



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE GEOLÓGICA-GEOMECÂNICA-GEOFÍSICA EM MINA DO
QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

Artur Ramos Simões

MONOGRAFIA nº 458

Ouro Preto, Dezembro de 2022

ANÁLISE GEOLÓGICA-GEOMECÂNICA-GEOFÍSICA EM MINA DO
QUADRILÁTERO FERRÍFERO



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Junior

Vice-Diretor

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Dr. Geraldo Magela Santos Sampaio

MONOGRAFIA

Nº 458

ANÁLISE GEOLÓGICA-GEOMECÂNICA-GEOFÍSICA EM MINA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Artur Ramos Simões

Orientador

Prof. Dr. Joney Justo da Silva

Co-Orientadora

Elis Figueiredo Oliveira

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação das disciplinas de Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, no período letivo 2022/1.

OURO PRETO

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S593a Simões, Artur Ramos.
Análise geológica-geomecânica-geofísica em mina do Quadrilátero
Ferrífero. [manuscrito] / Artur Ramos Simões. - 2022.
90 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Joney Justo da Silva.
Coorientadora: Ma. Elis Figueiredo Oliveira.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geologia de Engenharia. 2. Mecânica do solo. 3. Mecânica das
rochas. 4. Geomecânica. 5. Geofísica. I. Oliveira, Elis Figueiredo. II. Silva,
Joney Justo da. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.12/.13

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Artur Ramos Simões

Análise Geológica-Geomecânica-Geofísica em mina do Quadrilátero Ferrífero

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 14 de dezembro de 2022

Membros da banca

Dr. Joney Justo da Silva - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Emílio Evo Magro Corrêa Urbano - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Daniel Silva Jaques - Universidade Federal de Ouro Preto

Joney Justo da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/12/2022



Documento assinado eletronicamente por **Joney Justo da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/12/2022, às 22:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0451398** e o código CRC **CEFFD4A0**.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa o fim de um ciclo de imenso valor na minha vida pessoal e profissional. A experiência de estudar Engenharia Geológica na Universidade Federal de Ouro Preto é única e será carregada com grande orgulho ao longo de minha vida.

Agradeço, primeiramente, à minha família pelo apoio e carinho ao longo desses anos. Aos amigos Letícia e Gustavo que muito me apoiaram nos momentos em que estive mais envolvido na elaboração deste trabalho.

Aos amigos de profissão: Cláudio, Larissa, Eduardo, Marrano, Teófilo e Mônica – que de alguma forma contribuíram para a construção destes resultados e batalharam comigo para que pudessem ser utilizados neste estudo.

À Universidade Federal de Ouro Preto por todo ensino gratuito e de qualidade, além de tantas experiências e vivências proporcionadas nestes anos de graduação.

Aos mestres do Departamento de Geologia (DEGEO), pelo empenho, dedicação e parceria: fatores necessários nesse processo de troca e formação profissional. Aos meus orientadores: Joney e Elis, obrigado pela paciência e disponibilidade. Aos membros da banca: Emílio e Daniel, pela disponibilidade e contribuições importantes para melhoria técnica do trabalho realizado.

À todos que de alguma forma se fizeram presentes neste tempo, deixo o meu eterno obrigado.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	vix
SUMÁRIO	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xix
RESUMO	xx
ABSTRACT	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 JUSTIFICATIVA.....	2
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS	3
2 METODOLOGIA.....	4
2.1 INTRODUÇÃO.....	4
2.2 MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO.....	4
2.2.1 Introdução	4
2.2.2 Classificações e caracterização geomecânica	4
2.2.3 Classificações Geomecânicas RMR e <i>Weak Rock</i>	9
2.3 MÉTODOS GEOFÍSICOS.....	11
2.3.1 Apresentação	11
2.3.2 Magnetometria	12
2.3.3 Gamaespectometria.....	17
3 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	21
3.1 GEOLOGIA REGIONAL.....	21
3.2 GEOLOGIA LOCAL	27
4 MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO.....	31
4.1 CRITÉRIOS, PREMISSAS E LOGÍSTICA DAS ATIVIDADES DE CAMPO	31
4.2 LITOTIPOS MAPEADOS	34
4.2.1 Coberturas Antrópicas.....	34
4.2.2 Canga.....	36
4.2.3 Metachert.....	39
4.2.4 Básica Intrusiva.....	40
4.2.5 Hematitito.....	42
4.2.6 Itabirito Argiloso.....	44
4.2.7 Filito Dolomítico.....	45

4.2.8 Filito Sericítico	47
4.2.9 Filito	48
4.2.10 Quartzito Milonítico.....	50
4.2.11 Quartzito	51
4.2.12 Xisto.....	52
4.3 COMPILAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS CONTATOS GEOLÓGICOS.....	54
4.4 AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS REGIONAIS NA ÁREA DA CAVA	55
4.5 AVALIAÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS.....	57
4.5.1 Acamamento (S_0).....	58
4.5.2 Foliação (S_n)	59
4.5.3 Bandamento Composicional (S_b)	60
4.5.4 Fraturas (F_n).....	61
4.5.5 Lineação de estiramento mineral (L_i).....	62
4.6 MAPA GEOLÓGICO ELABORADO	62
4.7 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS.....	63
4.7.1 Classificação <i>Weak Rock</i> e RMR	63
4.7.2 Classificação GSI	68
5 ANÁLISE QUALITATIVA E INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA-GEOFÍSICA	71
5.1 INTRODUÇÃO	71
5.2 BANCO DE DADOS GEOFÍSICO	71
5.3 ANÁLISE MAGNETOMÉTRICA	72
5.4 ANÁLISE RADIOMÉTRIA	74
5.5 ANÁLISE MORFOESTRUTURAL	79
5.6 INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA-GEOFÍSICA	80
6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	85
6.1 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES DO TRABALHO	85
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 - Ilustração de um maciço rochoso, indicando as características geomecânicas caracterizadas nas descontinuidades (Wyllie 2004).....	5
Figura 2-2 - Ábaco GSI para maciços rochosos (Hoek & Marinos 2000) – Traduzido por Machado (2022).....	8
Figura 2-3 - Gráficos para avaliação dos pesos atribuídos aos parâmetros de Resistência (a), RQD (b) e Espaçamento das Descontinuidades (c).	11
Figura 2-4 – Linhas de força do campo magnético terrestre – obtido de Halliday (1996).	13
Figura 2-5 – Valores médios de susceptibilidade magnética por tipo de rochas. Obtido de Kearey <i>et al.</i> 2009.....	14
Figura 2-6 – Filtros de Fourier com suas respectivas finalidades geofísicas. Obtido de Barbosa & Oliveira (2020).	17
Figura 2-7 – Abundância dos principais radioelementos por tipos de rocha – Oliveira (2020), modificado de Kearey <i>et al.</i> 2009.....	18
Figura 3-1 - Localização do Quadrilátero Ferrífero no Cráton do São Francisco (Alkmim 2004).	21
Figura 3-2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo <i>et al.</i> 2019). Destacada, pelo retângulo vermelho, a área de estudo contemplada.....	23
Figura 3-3 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo <i>et al.</i> 2019). 25	
Figura 3-4 - Seção modelo da Nappe Curral (Endo <i>et al.</i> 2005. Adaptado de Madeira 2018).	26
Figura 3-5 - Relações estruturais na intersecção entre o Homoclinal da Serra do Curral e o Sinclinal da Moeda. 1, falha de Gorduras; 2, falha de Mutuca; 3, falha da Catarina; 4, falha do Barreiro (Alkmim & Marshak 1998). Em destaque (retângulo vermelho) a área de estudo.	27
Figura 3-6 - Trecho do mapa geológico de Minas Gerais em escala 1:1.000.000 (CPRM, 2003). Destacada, em vermelho, a área de estudo.	29

