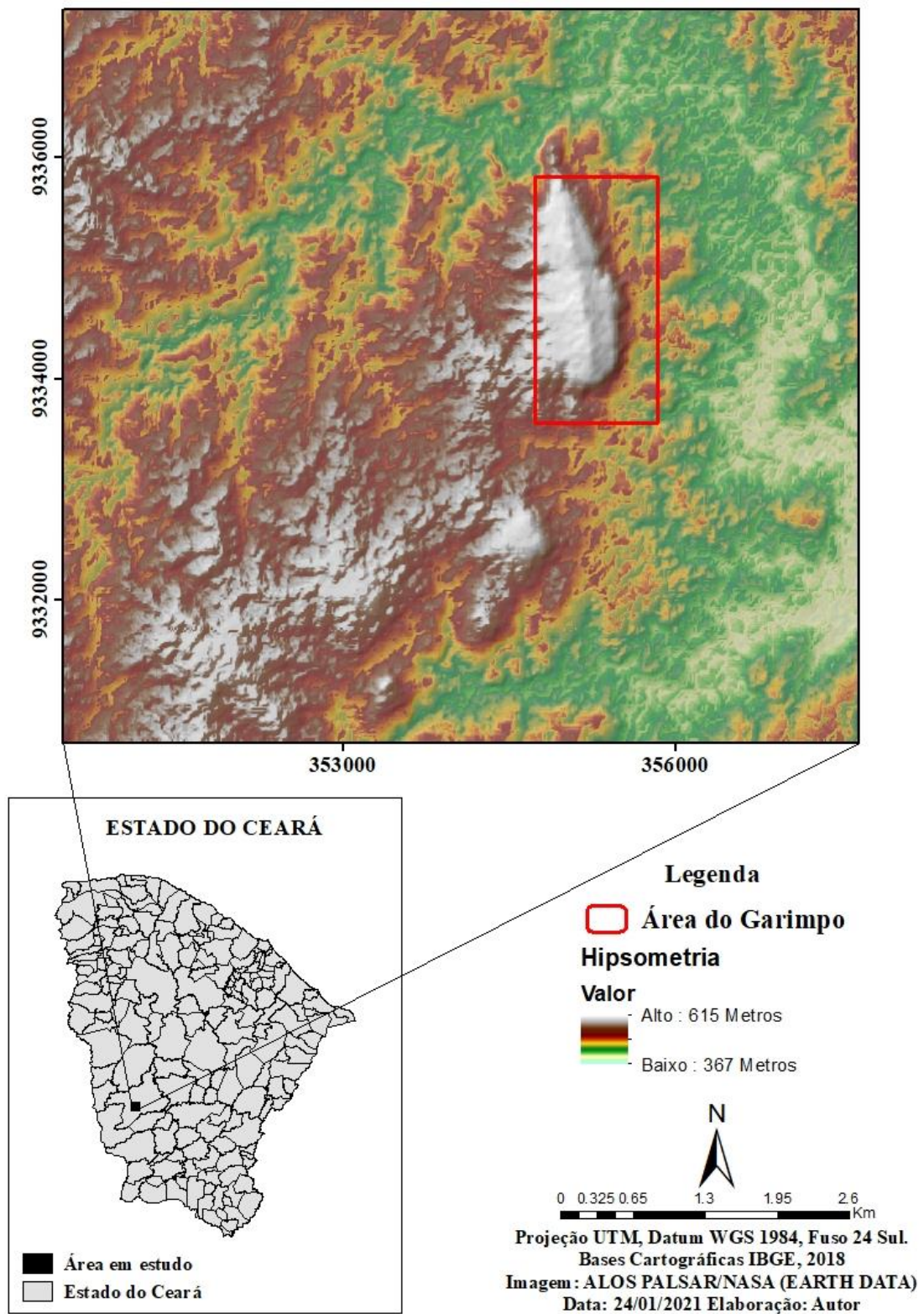
Fonte: Autor, 2021

### **8.3. Modelo topográfico da região estudada**

Após a criação do modelo sombreado criou-se o MDE “Modelo Digital de Elevação” também com as imagens ALOS PALSAR com escala de cores sobreposta ao relevo sombreado para destacar e classificar a altimetria.

O mapa teve como objetivo principal expressar a topografia local e o modelo digital do terreno, conforme está representado pela Figura 26 abaixo, onde está inserida a antiga mineração artesanal de pequeno porte de ametistas, gerando informações a respeito da formação geológica local associada a esta configuração topográfica, bem como a facilitação do entendimento a respeito da geometria do afloramento. Pode-se constatar com o mapa hipsométrico que o Serrote possui o mesmo alinhamento da zona de cisalhamento de Tauá, assim reforçando a teoria de sua formação no passado geológico pela orogênese Brasileira/Pan-Africana através da Zona de Cisalhamento de Tauá (ZCT) e do magmatismo associado. Analisando o mapa da Figura 26, notamos a continuidade da formação do serrote e seu alinhamento.