Figura 3-7 - Trecho do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero em escala 1:150.000 (Endo et al. 2019). Destacada, em vermelho, a área de estudo.	30
Figura 3-8 – Trecho do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero em escala 1:25.000 (Cavalcanti <i>et al.</i> 2020). Destacada, em vermelho, a área de estudo.....	30
Figura 4-1 - Mapa de Áreas Inacessíveis e Coberturas Antrópicas.	32
Figura 4-2 - Mapa de Pontos do levantamento geológico-geomecânico.....	33
Figura 4-3 - Disposição das Coberturas antrópicas na área de estudo. Na região norte e suldeste são observadas as PDEs. Enquanto no trecho sudoeste, leste e nordeste plantas e edificações industriais.....	34
Figura 4-4 - (a) Ponto M119 - PDE na região sul - Grande diversidade composicional nas características de seus materiais de estéreis. (b) Ponto M118 - PDE SUL - Localmente podem ser observados níveis/camadas métricas de materiais de composição variada desde itabiritos argilosos a rochas quartzíticas em contato com grandes blocos podendo condicionar planos de anisotropias de resistência (análogos a descontinuidades) na estrutura.	35
Figura 4-5 - (a) Ponto M097 - Acesso interno na cava para o sistema de captação no lago. Depósito de composição variada limitando a observação de afloramentos. (b) PDE na região norte – depósito de material hematítico de granulometria média a fina, podendo apresentar até 4 metros de espessura aparente.	36
Figura 4-6 - Disposição da canga na área de estudo.	37
Figura 4-7 - Ponto M143 - Canga com fragmentos de hematita e itabiritos em matriz laterítica.	38
Figura 4-8 - Ponto M067 - Afloramento em canga recobrindo filito dolomítico de baixa resistência no talude Leste, com espessura de até 5 metros.	38
Figura 4-9 - Disposição do metachert na área de estudo.	39
Figura 4-10 - Ponto M128 - Afloramento de maciço em metachert de dimensões métricas (aproximadamente 10 metros de extensão), em ponto de ravinamento na base do talude Leste.	40
Figura 4-11 - Disposição da básica intrusiva na área de estudo.	41

Figura 4-12 - Intervalos das caixas de sondagem do furo 0013. Trechos descritos como “Básica Intrusiva”. O parâmetro resistência está classificado como “semicompatto” apesar da ocorrência de materiais mais alterados em intervalos localizados.	42
Figura 4-13 - Disposição do hematitito na área de estudo.....	43
Figura 4-14 - (a) Ponto M062 – hematitito recoberto pela vegetação ao longo da face de um talude parcialmente reconformado. (b) Ponto M063 – hematitito de granulação média a grossa, inconsolidado e fragmentado.	44
Figura 4-15 - Disposição do itabirito argiloso na área de estudo.	45
Figura 4-16 - Disposição do filito dolomítico na área de estudo.....	46
Figura 4-17: (a) Ponto M083 filito dolomítico com intercalações milimétricas em argilominerais; (b) Ponto M127 filito dolomítico de aspecto “borra de café”.	46
Figura 4-18 - Disposição do filito sericítico na área de estudo.	47
Figura 4-19 - (a) Ponto M002 - Filito sericítico com intercalação milimétrica de minerais argilosos marcada pela forte presença de sericita; (b) Ponto M070 Filito sericítico no talude Leste, de resistência muito branda, com a ocorrência de processo erosivos superficiais.	48
Figura 4-20 - Disposição do Filito na área de estudo.	49
Figura 4-21 - Ponto M139 Filito cinza prateado, alterado e com intercalações milimétricas de níveis argilosos de baixa resistência (R1).....	49
Figura 4-22 - Disposição do quartzito milonítico na área de estudo.....	50
Figura 4-23 - (a): Ponto M064 Quartzito milonítico. (b): Ponto M064 Quartzito milonítico em detalhe da foliação milonítica com a cominuição dos grãos de quartzo e presença de micas.	51
Figura 4-24 - Disposição do quartzito na área de estudo.	51
Figura 4-25 - (a): Ponto M138 - Quartzito no entorno da cava mostrando aspecto foliado com granulação média. (b): Ponto M136 - Quartzito no interior da cava de resistência mediana e intensamente fraturado.	52
Figura 4-26 - Disposição do xisto na área de estudo.....	53

Figura 4-27 - (a) e (b) Ponto M019 Xisto de coloração avermelhada com intercalações de níveis milimétricos argilosos e níveis silicosos, que conferem maior resistência à litologia.....	53
Figura 4-28 - Mapa Geológico da área de estudo. Os contatos foram definidos a partir do mapeamento realizado. Nos locais em que não foi possível acesso, foram mantidos os contatos litológicos apresentados no mapa geológico de curto prazo fornecido pela empresa responsável.	54
Figura 4-29 - Ponto M110 – Feição estrutural da Falha de Gorduras localizada na porção Sul, próxima à PDE Sul, com atitude 110/75, exibindo estruturas S-C.....	55
Figura 4-30 - Área de estudo com destaque (em amarelo) para a região do talude NE com indícios de instabilizações no local em que se observa rejeitos direcionais relacionados à Falha de Gorduras.	56
Figura 4-31 - Direção da foliação S_n medidas na etapa de mapeamento da área de estudo.	57
Figura 4-32 - Diagrama Estereográfico (Schmidt) – Polos e planos predominantes do Acamamento reliquiar (S_0).	59
Figura 4-33 - Diagrama Estereográfico (Schmidt) – Polos e planos predominantes da Foliação (S_n).	60
Figura 4-34 - Diagrama Estereográfico (Schmidt) – Polos e planos predominantes do Bandamento Composicional (S_b).	61
Figura 4-35 - Diagrama Estereográfico (Schmidt) – Polos dos planos de fraturamento (Fr).....	62
Figura 4-36 - Mapa Geológico da área de estudo.	63
Figura 4-37 - Mapa de classes <i>Weak Rock</i> e RMR para a área de estudo.	64
Figura 4-38 - (a) Vista panorâmica da Classe <i>Extremely Weak</i> em Filito; (b) Ponto M072: contato em filito com resistência $R1^-$ posicionado à esquerda da foto e $R0$ a direita.	65
Figura 4-39 - Litotipos de classe <i>Very Weak</i> (a) Ponto M076: Filito Sericítico resistência muito branda ($R1^-$), com intercalação milimétrica de minerais argilosos; (b)	

Ponto M083: Filito Dolomítico no talude Leste, resistência muito branda (R1⁻), apresentando um dobramento evidenciado pelo bandamento composicional.....65

Figura 4-40 - Litotipos da classe *Very Weak* no talude Oeste; domínios NW e W de classe *Very Weak*. (a) Ponto M015 (NW): Xisto com foliação milimétrica marcada pela forte presença de sericita; (b) Ponto M141 (W): Filito de coloração cinza com intercalações de níveis milimétricos argilosos.66

Figura 4-41 - Litotipos de classe *Weak* (a) Ponto M015: Talude E, domínio NE - Filito Dolomítico com foliação centimétrica marcada pela presença de níveis manganíferos de resistência R1⁺; (b) Ponto M025: talude de Xisto de coloração avermelhada a marrom, alterado, com intercalações de níveis milimétricos argilosos.....66

Figura 4-42 - Maciço classe III, talude Oeste, setor NW (a) Ponto M008: Xisto com foliação milimétrica; (b) Ponto M064: Quartzito Milonítico de coloração cinza clara.67

Figura 4-43 - Área de mapeamento com destaque para posição do ponto M101 com afloramento de quartzito.68

Figura 4-44 - Contornos de classe de maciço de acordo com classificação GSI (Hoek & Marinos, 2000). Destacado os pontos das litologias: em amarelo o metachert, em laranja o quartzito, em marrom o quartzito milonítico, em rosa o hematítico e em verde o xisto.69

Figura 4-45 - Mapa de classificação GSI para a área de estudo.70

Figura 5-1 - Mapas magnetométricos produzidos neste trabalho.73

Figura 5-2 - Mapa de amplitude do sinal analítico (ASA) para área de estudo. ..74

Figura 5-3 - Mapas radiométricos produzidos neste trabalho.75

Figura 5-4 - Mapa ternário com definição de radiofácies para área de estudo.....76

Figura 5-5 - Lineamentos geofísicos: mapas radiométricos.77

Figura 5-6 - Diagrama de roseta dos lineamentos traçados. Direção média observada: 153° – equivalente a 333°.77

Figura 5-7 - Mapa radiométrico. Canal de U.....78

Figura 5-8 - Mapa radiométrico. Canal de Th.78

Figura 5-9 - Lineamentos morfoestruturais traçados a partir de MDE e imagem de satélite.	79
Figura 5-10 - Diagrama de roseta dos lineamentos morfoestruturais traçados. Direção média observada: 117° – equivalente a 297°.	80
Figura 5-11 - Anomalia magnética: ASA. Formação Cauê interpretada.	81
Figura 5-12 - Anomalia radiométrica: Canal de Th. Formação Batatal interpretada.	82
Figura 5-13 - Anomalia radiométrica: U. Formação Batatal interpretada.	83
Figura 5-14 - Mapa Geológico final da área de estudo corrigido a partir da interpretação da aerogeofísica. Este mapa pode ser observado na escala correta no Apêndice A.	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tabela de Resistência ISRM modificada (Adaptado de Franca <i>et al.</i> 2018 apud BVP Engenharia 2012).	6
Tabela 2.2 - Valores do RMR - Bieniawski (1989).	10
Tabela 5.1 - Resumo do levantamento realizado pelo Programa de Levantamento Aerogeofísico no estado de Minas Gerais. Obtido de França (2017).	72
Tabela 5.2 - Radiofácies definidas a partir do mapa radiométrico ternário	76