Figura 26: Mapa hipsométrico destacando a topografia local da área de estudo



Fonte: Autor, 2021



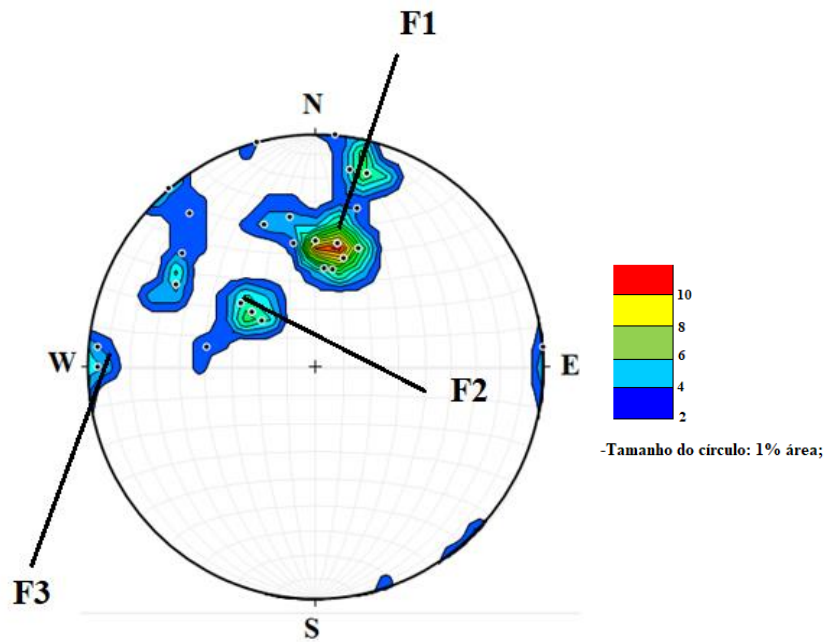
#### **8.4. Análise estrutural**

O levantamento das descontinuidades foi realizado em todo o perímetro externo e interno da antiga lavra, através do método das janelas e de análises em afloramentos para que fornecessem dados bem representativos para o estudo estrutural, sendo consideradas apenas as principais estruturas, que mais influenciariam na estabilidade da galeria, podendo ser falhas, foliações ou juntas.

De acordo com a Figura 27, pode-se constatar que a maior influência das juntas como condicionantes de instabilidades na parte externa da antiga lavra de ametistas possuem atitude média de  $098^{\circ}/50$  e  $041^{\circ}/56$  com predomínio de direção WNW-ESE evidenciado no diagrama de roseta na figura 28. Em relação ao conjunto de descontinuidades presentes no interior da galeria com o estudo das janelas, notou-se que o padrão de descontinuidades da família F1 se mostrou mais atuante tanto na parte externa da antiga lavra quanto parte interna preservando a direções, porém com ângulos de mergulho maiores com relação às famílias de descontinuidades F2 e F3 que não foram perceptíveis.

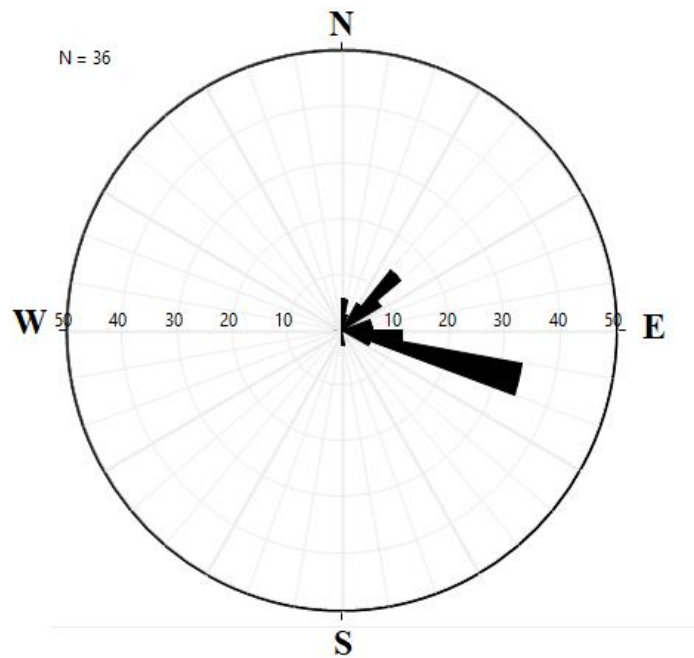
Para construção do diagrama de roseta da Figura 28 e demais análises externas foram utilizados dados de 36 medidas de descontinuidades na parte externa da mina e para análise interna da galeria foram estudadas 07 descontinuidades presentes nas janelas estudadas, Figura 33.

**Figura 27:** Estereograma representando os polos dos planos de fraturas no perímetro externo da mina, com atitude média com F1: 098°/50, F2: 041°/56 e F3: 005°/70.



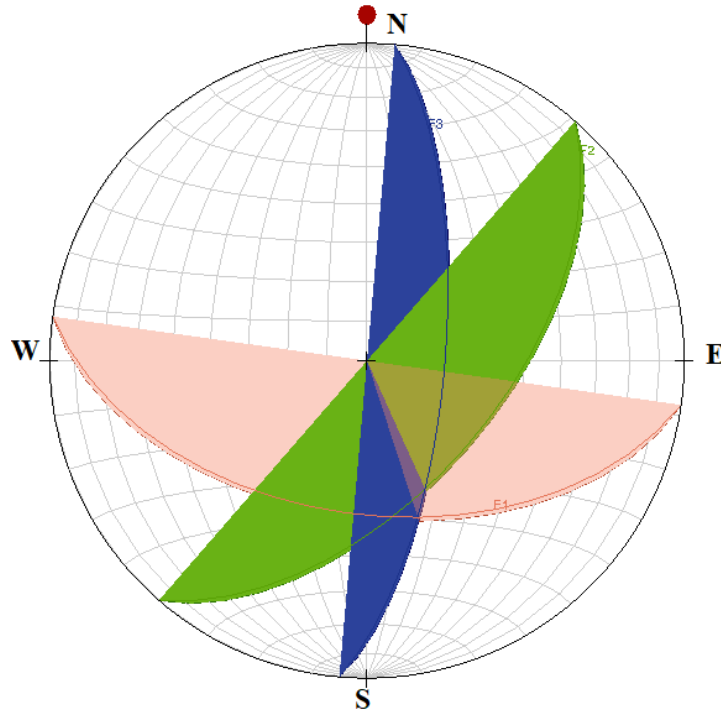
Fonte: Autor, 2021

**Figura 28:** Diagrama de rosetas apresentando a direção WNW-ESE como direção preferencial das descontinuidades estudadas, n=36



Fonte: Autor, 2021

**Figura 29:** As três famílias de fraturas F1, F2 e F3 analisadas no estudo, com atitude média de 098°/50, 041°/56 e 005°/70 respectivamente.