RESUMO

Diversos métodos são utilizados para classificação e avaliação geomecânica de maciços rochosos. Dentre eles, destacam-se na contemporaneidade o RMR, GSI e *Weak Rock* – o último utilizado para maciços friáveis ou solos. Este trabalho foi elaborado a partir dos resultados de um mapeamento geológico-geomecânico realizado em uma cava na região do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais. Sua realização se deu a partir das técnicas de mapeamento geológico básico e das classificações geomecânicas citadas anteriormente. Os resultados obtidos a partir dos dados de mapeamento permitiram uma boa interpretação da área da cava, assim como a produção de mapas temáticos geomecânicos. O trabalho de mapeamento realizado enfrentou grande dificuldade de acesso em parte significativa dos taludes devido às instabilidades nos materiais expostos aos processos de intemperismo e erosão naturais. Além disso, destaca-se também a presença de materiais e estruturas de origem antrópica – tais como depósitos, edificações e pilhas de estéril – que recobrem os materiais *in situ* e dificultam sua identificação e, conseqüentemente, a realização do mapeamento. Nesse contexto, utilizou-se dados geofísicos do aerolevanteamento do Programa de Levantamento Aerogeofísico do Estado de Minas Gerais (PLAMG - CODEMIG) para produção de mapas temáticos de magnetometria e gamaespectrometria (radiometria) para complementação do mapeamento realizado e buscar correlações entre as classificações e propriedades geomecânicas dos materiais com suas respostas geofísicas. A avaliação das propriedades geomecânicas a partir dos dados aeromagnetométricos e aeroradiométricos não apresentou uma resposta satisfatória com a metodologia empregada neste estudo. Os dados, no entanto, se mostraram adequados para avaliação dos contatos e estruturas geológicas da região de modo a suprir, de forma satisfatória, as dificuldade descritas na etapa de mapeamento.

Palavras-chave: geomecânica, classificação geomecânica, rmr, gsi, *weak rock*, mapeamento geológico geomecânico, geologia de engenharia, geofísica, quadrilátero ferrífero.

ABSTRACT

Several methods are used for classification and geomechanical evaluation of rock masses. Among them RMR, GSI and Weak Rock stand out nowadays – the last of them used for weathered rock or soil masses. This work was elaborated from the results of a geological-geomechanical mapping carried out in a pit in the Iron Quadrangle region in Minas Gerais. Its realization took place from the basic geological mapping techniques and the previously mentioned geomechanical classifications. The results obtained from the mapping data allowed a good interpretation of the pit area, as well as the production of geomechanical thematic maps. The mapping work carried out faced great difficulty in accessing a significant part of the slopes due to instabilities in the materials exposed to natural weathering and erosion processes. In addition, the presence of materials and structures of anthropic origin – such as deposits, buildings and waste piles – that recover the *in situ* materials and make their identification and, consequently, mapping difficult. In this context, geophysical data from the aerial survey of the “Programa de Levantamento Aerogeofísico do Estado de Minas Gerais” (Aerogeophysical Survey of the State of Minas Gerais), from CODEMIG, was used to produce thematic maps of magnetometry and gamma spectrometry (radiometry) to complement the mapping and to seek correlations between the classifications and geomechanical properties of the materials with their geophysical responses. The evaluation of the geomechanical properties from the aeromagnetometric and aeroradiometric data did not show a satisfactory response with the methodology used in this study. The data, however, proved to be adequate for assessing contacts and geological structures in the region in order to satisfactorily overcome the difficulties described in the mapping stage.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

As diferentes formas de classificação geomecânica fornecem guias e parâmetros que podem ser reproduzidos para uma padronização no entendimento e representação de rochas e solos sobre o ponto de vista da geotecnia. Dessa forma, entende-se o mapeamento geológico-geomecânico como ferramenta fundamental nesse processo, uma vez que é nessa etapa – assim como na descrição geológica-geomecânica de testemunhos de sondagens – em que são obtidos os principais parâmetros utilizados nas classificações tal como o Q de Barton (Barton *et al.* 1974) e RMR (Bieniawski 1989; Bieniawski 2011).

Dentre as avaliações realizadas, destaca-se a relação entre as características das estruturas geológicas (especialmente estruturas planares, como foliações, falhas, fraturas e contatos) com as discontinuidades geotécnicas, responsáveis por estabelecer os principais planos de fraqueza observados em um maciço rochoso. Desse modo, como consequência da presença dessas estruturas, estabelecem-se os principais mecanismos de ruptura que podem ser observados em um maciço a partir, por exemplo, de análises cinemáticas ou análises de estabilidade planos-circulares no caso de taludes em rochas brandas – cenário frequentemente observado em países tropicais como o Brasil.

De forma a complementar os dados obtidos em uma etapa de mapeamento geológico-geomecânico, a geofísica pode ser utilizada com intuito de obter dados em superfície e subsuperfície que ajudem a entender a extensão, profundidade e volume dos materiais mapeados, assim como mudanças em parâmetros relacionados aos processos de intemperismo – como grau de alteração e resistência a compressão uniaxial (UCS) -, além de estruturas em escala local, sub-regional e regional que podem ou não ter sido observadas em campo.

Dessa forma, este trabalho apresenta as etapas e resultados de um mapeamento geológico-geomecânico realizado em uma mina do Quadrilátero Ferrífero, assim como posterior análise geofísica realizada com dados públicos do Programa de Levantamento Aerogeofísico do Estado de Minas Gerais (PLAMG - CODEMIG) para interpretação e validação geológica-geomecânica e estrutural dos dados levantados em campo.

A pedido da empresa o nome da mina, da empresa, assim como as coordenadas dos mapas que indiquem sua localização foram omitidos como premissa para utilização dos dados.

1.2 LOCALIZAÇÃO

Conforme descrito no item anterior, a localização da área de estudo, assim como nome da empresa e da mina serão omitidos. Essa omissão se dá como condição determinada pela empresa para liberação do uso dos dados.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho objetiva:

- Apresentar a metodologia e resultados obtidos em uma etapa de mapeamento geológico-geomecânico a partir das recomendações sugeridas pela ISRM - *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*, cujos critérios, parâmetros e faixas de valores são correlacionados com critérios considerados por Bieniawski (1989) e Lowson & Bieniawski (2013) dentro de sistema de classificação RMR (*Rock Mass Rating* 1989, assim como as adaptações e correções propostas para a classificação 2011);
- Apresentar a metodologia e resultados obtidos em uma etapa de mapeamento geológico-geomecânico a partir da classificação GSI (*Geological Strength Index*: Hoek & Marinos 2000);
- Apresentar a metodologia e resultados obtidos em uma etapa de mapeamento geológico-geomecânico a partir da classificação *Weak Rock* (Martin *et al.* 2018) – para rochas brandas/alteradas.

Além disso, aplicação de métodos geofísicos para:

- Produção e interpretação de mapas temáticos;
- Reinterpretação e validação dos resultados obtidos na etapa de mapeamento a partir dos mapas geofísicos gerados – com foco na continuidade e extensão dos materiais em subsuperfície e áreas inacessíveis, além de falhas, fraturas e outras estruturas de interesse geotécnico.

1.4 JUSTIFICATIVA

Este trabalho apresenta uma síntese e exemplo de aplicação dos principais métodos de classificação geomecânicos utilizados na atualidade. Dessa forma, o trabalho contribui para a consolidação e difusão do conhecimento e técnicas de mapeamento geológico-geomecânico.

Além disso, destaca-se a boa aplicação de técnicas geofísicas para áreas, como a observada neste trabalho, que se apresentem com acessos difíceis. Assim, observa-se o destaque da geofísica em estudos de mapeamento geológico cuja área se mostra, em boa parte, inacessível.