Fonte: Autor, 2021

*8.4.1. Família de descontinuidades 01*

As descontinuidades da Família F1 registraram a maior presença ao longo do maciço rochoso. Essas descontinuidades são recorrentes em toda a extensão do perímetro externo da antiga lavra, contando com uma direção média de S98°E e mergulho 50° NE, de acordo com a Figura 29. O Quadro 12 é formado pela direção e mergulho das descontinuidades pertencentes a F1, representativas dessa família, em conformidade com os dados representados pela Figura 27 e 29. No estereograma da Figura 31 estão plotados os planos e polos das descontinuidades da Família F1. Nota-se uma pequena variabilidade das atitudes em relação à média apresentada, demonstrando assim, valores próximos e consistentes para cada descontinuidade.

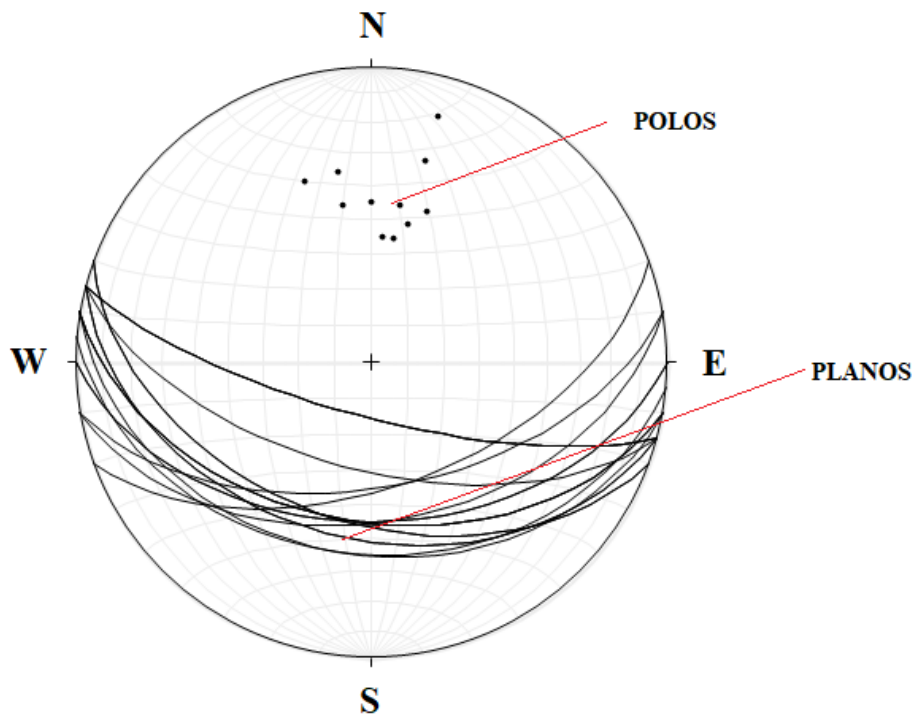
Quadro 12: Conjunto de descontinuidades pertencentes a família 1

<b>F1</b>			
<b>DIREÇÃO</b>	<b>MERGULHO</b>	<b>DIREÇÃO</b>	<b>MERGULHO</b>
100	45	80	45
90	45	105	40
70	55	105	60
100	45	105	75
95	35	110	45

100	35	105	75
80	55	105	40
100	45	105	75
90	45	110	45
100	45		

Fonte: Autor, 2021

**Figura 30:** Estereograma representando os polos dos planos de fraturas referentes a família 01



Fonte: Autor, 2021

#### 8.4.2. Família de descontinuidades 02

As descontinuidades da Família F2 registraram uma presença menor ao longo do maciço rochoso quando comparadas com a família 01, entretanto são bem significativas. Essas descontinuidades são recorrentes em toda a extensão do perímetro externo da antiga lavra, contando com uma direção média de N41°E e mergulho 56° SE, de acordo com a Figura 31. O Quadro 13 é formado pela direção e mergulho das descontinuidades pertencentes a F2, representativas dessa família, em conformidade com os dados representados pela Figura 27 e

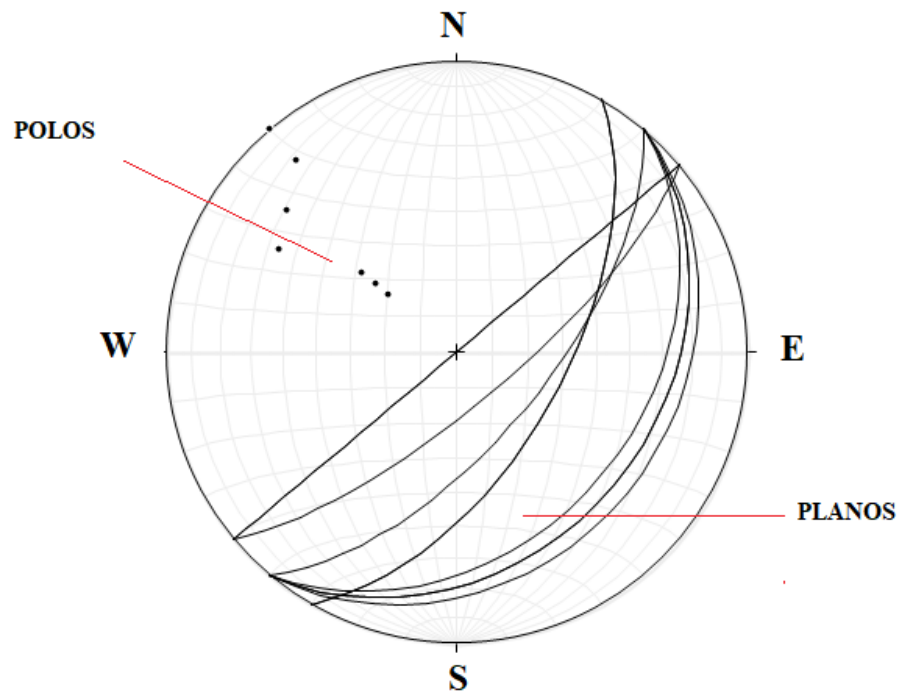
29. No estereograma da Figura 31 estão plotados os planos e polos das discontinuidades da Família F2. Nota-se uma pequena variabilidade das atitudes em relação à média apresentada, demonstrando assim, valores próximos e consistentes para cada discontinuidade.

Quadro 13: Conjunto de discontinuidades pertencentes à família 2

<b>F2</b>			
<b>DIREÇÃO</b>	<b>MERGULHO</b>	<b>DIREÇÃO</b>	<b>MERGULHO</b>
30	60	40	65
40	25	40	30
50	75	30	60
50	90	40	30
50	90	40	35

Fonte: Autor, 2021

**Figura 31:** Estereograma representando os polos dos planos de fraturas referentes à família 02



Fonte: Autor, 2021

#### 8.4.3. Família de discontinuidades 03

As discontinuidades da Família F3 registraram uma presença menor ao longo do maciço

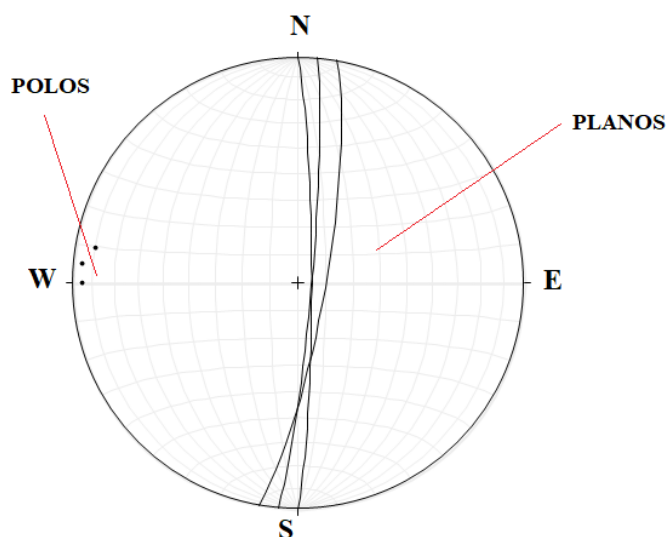
rochoso quando comparadas com a família 01 e família 02. Essas descontinuidades são recorrentes em alguns trechos do perímetro externo da antiga lavra, contando com uma direção média de N05°E e mergulho 83 ENE, de acordo com a Figura 32. O Quadro 14 é formado pela direção e mergulho das descontinuidades pertencentes a F3, representativas dessa família, em conformidade com os dados representados pela Figura 27 e 29. No estereograma da Figura 32 estão plotados os planos e polos das descontinuidades da Família F3. Nota-se uma variabilidade relativamente maior em relação às famílias F1 e F2 das atitudes em relação à média apresentada, demonstrando assim, valores próximos e consistentes para cada descontinuidade.

Quadro 14: Conjunto de descontinuidades pertencentes à família 3

<b>F3</b>	
<b>DIREÇÃO</b>	<b>MERGULHO</b>
10	80
0	85
5	85

Fonte: Autor, 2021

**Figura 32:** Estereograma representando os polos dos planos de fraturas referentes a família 03



Fonte: Autor, 2021

### 8.5. Descontinuidades estudadas no interior da galeria

Analisando o conjunto de descontinuidades presentes no interior da galeria com o estudo das janelas representadas pelas figuras 22, 23, 24 e 25, obtivemos o Quadro 15, onde notou-se



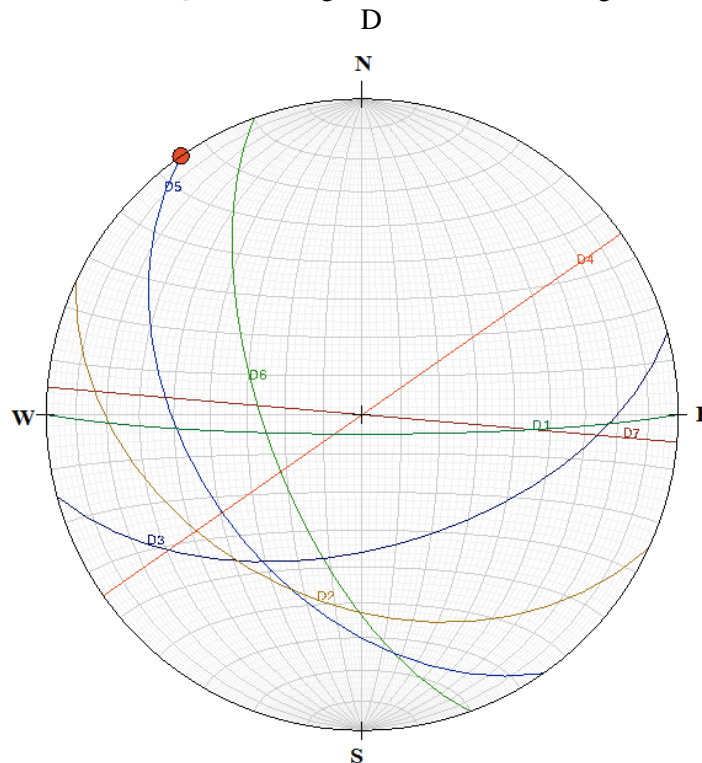
que o padrão de descontinuidades da família F1 se mostrou mais atuante preservando as direções, porém com ângulos de mergulho maiores tanto na parte externa da antiga lavra quanto parte interna, em relação às famílias de descontinuidades F2 e F3 que não foram perceptíveis.

Quadro 15: Conjunto de descontinuidades no interior da galeria analisadas nas janelas

DIREÇÃO	MERGULHO
90	85
115	40
75	55
55	VERTICAL
145	45
160	65
95	VERTICAL

Fonte: Autor, 2021

Figura 33: Descontinuidades do Quadro 15 registradas no interior da galeria, representadas pela letra



Fonte: Autor, 2021

### 8.6. Classificação geomecânica com os sistemas Q, RMR e GSI

As classificações Q, RMR e GSI com os pesos dos parâmetros adotados para obtenção de cada uma delas foram dispostos nos Quadros 16, 17 e 18, respectivamente. Cada janela foi caracterizada segundo método Q (BARTON et al., 1974), método RMR básico (SINGH;

GOEL, 1999; BIENIAWSKI, 1989) e método GSI (HOEK *et al.* 1992).