Por fim, destaca-se a aplicação das técnicas geofísicas voltadas para uma melhor compreensão do mapeamento e geomecânica da cava, além da avaliação de sua viabilidade como uma boa alternativa de estudo, visto a baixa disponibilidade de materiais na literatura que verifiquem essa interação.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

Na etapa de campo foram observadas e medidas informações *in situ* em rocha e solo (por vezes saprólitos com manutenção de feições litoestruturais da rocha mãe) que permitam a descrição e interpretação de dados que vieram a contribuir com o objetivo do trabalho. O acesso aos locais, assim como a descrição dos materiais e obtenção de atitudes das estruturas foram realizados com auxílio de mapas, prancheta, caderneta de campo, martelo de geólogo, bússola tipo brunton, lupa, tabela de granulometria, GPS e EPIs adequados.

Na etapa de escritório foram utilizados os softwares QGis e *Rocscience Dips* para geração de mapas e tratamento dos dados estruturais respectivamente. Com relação a geofísica, utilizou-se o banco de dados com levantamentos aéreos disponibilizado pelo Programa de Levantamento Aerogeofísico do estado de Minas Gerais (PLAMG) - CODEMIG e o *software Oasis Montaj* do sistema *GEOSOFT* para etapa inicial de tratamento de dados e novamente o QGis para geração de mapas georreferenciados em ambiente SIG.

CAPÍTULO 2

METODOLOGIA

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentadas as metodologias utilizadas em cada etapa do trabalho. Para tal, a metodologia será dividida entre as etapas de mapeamento e posterior avaliação geofísica com suas respectivas compartimentações.

Na etapa de mapeamento serão apresentados os métodos de classificação, assim como aqueles para obtenção de parâmetros geomecânicos segundo as classificações utilizadas. Já na geofísica, foram utilizados os métodos magnetométrico e radiométrico. Com intuito de minimizar ambiguidades e incertezas associadas aos métodos geofísicos (Kearey *et al.* 2009), é importante a aplicação de correções e que a interpretação seja correlacionada à resultados de investigações diretas – como descrição de testemunhos de sondagens mecânicas ou, neste caso, resultados do mapeamento.

2.2 MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO

2.2.1 Introdução

Primeiramente, foram utilizadas as técnicas de mapeamento geológico básico. Foram avaliados os dados de geologia regional, imagens de satélite sob as quais foram avaliados feições lineares e geomorfológicas. Além disso, foram considerados também dados internos da empresa – como mapeamentos geológicos anteriores e banco de dados de sondagens além das técnicas básicas para realização de mapeamento geológico em escala de detalhe (1:10.000), foram adotadas metodologias para levantamento de dados e parâmetros geomecânicos conforme detalhado a seguir.

2.2.2 Classificações e caracterização geomecânica

As metodologias utilizadas para a caracterização e classificação geomecânicas foram fundamentadas em Bieniawski (1989) e Lowson & Bieniawski (2013) dentro de sistema de classificação RMR (*Rock Mass Rating* 1989, assim como as adaptações e correções propostas para a classificação 2011). Além da classificação RMR, foi utilizado o GSI (*Geological Strength Index*: Hoek & Marinos 2000) e *Weak Rock* (Martin *et al.* 2018) – para rochas brandas/alteradas.

A Figura 2-1 a seguir exemplifica um maciço rochoso, com diferentes discontinuidades e parâmetros utilizados para suas avaliações – tanto do maciço, quanto das discontinuidades.

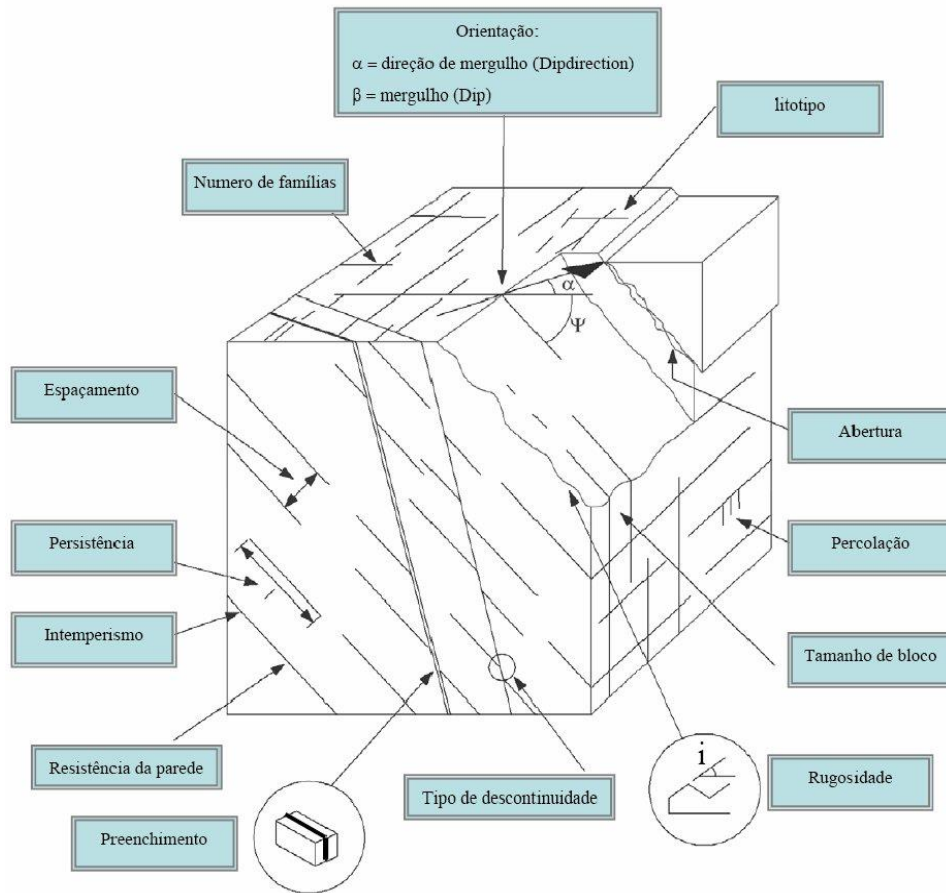


Figura 2-1 - Ilustração de um maciço rochoso, indicando as características geomecânicas caracterizadas nas descontinuidades (Wyllie 2004).

As atividades de campo, procedimentos, critérios e parâmetros para os diferentes materiais e estruturas mapeados se encontram descritos a seguir:

2.2.2.1 Caracteriação de Rocha Intacta

- **Identificação dos litotipos**, fundamentado na apreciação das suas características macroscópicas;
- **Grau de Resistência (R0-R6) e Grau de Alteração (W1-W6)**, segundo os parâmetros e critérios sugeridos por Bieniawski (2011). Entretanto, para as rochas brandas (UCS inferior a 10,0 MPa) foi utilizada a modificação sugerida por Martin et al. (2018) a fim de melhor se adaptar aos maciços (frequentemente alterados) rochosos do Brasil. Essa alteração foi publicada no *Guideline for Open Pit Slope Design in Weak Rock* e objetiva tornar mais precisa a classificação de consistência para as rochas brandas e muito brandas. A principal modificação é o desmembramento das classes R1 e R2 nas subclasses R1+, R1-, R2+ e R2- e a separação e apuração na identificação destas classes por meio táctil-visual utilizando martelo, canivete, unha, pressão dos dedos. A Tabela 2.1 demonstra essa subdivisão.

Tabela 2.1 - Tabela de Resistência ISRM modificada (Adaptado de Franca *et al.* 2018 apud BVP Engenharia 2012).

Tabela de Resistência - Avaliação em campo									
Índice de Resistência	Descrição	R (MPa)	Testes de campo						
			Martelo	Risco de Canivete	Queda do canivete	Raspagem com canivete	Risco com unha	Pressão manual	
RMR 2011	R6	Extremamente resistente	>250	Lasca	-	-	-	-	-
	R5	Muito resistente	100-250	Quebra com dificuldade após vários golpes	-	-	-	-	-
	R4	Resistente	50-100	Quebra com vários golpes	Risco superficial	-	-	-	-
	R3	Medianamente resistente	25-50	Quebra com com dificuldade		Ponto pequeno	Raspa com muita dificuldade	-	-
	R2+	Pouco resistente	10-25	Quebra com um golpe	Risca	Raspa com dificuldade	-	-	
Weak	R2-	Branda	5-10	Fragmenta com um golpe	superficialmente	Ponto grande	Produz pó	Risco superficial	-
	R1+	Muito branda - superior	3-5		Risca fundo	Produz muito pó	Risca	Quebra pontualmente	
Very Weak	R1-	Muito branda - inferior	1-3	Desagrega	Corta (separa)	Penetra	Descasca / entalha	Penetra	Quebra as bordas
Extreamly Weak	R0	Extremamente branda	0-1	-	-	Penetra	-	Corta	Desagrega

Reposta ao método	Alta	
	Média	
	Baixa	

- **Presença de água no maciço** (seco, úmido etc.): parâmetro levantado com base nos critérios sugeridos por Bieniawski (1989);
- **Contador volumétrico de descontinuidades (J_v)**: obtido a partir do espaçamento das descontinuidades e utilizado posteriormente para determinação de parâmetros como o RQD, grau de fraturamento do maciço e o tamanho dos blocos.

Para a determinação dos valores de RQD do maciço foi utilizada a metodologia recomendada por Palmstrom (2005):

$$RQD = 115 - 3,3 J_v$$

Em que: RQD = 0 para J_v > 35 e RQD = 100 para J_v < 4,5.

Dessa forma, o levantamento dos dados do contador volumétrico de juntas (J_v) utilizou-se da relação:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \dots + \frac{1}{S_n}$$

Em que: S_1 , S_2 e S_n são os espaçamentos médios para cada família de descontinuidades.

O critério de RQD sugerido por Palmstrom (2005) foi aplicado somente para o caso em que os parâmetros das descontinuidades puderam ser identificados em sua totalidade, considerando uma janela de análise no talude de 1 m². No caso das rochas que apresentam estágios avançados de alteração intempélica e de resistências iguais ou inferiores a R2, o RQD não foi levantado.

A segunda etapa na caracterização geomecânica compreende o processamento e avaliação dos dados coletados em campo. Os parâmetros geotécnicos levantados para rocha intacta, maciço rochoso e descontinuidades foram utilizados para classificação do maciço rochoso de acordo com sistema RMR (*Rock Mass Rating*) desenvolvido por Bieniawski (1989) e corrigido em Bieniawski (2011).

2.2.2.2 Caracterização das Descontinuidades

- **Tipo de estrutura:** foliação, falha, fratura etc.;
- **Atitude:** orientação espacial dos planos estruturais, utilizando a nomenclatura direção de mergulho e mergulho (*dip direction/dip*);
- **Persistência:** comprimento do traço das estruturas planares, estimada por comparação visual da altura do talude, com a extensão do traço de cada descontinuidade;
- **Espaçamento:** distância entre planos estruturais de uma mesma família, sendo obtido pela relação inversa da frequência de descontinuidades (e.g. $f = 4/m$ resulta em 0,25 m de espaçamento);
- **Abertura:** definida como a distância que separa as paredes da rocha de uma descontinuidade aberta, onde o espaço é preenchido por ar, água ou um outro material que pode ser sólido ou pastoso (mole);
- **Preenchimento:** caso ocorra o preenchimento de descontinuidades por litotipos ou materiais com parâmetros de resistência e alteração distintos das adjacências, considera-se o tipo de material de preenchimento, sua consistência e grau de resistência;
- **Rugosidade:** grau de irregularidade e/ou aspereza da superfície da descontinuidade. Corresponde às ondulações nas superfícies das descontinuidades e influência especialmente a resistência ao cisalhamento;
- **Grau de intemperismo:** grau alteração da parede da descontinuidade. É a quantificação, a partir de classes pré-definidas, do grau de alteração das estruturas. Quando não é possível sua avaliação, esse parâmetro pode ser considerado correspondente ao grau de alteração da matriz da rocha.

2.2.2.3 Classificação Geomecânica pelo Índice de Resistência Geológica (GSI – Geological Strength Index)

O Índice de Resistência Geológica, ou Geological Strength Index (GSI), é um sistema de caracterização numérica do maciço rochoso desenvolvido para o dimensionamento de túneis, taludes ou fundações rochosas. Esse método é baseado na análise visual no maciço e em suas propriedades geológicas e geotécnicas, de forma a servir como um input para o prognóstico da deformabilidade e resistência do maciço rochoso (Marinos *et al.* 2007).

Hoek & Marinos (2000) propôs um ábaco para a caracterização do GSI do maciço rochoso em campo (Figura 2-2) de forma a simplificar a análise quantitativa do material que comumente é realizada em outros métodos de classificação geomecânica. Esta metodologia leva em consideração o RQD do maciço, a presença de estruturas desfavoráveis bem como sua orientação em relação à face de escavação e as condições das descontinuidades.

ESTRUTURA		CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE				
		MUITO BOA Superfície muito rugosa, não intemperizada, fresca	BOA Superfície rugosemas, levemente intemperizada, com manchas ferruginosas	REGULAR Superfície lisa, moderadamente intemperizada e alisada	POBRE Superfície com espelho de falha, altamente intemperizada com cobertura compacta ou preenchimento de fragmentos angulares	MUITO POBRE Superfície com espelho de falha, altamente intemperizada, com cobertura ou preenchimento argiloso
INTACTA OU MACIÇA - Rocha intacta ou maciça, in situ, com poucas descontinuidades amplamente espaçadas		90			N/A	N/A
FRATURADA - Maciço rochoso não perturbado com blocos interconectados e cúbicos, formados por três famílias de descontinuidades		80	70			
MUITO FRATURADA - Maciço rochoso parcialmente perturbado, com blocos interconectados angulares e multifacetados formados por quatro ou mais famílias de juntas			60	50		
FRATURADA/PERTURBADA/DEFORMADA - Maciço rochoso dobrado, com blocos angulares formados por várias famílias de descontinuidades que se interceptam. Estratificação ou xistossidade persistentes				40	30	
DESINTEGRADA - Maciço rochoso pobremente interconectado, altamente fraturado, com fragmentos de rochas angulares e arredondadas					20	
FOLIADA/CISALHADA - Ausência de blocos devido a pouco espaçamento de xistossidades de baixa resistência ou planos de cisalhamento		N/A	N/A			10

Figura 2-2 - Ábaco GSI para maciços rochosos (Hoek & Marinos 2000) – Traduzido por Machado (2022).

2.2.3 Classificações Geomecânicas RMR e *Weak Rock*

A definição das classes de maciço foi realizada tomando-se como base os parâmetros levantados nas descrições geológicas, geotécnicas e geomecânicas realizadas em campo, o que proporcionou o agrupamento de maciços com comportamentos similares.

Para a identificação destes grupos foram utilizados os critérios de classificação do sistema RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (2011), variando das classes I à V, correspondentes a um maciço de qualidade geomecânica elevada à muito baixa.

Ressalta-se que a aplicabilidade pouco eficiente do RMR em maciços brandos está relacionada à ampla variedade de comportamento geomecânico e dificuldade de classificar as descontinuidades na classe IV/V do sistema RMR. Desta forma, para as rochas brandas, muito brandas e extremamente brandas foi utilizado o critério proposto por Martin & Stacey (2018), no qual materiais com resistência entre 10 e 3 MPa (R2⁻ e R1⁺) são classificados como *Weak*, materiais com resistência entre 3 e 1 MPa são classificados como *Very Weak* e com resistência inferior a 1 MPa como *Extremely Weak*.

A classificação dos maciços *Weak Rock* é realizada somente pelo índice de resistência, que pode ser aferido em campo pelas características físicas táctil-visuais, tais como golpe do martelo, risco e raspagem do canivete, risco a unha e pressão manual conforme anteriormente exemplificado na Tabela 2.1.

A classificação geomecânica dos maciços com resistência igual ou superior a R2⁺ foi baseada nos parâmetros e pesos definidos por Bieniawski (1989 e 2011), que considera:

- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;
- RQD (*Rock Quality Designation*);
- Espaçamento das descontinuidades;
- Condição das descontinuidades;
- Condição da água nos maciços.

A Tabela 2.2 apresenta a relação dos parâmetros e os pesos no sistema de classificação de Bieniawski.

Tabela 2.2 - Valores do RMR - Bieniawski (1989).

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta	Point Load	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	R.Q.D.		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 (ver Tabela 3)		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	Presença de água	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	Húmido	Escorrimentos	Entrada de água		
	Pesos		15	10	7	4	0		

Bieniawski, na atualização do sistema RMR em 2011, apresenta os gráficos para avaliação dos pesos atribuídos aos parâmetros analisados e mostra que estes não precisam ser utilizados como valores discretos, e sim dentro de uma faixa de resistência, RQD e espaçamento com valores contínuos, uma vez que as condições do maciço podem variar e, nem sempre as tabelas guias refletem exatamente a situação observada no decorrer do projeto.

Nesse contexto, o autor enfatiza que as pontuações mínimas são iguais a zero e que os valores da tabela original do RMR (Tabela 2.2) representam o valor médio de cada parâmetro. Os gráficos mencionados são apresentados na Figura 2-3.