### 8.6.1. Determinação da resistência com o martelo geológico

Para o cálculo da resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso foi empregado o uso do método do martelo geológico, conforme a metodologia no Quadro 11 na seção 7.7. É um método básico passível de erros, no entanto apresenta faixas de valores que são congruentes para um estudo preliminar. Esse método foi utilizado, devido à impossibilidade de outros ensaios quantitativos, como é o caso do ensaio de resistência à compressão puntiforme e o ensaio de resistência com esclerômetro de Schmidt.

O ensaio foi realizado nas paredes das galerias examinando as rochas de cada janela estudada. Foram realizados dois testes com o martelo geológico petrográfico Estwing em cada janela, nos quais determinou-se a quantidade média de golpes necessários para fraturar a amostra de rocha, caracterizando-a conforme o Quadro 11. As janelas 1, 2 e 4 apresentaram resistência entre 25 – 50 Mpa sendo caracterizada como uma rocha medianamente resistente, já a janela 3 se apresentou com resistência entre 50-100 Mpa se enquadrando na categoria resistente, conforme mostra o Quadro 16.

Quadro 16: Resistência da rocha intacta das janelas estudadas

RESISTÊNCIA DA ROCHA INTACTA		
<b>J1</b>	25-50 Mpa (MEDIANAMENTE RESISTENTE)	Um golpe firme com a ponta do martelo geológico faz sulcos de até 5mm; o canivete consegue raspar a superfície da rocha
<b>J2</b>	25-50 Mpa (MEDIANAMENTE RESISTENTE)	Um golpe firme com a ponta do martelo geológico faz sulcos de até 5mm; o canivete consegue raspar a superfície da rocha
<b>J3</b>	50-100 Mpa (RESISTENTE)	Pequenos pedaços de rocha seguros com a mão são partidos com um único golpe de martelo
<b>J4</b>	25-50 Mpa (MEDIANAMENTE RESISTENTE)	Um golpe firme com a ponta do martelo geológico faz sulcos de até 5mm; o canivete consegue raspar a superfície da rocha

### 8.6.2. Cálculo do RQD

Para o cálculo do RQD foi utilizado o método proposto por Palmstrom (1982), Equações 1.2 e 1.3 a partir da contagem do índice volumétrico de juntas ( $J_v$ ) e classificado de acordo com

o Quadro 1.

Quadro 17: Classificação pelo índice RQD

RQD			
<b>J1</b>	J <sub>v</sub> =8	<b>88,60%</b>	<b>BOM</b>
<b>J2</b>	J <sub>v</sub> =7	<b>91,90%</b>	<b>EXCELENTE</b>
<b>J3</b>	J <sub>v</sub> =15	<b>65,50%</b>	<b>RAZOÁVEL</b>
<b>J4</b>	J <sub>v</sub> =7	<b>91,90%</b>	<b>EXCELENTE</b>

Fonte: Autor, 2021

### 8.6.3. Classificação Q-Barton

Utilizando a classificação Q - Barton, realizou-se a análise das condições dos parâmetros descritos na seção 6.1.3. O Quadro 18 mostra as condições e os valores encontrados de cada parâmetro e, também, o valor final da classificação, que foi determinada pela Equação 1.4. Por meio do Quadro 10, o índice Q-Barton permitiu caracterizar como RAZOÁVEL as janelas 1 e 2, como FRACO a janela 3 e a janela 4 como BOM, de acordo com o que foi proposto por Barton et al. (1974 apud BIENIAWSKI, 1989). Analisando os resultados da classificação Q – Barton, observou-se que as janelas 01, 02 e 03 necessitam de ações que elevem sua estabilidade como por exemplo concreto projetado, reforço com tirantes ou suportes, de modo que apenas a janela 04 se mostrou segura para visitação. No entanto de maneira geral a galeria não se mostrou segura para visitação, visto que três janelas apresentaram deficiências na estabilidade.

Quadro 18: Resultado da classificação Q, e distribuição dos pesos relativos aos parâmetros adotados

GALERIA	JANELA	RQD	J <sub>v</sub>	J <sub>n</sub>	J <sub>r</sub>	J <sub>a</sub>	J <sub>w</sub>	SRF	ÍNDICE Q	CLASSE	DESCRIÇÃO
1	1	88,6	8	12	3	3	1	1	7,38	V	RAZOÁVEL
	2	91,9	7	6	2	4	1	1	5,74	V	RAZOÁVEL
	3	65,5	15	6	1	3	1	1	3,64	V	FRACO
	4	91,9	7	6	3	4	1	1	11,49	IV	BOM

Fonte: Autor, 2021

### 8.6.4. Classificação RMR básico

O sistema de classificação de Bieniawski foi aplicado para as 4 janelas no interior da galeria, conforme descrito na seção 6.1.2. Quanto aos parâmetros das características das fraturas do maciço, empregou-se o Quadro 2 para a ponderação dos valores individuais das propriedades

das discontinuidades. Como resultado, as janelas 1, 2 e 4 tiveram descrição de RAZOÁVEL, sendo que a janela 3 foi descrita como FRACO, de acordo com o Quadro 5.

Quadro 19: Resultado da classificação RMR básico, e distribuição dos pesos relativos aos parâmetros

GALERIA	JANELA	RESISTÊNCIA DA ROCHA INTACTA	RQD	ESPAÇAMENTO	PERSISTÊNCIA	ABERTURA	RUGOSIDADE	PREENCHIMENTO	GRAU DE ALTERAÇÃO	PRESENÇA DE ÁGUA	ORIENTAÇÃO	RMR BÁSICO	CLASSE	DESCRIÇÃO
1	1	4	17	10	4	1	1	2	1	7	-5	42,00	III	RAZOÁVEL
	2	4	20	10	4	4	5	0	0	7	-10	44	III	RAZOÁVEL
	3	7	7	8	2	1	1	2	3	7	-5	33,00	IV	FRACO
	4	4	20	10	6	1	5	2	0	7	-10	45	III	RAZOÁVEL

Fonte: Autor, 2021

Em relação ao parâmetro orientação das discontinuidades, foi realizada a correção da orientação das discontinuidades para obtenção do valor numérico que condiciona o comportamento do maciço rochoso, segundo o Quadro 19. Verificou-se que as janelas 2 e 4 foram mais penalizadas pela orientações de tais estruturas, no entanto, de maneira geral não afetou diretamente a classificação das janelas.