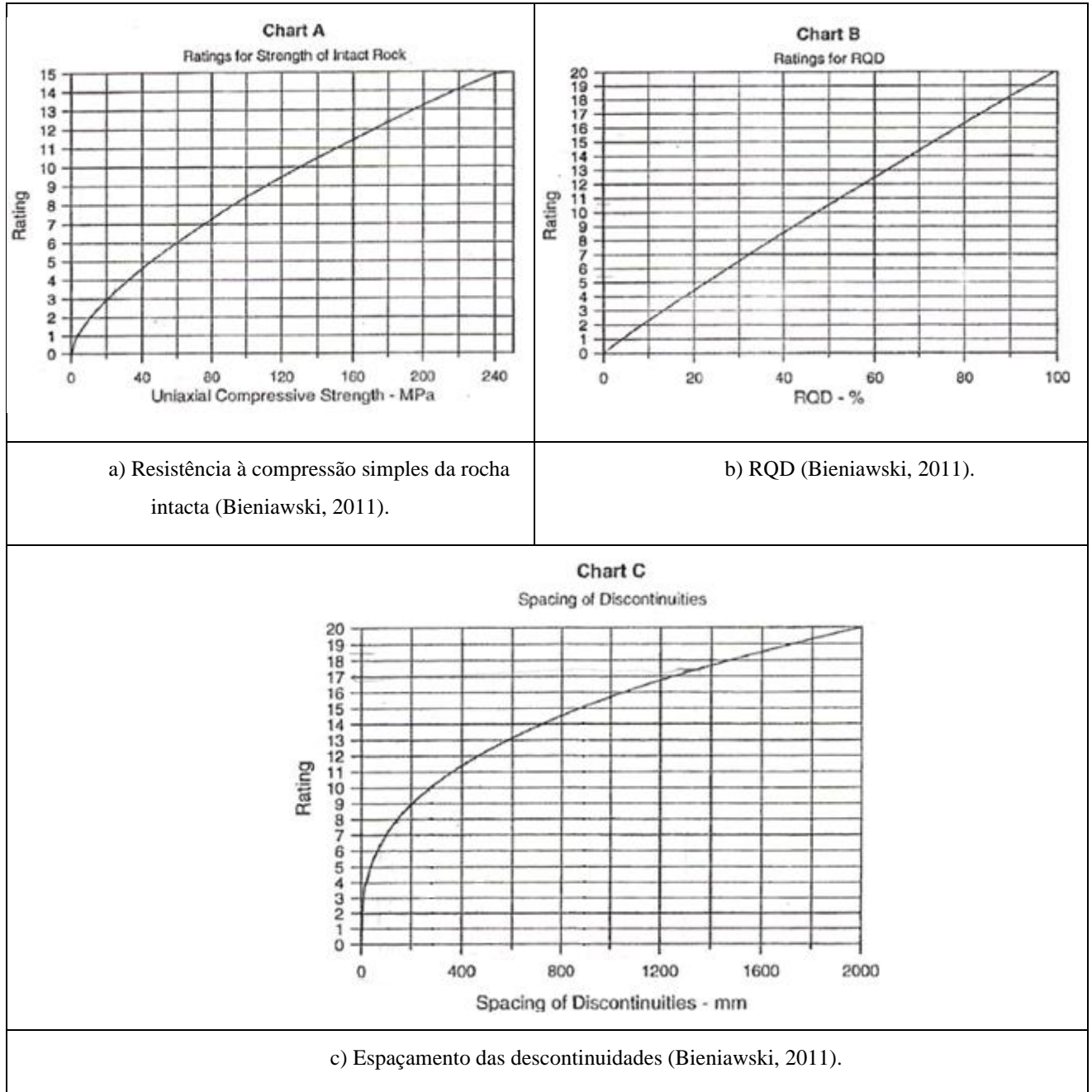


Figura 2-3 - Gráficos para avaliação dos pesos atribuídos aos parâmetros de Resistência (a), RQD (b) e Espaçamento das Descontinuidades (c).

Para caracterização dos maciços neste trabalho, adotou-se o sistema de RMR (*Rock Mass Rating*) atualizado por Bieniawski em 2011.

2.3 MÉTODOS GEOFÍSICOS

2.3.1 Apresentação

Neste capítulo serão apresentados os aspectos e fundamentos teóricos dos métodos geofísicos utilizados neste trabalho. O banco de dados utilizado compõe o levantamento aeromagnetométricos e

aeroradiométricos disponibilizados pela CODEMIG. A base de dados corresponde à Área 02, obtida a partir do Levantamento Aerogeofísico de Minas Gerais da CODEMIG, ao longo dos anos de 2005 e 2006.

A partir do banco de dados, foram gerados mapas temáticos, por método geofísico, para avaliação da área de estudo. A geração dos mapas se deu partir do *software Oasis Montaj – GEOSOFT* – e, posteriormente, o *software QGis* foi utilizado com intuito de visualização, integração e interpretação dos mapas gerados. Estes mapas georreferenciados foram integrados aos demais (resultantes da etapa de mapeamento) em ambiente SIG, para sequente avaliação qualitativa.

Em seguida foram realizadas integrações entre os dados obtidos em ambos os métodos geofísicos com aqueles resultantes do mapeamento para interpretações de anomalias geofísicas de acordo com as estruturas e litologias mapeadas na área de estudo.

2.3.2 Magnetometria

2.3.2.1 Introdução

Uma das principais aplicações da magnetometria é investigar a geologia de uma área com base nas anomalias do campo magnético terrestre, resultantes das propriedades magnéticas das rochas em subsuperfície. Tendo em vista que grande parte dos minerais formadores de rochas não apresentam magnetismo, alguns deles, que apresentam essa propriedade, geram anomalias magnéticas que podem ser usadas com diferentes intuítos. Esses minerais, em sua maioria, são compostos por óxidos e sulfetos altamente magnéticos – tais como magnetita, hematita, pirrotita e ilmenita. Uma de suas principais aplicações é a detecção de depósitos de interesse econômico associados a esses minerais, outro – como é o caso deste trabalho – seria a detecção de materiais e ou estruturas geológicas de interesse geológico-geomecânico. Os levantamentos magnetométricos podem ser realizados em terra, mar e ar, são considerados métodos de baixo custo e com alta velocidade de levantamento, sendo assim, técnicas amplamente empregadas na atualidade.

2.3.2.2 O campo magnético terrestre

O campo magnético da terrestre é análogo a um ímã cujos polos geográficos representam, também, os polos magnéticos. Segundo Halliday (1996) os polos magnéticos são inversos aos polos geográficos, isso é, o polo norte e sul geográficos são o sul e norte magnéticos respectivamente. Segundo o autor, a origem do campo magnético é relacionada à Teoria do Dínamo: a movimentação dos materiais (especialmente ferrosos, com propriedades eletromagnéticas) produzem correntes elétricas nesses materiais. A variação na intensidade das correntes seria responsável por produzir o

campo magnético ao seu redor, de forma análoga a um solenoide. A Figura 2-4 a seguir exemplifica a relação descrita.

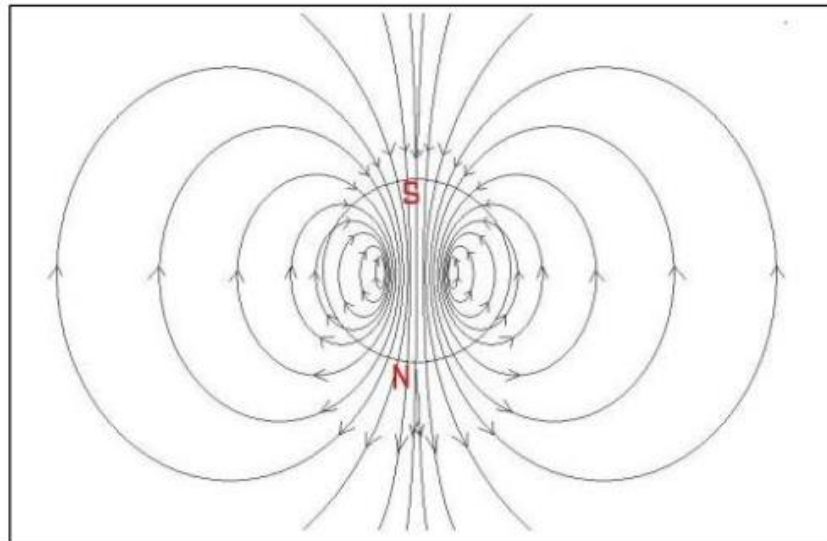


Figura 2-4 – Linhas de força do campo magnético terrestre – obtido de Halliday (1996).