#### 8.6.5. Classificação GSI

De acordo com a litologia, estrutura e condições das superfícies das discontinuidades, concluiu-se que o GSI estabeleceu-se na faixa entre 40 – 50 para as 4 janelas estudadas, apresentando maciço intertravado parcialmente perturbado com blocos angulares formados por muitas famílias de discontinuidades interceptadas, com superfícies das fraturas moderadamente intemperizadas e alteradas. Para esse sistema de classificação foi aplicado uma leitura das 4 janelas como um todo, e não separadamente como feito nos sistemas Q e RMR. O Quadro 20 apresenta a faixa em que se foi classificada.

Quadro 20: Resultado da classificação GSI, destacado em vermelho

<p>ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICA PARA MACIÇOS FRATURADOS (Hoek &amp; Marinos, 2000)</p> <p>A partir da litologia, estrutura e condições da superfície das descontinuidades, estima-se o valor médio de GSI. Não tente ser tão preciso. Citar um alcance de 33 a 37 é mais realístico do que afirmar que GSI = 35. Observe que a tabela não é aplicável a rupturas controladas estruturalmente. Onde existir planos estruturais de fraqueza com orientação desfavorável em relação à face da escavação, estes controlarão o comportamento do maciço rochoso. A resistência ao cisalhamento de superfícies rochosas propensas a sofrer deterioração com as variações de umidade será reduzida quando existir presença de água. Quando trabalhar com rochas de categoria razoável a muito pobre, um deslocamento para a direita pode ser feito em condições de saturação. Pressão de água é avaliada através de análises de tensão efetiva.</p>		CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE				
ESTRUTURA		DECRÉSCIMO DA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE →				
<p>DECRÉSCIMO DO INTERTRAVAMENTO ↓</p>	<p>MUITO FRATURADA – intertravado, maciço parcialmente perturbado com blocos angulares com várias faces formados por quatro ou mais famílias de descontinuidades</p>			<b>5</b>		
	<p>FRATURADA/PERTURBADA/COSTURADA* – dobrada com blocos angulares formados por muitas famílias de descontinuidades interceptadas. Persistência de planos de acamamentos ou xistosidades</p>			30		
	<p>DESINTEGRADA – pobremente intertravada, maciço rochoso intensamente quebrado, com uma mistura de pedaços rochosos angulares e arredondados</p>			20		
	<p>LAMINADA/CISALHADA – ausência de blocos devido ao estreito espaçamento de xistosidades fracas ou planos de cisalhamento</p>	N/A	N/A	10		
		MUITO BOA Muito rugosa, superfícies são não intemperizadas	BOA Rugosa, levemente intemperizada, superfícies manchadas de ferro ("enferrujadas")	RAZOÁVEL Lisa, superfícies moderadamente intemperizadas e alteradas	POBRE Polida, superfícies altamente intemperizadas com camadas compactas ou preenchimentos ou fragmentos angulares	MUITO POBRE Polida, superfícies altamente intemperizadas com camadas de argila mole ou preenchimentos

## 9. CONCLUSÃO

De acordo com a geologia local da antiga lavra artesanal, a caracterização geológica permitiu identificar como rocha encaixante gnaisses migmatizados, migmatitos (diatexitos), granodioritos e paragnaisses, pertencentes ao Complexo Tamboril-Santa Quitéria e como litologia do Serrote do Quinamuiú rochas ácidas com alto teor de sílica representadas por riolitos de granulação fina, apresentando coloração branca a branco marfim, com intenso fraturamento hidráulico de composição silicática, com resistência à compressão uniaxial estimada pelo método do martelo geológico entre 25-50 Mpa e 50-100 Mpa. Além disso, identificou-se três famílias de descontinuidades que foram analisadas segundo parâmetros geotécnicos.

Com a análise das famílias de descontinuidades foi possível constatar que a maior influência de juntas como condicionantes de instabilidades na parte externa da antiga lavra possui atitude média de  $098^{\circ}/50$  e  $041^{\circ}/56$  com predomínio de direção WNW-ESE e em relação ao conjunto de descontinuidades presentes no interior da galeria com o estudo das janelas, notou-se que o padrão de descontinuidades da família F1 se mostrou mais atuante tanto na parte externa da antiga lavra quanto parte interna, preservando as direções. Porém, na parte interna com ângulos de mergulho maiores, em relação às famílias de descontinuidades F2 e F3 que não foram perceptíveis.

Utilizando os sistemas de classificação geomecânicos foi possível quantificar e qualificar a estabilidade da galeria subterrânea estudada. Analisando os resultados da classificação Q e RMR observou-se que estes são bem aproximados, ou seja, a classificação de ambos resultaram em descrições semelhantes. Para os sistemas aplicados, o resultado obtido se divergiu apenas na janela 4, onde o RMR rebaixou a descrição de BOM para RAZOÁVEL. Para o sistema de classificação GSI concluiu-se que o maciço rochoso apresentou-se como um maciço intertravado parcialmente perturbado com blocos angulares formados por muitas famílias de descontinuidades interceptadas, com superfícies das fraturas moderadamente intemperizadas e alteradas.

Vale ressaltar que de maneira geral os resultados indicaram uma faixa de classificação entre razoável a fraco entre as janelas, logo, dessa forma a entrada na galeria não é considerada segura para os visitantes de acordo com os resultados obtidos no estudo. Dessa forma existindo a necessidade de ações voltadas para a prevenção de acidentes como placas de sinalização e faixas de interdição. Esta classificação não é final, ou seja, é preciso mais estudos detalhados



pelo fato de as discontinuidades estudadas serem aflorantes existindo a possibilidade das mesmas estarem intemperizadas, o que pode ter rebaixado ainda mais a classificação geomecânica do maciço rochoso.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. D., HASUI, Y., de BRITO NEVES, B. B., & FUCK, R. A. (1977). **Províncias estruturais brasileiras**, paper presented at 2nd Simp. *Geol. Nordeste, Anais Soc. Brás. Geol. Núcleo Nordeste*, 242-258.