2.3.2.3 Susceptibilidade magnética dos materiais

A susceptibilidade magnética é a capacidade dos materiais magnéticos apresentarem uma resposta a determinado estímulo magnético, isso é, magnetizar-se sob a influência de um campo magnético. Esses materiais são subdivididos em três classes segundo seu comportamento quando submetidos a um campo magnético, são eles:

- Paramagnéticos: Apresentam menor susceptibilidade magnética e se orientam conforme o campo magnético presente, o que resulta em forças atrativas;
- Ferromagnéticos: Alta susceptibilidade magnética conforme o campo magnético presente, também reagem de forma atrativa à presença do campo magnético;
- Diamagnéticos: Apresentam menor susceptibilidade magnética no sentido contrário ao campo presente, de forma que reagem de forma repulsiva.

Segundo Luiz e Silva (1995) os materiais cujo comportamento magnético favorecem a detecção de anomalias em levantamentos de magnetometria são os ferromagnéticos, com destaque para os minerais magnetita, pirrotita e ilmenita.

Para avaliação das anomalias magnéticas e seus contrastes é importante se considerar a susceptibilidade magnética das rochas presentes na área de estudo. A susceptibilidade dessas rochas depende, por sua vez, da susceptibilidade dos minerais que a compõe, além da quantidade, distribuição e tamanho de seus grãos.

As rochas sedimentares são as que costumam apresentar menores valores de susceptibilidade magnética (Kearey *et al.* 2009). Isso ocorre, provavelmente, como consequência da alta proporção de sílica nessas litologias.

Segundo Oliveira (2020) as rochas metamórficas apresentam, de forma geral, baixa susceptibilidade magnética, no entanto a ocorrência de estruturas de caráter rúptil-dúctil favorece o acúmulo materiais ferromagnéticos nessas estruturas, o que resulta em uma melhora na resposta magnética nesses locais.

As rochas ígneas já apresentam melhores respostas magnéticas quando comparadas às demais, mas ainda assim sua resposta vai depender diretamente de sua gênese. Rochas básicas (máficas e ultramáficas, ricas em minerais ferromagnesianos) são aquelas que tendem a apresentar melhor resposta magnética, em detrimento das félsicas ou ácidas, que apresentam susceptibilidade maior que as metamórficas mas menor que das máficas e ultramáficas (Kearey *et al.* 2009). A Figura 2-5 exemplifica essa relação.

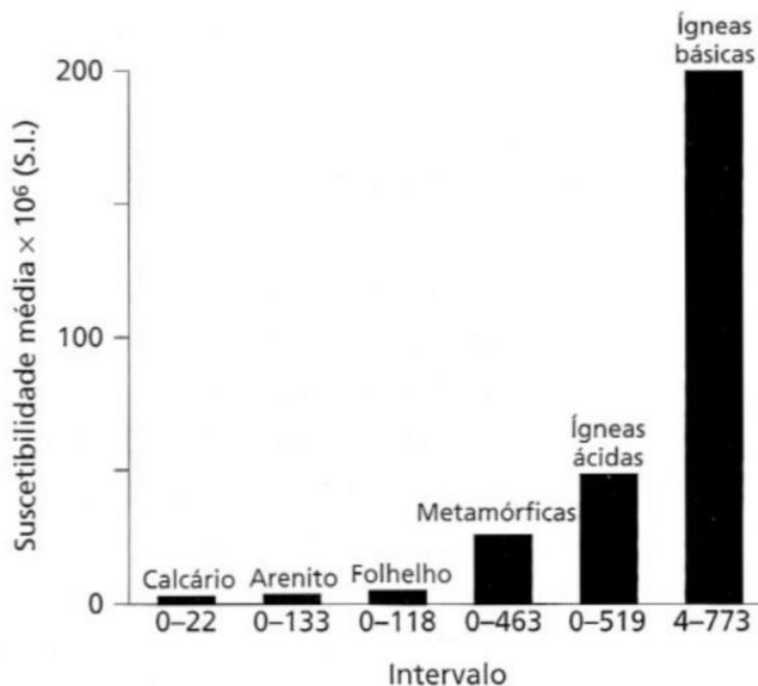


Figura 2-5 – Valores médios de susceptibilidade magnética por tipo de rochas. Obtido de Kearey *et al.* 2009.

2.3.2.4 Levantamento magnetométrico

O método magnetométrico se apresenta como uma das melhores alternativas quando pensado em custo-benefício, visto a boa qualidade da resposta e os baixos custos associados ao levantamento e tratamento dos dados. O Levantamento pode ser realizado de forma terrestre, aérea ou marinha. A

primeira é mais aplicada para áreas menores, em levantamentos de maior nível de detalhe, as outras duas para áreas maiores em menor nível de detalhe (Luiz & Silva 1995).

Para realização do levantamento, utiliza-se o instrumento magnetômetro, normalmente seu *fluxgate* é construído a partir de bobinas envolvidas com material ferromagnético. Esse equipamento produz um campo magnético (campo de pressão nuclear) que interage com os materiais e campo magnético natural. Dessa forma, o equipamento utiliza uma fonte e sensor ótico que avalia a frequência de precessão dos prótons, além do bombeamento ótico realizado a partir de uma fonte luminosa que energiza os elétrons. Desse processo, mede-se a diferença de energia a partir dos subníveis de deslocamento dos elétrons, de forma que essa diferença seja relacionada ao campo magnético terrestre.

No equipamento citado, os elementos mais utilizados são o cézio, rubídio, sódio ou hélio – uma vez que fornecem medidas mais assertivas e favorecem a medida de elevados gradientes magnéticos – especialmente nos casos em que ocorrem grande volume de material magnético, tal como nos depósitos de minério de ferro (Luiz & Silva 1995).

Em levantamentos aéreos, utiliza-se um equipamento acoplado à aeronave. Normalmente, esse equipamento se constitui de um instrumento de bombeamento ótico ou de pressão nuclear. A amostragem é realizada a partir de uma malha de voo pré-definida, que deve cobrir toda a área de estudo, compostas pelas linhas de produção (transversais ao alvo) e linhas de controle (perpendiculares às de produção). As linhas controle possuem este nome visto que sua utilização está associada à detecção de possíveis variações na leitura do equipamento (Luiz & Silva 1995).

Por fim, no levantamento aéreo é importante que o voo seja realizado a uma altitude constante e não muito elevada com relação ao terreno visto que uma maior distância do terreno natural implica menor acurácia no levantamento e, conseqüentemente, maiores distorções e perda de resolução (Kearey *et al.* 2009).

2.3.2.5 Anomalias magnéticas

A anomalia magnética de um corpo se refere às diferenças – positivas ou negativas – observadas no levantamento magnetométrico. A intensidade (ou módulo) da magnetização é obtida a partir do vetor campo magnético resultante na interação, a direção do vetor ditará a forma da anomalia observada (Kearey *et al.* 2009). Por isso, Keary ainda afirma que corpos com uma mesma forma podem gerar anomalias distintas, visto que podem apresentar diferenças na composição, tamanho, forma e quantidade de minerais ferromagnéticos.

2.3.2.6 Tratamento dos dados

Os dados obtidos na etapa de mapeamento devem ser tratados para que sejam aplicadas as correções a depender da aplicação do trabalho. Dentre os fatores que podem causar ruídos nas avaliações, destaca-se variações por efeito de latitude e diferenças no campo magnético terrestre (Oliveira, 2020).

Oliveira ainda aponta que a principal correção aplicada deve ser a geomagnética, cujo intuito é a remoção do efeito do campo magnético de referência ou normal: IGRF (*Internation Geomagnetic Reference Field*). Além dessa, destaca-se a correção de variação diurna, aplicada para corrigir os efeitos da variação do campo magnético terrestre ao longo do dia, devido às variações diárias observadas na ionosfera terrestre (Oliveira 2020). Por fim, a correção de elevação do terreno também deve ser realizada, de forma a desconsiderar as variações do campo magnético consequentes das diferenças topográficas em cada região. No entanto, segundo Oliveira essa última correção não é muito aplicada, devido às dificuldades relacionadas a aplicação dessa técnica. Normalmente, tenta-se minimizar as variações consequentes da variação topográfica a partir da realização de voos em altura constante e adequada para cada região.