BIENIAWSKI, Zdzisław Tadeusz. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering**. John Wiley & Sons, 1989. P. 29-90.

BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C; VIDOTTI, R. M. *et al.* **Geologia, Tectonica e Recursos Minerais do Brasil**: Texto, Mapas e SIG. Brasília: CPRM, 2003. p 264-268.

Brasil. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Estadual**. Rio Grande do Sul/ Coord. Técnica de José Eduardo da Costa Duarte et al.; Equipe Técnica por José Eduardo da Costa Duarte – Brasília: ANM, 2019

CABY, R.; ARTHAUD, M. **Major Precambrian nappes of the Brazilian belt, Ceará, north-east Brazil**. *Geology*, v. 14, n. 10, p. 871-874, 1986.

CASTRO, N. A., de Araujo, C. E. G., BASEI, M. A., Osako, L. S., NUTMAN, A. A., & Liu, D. (2012). **Ordovician A-type granitoid magmatism on the Ceará Central domain, Borborema province, NE-Brazil**. *Journal of South American Earth Sciences*, 36, 18-31.

CASTRO, Neivaldo Araujo de. **Evolução geológica proterozóica da região entre Madalena e Taperuaba, domínio tectônico Ceará Central (Província Borborema)**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. p.22

CAVALCANTE, J. C., VASCONCELOS, A. M., MEDEIROS, M. F., PAIVA, I.P., GOMES, F. E. M., CAVALCANTE, S. N., CAVALCANTE, J. E., MELO, A. C. R., DUARTE NETO, V.C. & BENEVIDES, H.C. 2003. **Mapa Geológico do Estado do Ceará – Escala 1:500.000**. Fortaleza, Ministério das Minas e Energia, CPRM.

DANTAS, E. L., VAN SCHMUS, W. R., HACKSPACHER, P. C., Fetter, A. H., de Brito Neves, B. B., Cordani, U., ... & Williams, I. S. (2004). **The 3.4–3.5 Ga São José do Campestre**

**massif, NE Brazil: remnants of the oldest crust in South America.** *Precambrian Research*, 130(1-4), 113-137.

DEERE, D. U. "**Geological Considerations.**" *Rock Mechanics in Engineering Practice*, ed.

R. G. Stagg and D. C. Zienkiewicz, Wiley, New York, 1968, pp. 1-20.

DEERE, D. U., and D. W. Deere. "**The RQD Index in Practice.**" *Proc. Symp. Rock Classif. Eng. Purp.*, ASTM Special Technical Publication 984, Philadelphia, 1978, pp. 91-101.

DNPM fecha empresa de extração no Serrote Quinamuiu, em Tauá. *Diário do Nordeste*. 7 de setembro de 2005. Disponível em: <<https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/regiao/dnpm-fecha-empresa-de-extracao-no-serrote-quinamuiu-em-taua> 1.177822>.

FELGUEIRAS, Carlos Alberto. **Análises sobre modelos digitais de terreno em ambiente de sistemas de informações geográficas.** DPI/INPE, 1999. P. 1-2.

FELGUEIRAS, C. A.; DRUCK, S.; MONTEIRO, A. M. V. **Análise espacial de superfícies: o enfoque da geoestatística por indicação.** In: FUKS, Suzana Druck; CARVALHO, Marília Sá; CÂMARA, Gilberto; MONTEIRO, Antonio Miguel Vieira (Ed.). **Análise espacial de dados geográficos.** São José dos Campos: INPE, 2002. p. 25.

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas.** Oficina de Textos, 2016.p. 409-420.

FIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas.** Oficina de Textos, 2016. p. 334

FOSSEN, Haakon. **Geologia estrutural.** São Paulo: Oficina dos textos, 2012. P. 204- 205.

FRONDEL, C. (1962). **The System of Mineralogy: Silica Minerals.** vol. 3, 7ª edição, John Wiley & Sons. Nova York. 334p.

HOEK, E. (1994). **Strength of Rock and Rock Masses.** *International Society for Rock Mechanics - News Journal*, 2(2): 4-16.

HOEK, E. (2001). **Big Tunnels in Bad Rock.** 2000 Terzaghi Lecture, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers-ASCE, 127(9): 726-740.

HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C., & CORKUM, B. (2002). **Hoek-Brown failure criterion-2002 edition.** *Proceedings of NARMS-Tac*, 1(1), 267-273.

HOEK, E., MARINOS, P. & BENISSI, M. (1998). **Applicability of the Geological Strength Index (GSI) Classification for Very Weak and Sheared Rock Masses: The Case of the Athens Schist Formation.** Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57(2): 151-160.

**Manual de ciência dos minerais**/Cornelis Klein, Barbara Dutrow; tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat.-23. ed.-Porto Alegre: Bookman, 2012, p. 564-565.

MARINOS, V. I. I. I.; MARINOS, P.; HOEK, Evert. **The geological strength index: applications and limitations.** Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 64, n. 1, p. 55-65, 2005.

OLIVEIRA, A. M. D. S. (1998). **Geologia de engenharia.** (No. 550.8 GEO).

PALMSTROM, A. **The volumetric joint count—a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing.** In: International Association of Engineering Geology. International congress. 4. 1982. p. 221-228.

PARENTE, CLÓVIS VAZ; ARTHAUD, MICHEL HENRI. **O Sistema Orós-Jaguaribe no Ceará, NE do Brasil.** Revista Brasileira de Geociências, v. 25, n. 4, p. 297-306, 1995

SCHUMANN, W., FRANCO, R. R., & Del Rey, M. (1995). **Gemas do mundo.** Ao Livro Técnico.

WEBSTER, R., 1983. **Gems.** Butter worths. England. 1006 p

## 11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTARES

ANDRADE, Antônio Leite de et al. **Diagnóstico e sugestões para a melhoria da lavra em pegmatitos na Província da Borborema.** 2009.

ARAÚJO, Carlos Eduardo Granade de; PINÉO, Tercyo Rinaldo Gonçalves. **Geologia e recursos minerais da folha Novo Oriente SB. 24-VC-VI: estados do Ceará e Piauí.** CPRM, 2015, p. 23-26.

BARBOSA, Antônio Guedes; SCHEID, Cláudio. **Projeto Tauá: relatório final.** 1974.

BHERING, Apolo Pedrosa et al. **Classificação do maciço rochoso e caracterização das brechas da mina subterrânea de Vazante-MG.** 2009. P 15-20.

BARTON, N., R. Lien, and I. Lunde. **"Engineering Classification of Rock Masses for the**

**Design of Tunnel Support.**" Rock M echo 6, 1974, 'pp. 183-236.

BIENIAWSKI, Z. T. "**Rock Mass Classifications in Rock Engineering.**" ExpLordtion' for Rock Engineering, ed. Z. T. Bieniawski, A. A. Balkema, Johannesburg, t976, ppj 97 - 106.

BROWN, Edwin Thomas. **Rock characterization testing and monitoring.** Pergamon press, 1981.

CAVALCANTI, José Adilson Dias. **Geologia e recursos minerais da folha Várzea do Boi SB. 24-VB-IV: estado do Ceará.** CPRM, 2015. P 25-28

CURI, Adilson. **Lavra de minas.** Oficina de Textos, 2017. P.636

DE ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., de Brito Neves, B. B., & Fuck, R. A. (1981). **Brazilian structural provinces: an introduction.** *Earth-Science Reviews*, 17(1-2), 1-29.

DEERE, D. U. "**Geological Considerations.**" Rock Mechanics in Engineering Practice, ed.

DI GIORGIO, D., KOPPE, J. C., Quadros, T., Klein, S., & Leite, J. F. C. (2003). **Análise estrutural no planejamento de lavra de rocha ornamental.** *Rem: Revista Escola de Minas*, 56(3), 174-179.

R. G. Stagg and D. C. Zienkiewicz, Wiley, New York, 1968, pp. 1-20.

DOS SANTOS, Ticiano J. Saraiva et al. **Neoproterozoic tectonic and magmatic episodes in the NW sector of Borborema Province, NE Brazil, during assembly of Western Gondwana.** *Journal of South American Earth Sciences*, v. 25, n. 3, p. 271-284, 2008.

FETTER, Allen Hutcheson et al. **U-pb and sm-nd geochronological constraints on the crustal evolution and basement architecture of ceará state, nw borborema province, ne brazil: implications for the existence of the Paleoproterozoic Supercontinent" atlantica".** *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 1, p. 102-106, 2017.

GOMES, Francisco Edson Mendonça; SANTOS, Jardo Caetano dos; MEDEIROS, Marcelo de Freitas. **Projeto Tauá: relatório preliminar de pesquisa de cromo e níquel nos municípios de Tauá, Pedra Branca e Mombaça,** estado do Ceará. 1984.

GOMES, Iris Pereira; PALHETA, Edney Smith de Moraes; FURTADO, Iramaia Braga; COSTA, Felipe Grandjean da; SOUSA, Frederico Ricardo F. R. O e; ROCHA, José Maria Aladim Carvalho; FREIRE, Débora Pinho Cavalcante; HOLANDA, Janólfta Lêda Rocha; VALE FILHO, Deoclécio Pereira do; BESSER, Marcell Leonard. **Projeto mapeamento geológico e integração geológica-geofísica geoquímica na região de Granjeiro – Cococi, Ceará: escalas**

**1:250.000, 1:100.000, 1:50.000** – Estado do Ceará. CPRM, Fortaleza, 2021.

HOEK, E. WOOD, D. SHAH S (1992). **A modified Hoek–Brown criterion for jointed rock masses**. In: Hudson JA (ed) Proceedings of the rock mechanics symposium. International Society of Rock Mechanics Eurock'92, British Geotechnical Society, London, pp 209–214.

HOEK, E. & MARINOS, P. (2000a). **Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogeneous Rock Masses - Part 1**. Tunnels and Tunnelling International, 45-51.

HOEK, E. & MARINOS, P. (2000b). **Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogeneous Rock Masses - Part 2**. Tunnels and Tunnelling International, 33-36.

JUCHEM, Pedro Luiz. **Mineralogia, geologia e gênese dos depósitos de ametista da região do Alto Uruguai, Rio Grande do Sul**. 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, p. 9-10.

MAIA, José Allan Carvalho. **Modelagem probabilística da zona plástica de obras subterrâneas em meios rochosos**. 2007. P 11-27.

MEDEIROS, Vladimir Cruz de. **Aracaju NE: folha SC. 24-X**. 2000.

MILAN, Denise; MATOS, Olgária (Ed.). **Gemas da terra: Imaginação, estética e hospitalidade**. Edições Sesc, 2015.

ORIUNDO YARANGA, Nell. **El índice de resistencia geológica (GSI) y su aplicación en la explotación de la mina Huarón**. 2008. p 127-145.

SALA, Leonardo Alberto. **Modelo geomecânico da Sequência Canto em galerias da Mineração Fazenda Brasileiro-BA**. 2016.

SALVI, Alice Lusco. **Diagnóstico de risco à saúde do trabalhador na extração de ametista no município de Chopinzinho PR**. 2014.

SANTOS, T. J. S., FETTER, A. H., SCHMUS, W. R. V., HACKSPACHER, P.C., 2009. **Evidence for 2.35 to 2.30 ga juvenile crustal growth in the northwest Borborema Province, NE Brazil**. Geological Society Special Publication 323, 271–281.

SARDEIRO, Simone Soraia Silva et al. **Modelagem digital de terreno do município de Graccho Cardoso, nordeste de Sergipe**. 2016.

UCHOA, Elenilton Bezerra. **Integração de dados multifonte com base em lógica fuzzy na modelagem prospectiva do depósito de ferro de Quiterianópolis/CE**. 2016.

VALENTIM, Raul Fontes. **Classificação geomecânica da cavidade natural subterrânea BRU\_0005, município de São Gonçalo do Rio Abaixo, MG.** 2016.

VIDAL, Francisco Wilson Hollanda et al. **Rochas e minerais industriais do Estado do Ceará.** 2005.p 12-13.