Outra parte importante da etapa de tratamento é a aplicação dos filtros. Estes devem ser aplicados com intuito de se remover o máximo das interferências geológicas afim de se ressaltar características mais importantes e evidentes do levantamento (Luiz & Silva 1995). A partir do campo anômalo, filtra-se por derivadas horizontes nas direções X e Y, além de vertical na direção Z com o intuito de evidenciar estruturas N-S e E-W. A utilização do mapa de Amplitude do Sinal Analítico (ASA) também se apresenta como uma boa alternativa para tratamento e apresentação dos dados visto que é realizada a transformação dos dados de campo de dipolar para monopolar (Oliveira 2020). Segundo Thompson (1982) essa filtragem é essencial para realização das análises magnetométricas, uma vez que auxilia na determinação de limites geológico-estruturais, além da delimitação da profundidade de contatos entre corpos geológicos. Além disso, apresenta o dado geofísico de forma independente do campo magnético da Terra, e da direção de magnetização da fonte, favorecendo a localização mais precisa das anomalias e evidenciando a existência de magnetizações remanescentes (Kearey *et al.* 2009).

Outros filtros, tal como diferenças de frequência e amplitude das fontes, também podem ser aplicados para remoção de ruídos a depender da finalidade geofísica. A Figura 2-6 a seguir exemplifica a aplicação dos filtros de Fourier em conjunto com as diferentes finalidades geofísicas.

	Filtros	Finalidade Geofísica
Derivadas	Gradiente vertical (1ª derivada)	Evidencia estruturas superficiais.
	Gradiente residual (2ª derivada)	Remove anomalias regionais e realça anomalias locais.
	Gradiente horizontal em X	Evidencia estruturas N-S.
	Gradiente vertical em Y	Destaca estruturas E-W.
	Amplitude do sinal analítico	Projeção em superfície das anomalias em profundidade.
	Tilt Derivativo	Derivada do ângulo de inclinação da anomalia. Fornece uma estimativa do local de origem dos dados magnéticos.
Continuação	Para cima	Retira anomalias superficiais.
	Para baixo	Retira anomalias mais profundas (instável)
Frequência	Passa banda	Determina intervalo de frequência.
	Passa alta	Retira dados de baixa frequência, obtendo informações mais superficiais.
	Passa baixa	Retira dados de alta frequência, obtendo informações mais profundas.

Figura 2-6 – Filtros de Fourier com suas respectivas finalidades geofísicas. Obtido de Barbosa & Oliveira (2020).

Segundo Oliveira (2020), outro filtro que pode ser aplicado é o de inclinação do sinal analítico (TILT) que demonstra a relação da primeira derivada vertical (VDR) com os gradientes verticais (THDR). Essa relação destaca anomalias de grandes e pequenas amplitudes (Miller & Singh 1994). O filtro TILT pode ser usado para demonstrar a posição de anomalias uma vez que posiciona valores máximos de anomalias no centro do corpo anômalo, reduzindo para zero os valores em suas proximidades – o que inviabiliza sua aplicação para delimitação de bordas (Cooper & Cowan 2008).

2.3.3 Gamaespectrometria

2.3.3.1 Introdução

A gamaespectrometria constitui-se da detecção de emissões nucleares das rochas cuja constituição é composta de elementos radioativos, denominados radioelementos. Dentre estes, destaca-se o urânio (U), tório (Th) e o potássio (K) como alguns dos principais elementos presentes nas rochas litosféricas e, conseqüentemente, com boa aplicação nas análises radiométricas (Kearey *et al.* 2009). Sua ocorrência natural costuma ocorrer em maior proporção em rochas ígneas ácidas quando comparadas às básicas e ultrabásicas, conforme exemplificado na Figura 2-7.

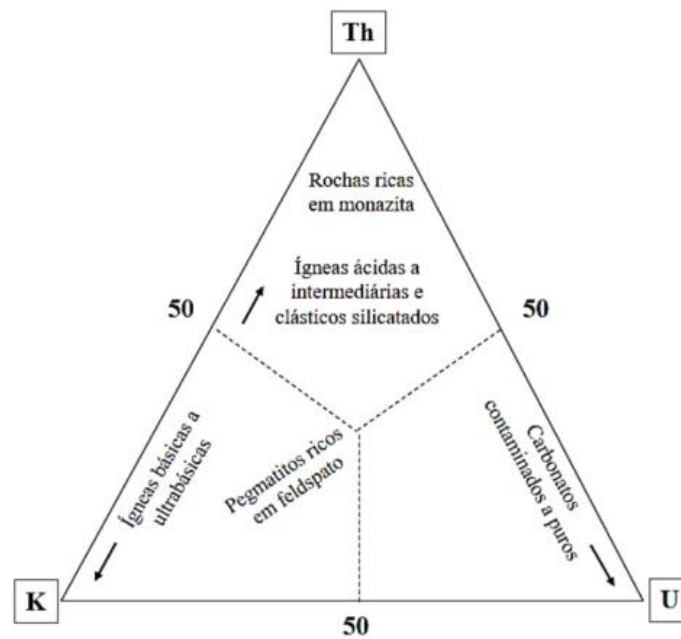


Figura 2-7 – Abundância dos principais radioelementos por tipos de rocha – Oliveira (2020), modificado de Kearey *et al.* 2009.

A radiometria costuma ser aplicada como ferramenta auxiliar em mapeamentos geológicos, visto o padrão de emissão radioativo observado nos elementos que se apresentam em diferentes proporções em cada rocha – o que favorece suas distinções em determinadas áreas e a identificação de seus contatos. Destaca-se, no entanto, que sua aplicação está limitada a pequenas profundidades.

2.3.3.2 Radioatividade

A radioatividade é um fenômeno natural relacionado à quebra de elementos naturalmente instáveis. Essa quebra costuma envolver um ou mais prótons (motivo pelo qual se observa a mudança do elemento químico) associada à liberação de energia na forma de partículas ou ondas eletromagnéticas. Os tipos mais comuns observados nesse processo são as partículas alfa (α), beta (β) e raios gama (γ). Esse processo resulta no rebaixamento do estado energético do elemento e, conseqüentemente, sua relocação em um estado de maior estabilidade natural.

Os levantamentos realizados neste método são baseados na quantificação dessas partículas ou ondas emitidas pelos elementos radiotativos presentes nos minerais componentes de cada rocha. Nesse processo, apenas radiações beta e gama são consideradas – visto que apresentam maior potencial energético e, conseqüentemente, maior facilidade de captação. Somente essas duas formas de radiação podem ser detectadas no levantamento aéreo.

Partículas gama são equivalentes à um elétron e costumam ser liberada no processo de quebra de um nêutron em um próton e um elétron. Esse processo mantém no núcleo o próton (aumentando o

número atômico) e libera a partícula beta na forma de radiação livre, o que acaba gerando um elemento diferente daquele inicial.

Já o raio gama constitui-se de radiação eletromagnética liberada no processo de decaimento atômico e desintegração do átomo. Sua detecção auxilia na identificação das propriedades dos materiais que compõe a área de estudo.

2.3.3.3 Levantamento radiométrico

Tendo em vista a baixa penetrabilidade dos resultados radiométricos, sua aplicação é melhor aplicada à corpos e estruturas subaflorescentes. Normalmente, este tipo de levantamento é realizado de forma aérea em conjunto com levantamentos magnetométricos. A altitude de voo deve ser a mais baixa possível para melhor captação das radiações emitidas (Kearey *et al.* 2009).

2.3.3.4 Tratamento dos dados

Os dados radiométricos apresentam-se muito relevantes no contexto da geologia e geofísica atuais. Devido a dificuldades de campo, tais como de acessos ou regiões recobertas por materiais antrópicos (como edificações) ou até mesmo naturais (como vegetação), torna-se difícil a identificação ou locação visual de corpos, contatos ou estruturas geológicas. Nesse sentido, a radiometria se apresenta como uma alternativa assertiva e de baixo custo para geração de mapas e sequente auxílio nessa identificação geológica-geofísica.

Em regiões em que ocorrem falhas e fraturas geológicas, destaca-se a importância da avaliação radiométrica, em especial pelos métodos de U e Th, devido a remobilização de U originada nos processos de percolação fluidos subsuperficiais (Musset & Khan 2001).

A avaliação dos dados obtidos é feita a partir da confecção de mapas temáticos. Nesses mapas, observa-se os padrões e presença de anomalias sob as quais serão realizadas as sequentes análises de teores de elementos e suas interpretações. Segundo Musset & Khan (2000) apresentam uma compilação dos principais levantamentos radiométricos, assim como de suas melhores aplicações. São estes:

1. Canal de Potássio (K): Indicado para identificação de rochas ricas em K, com destaque para os minerais da grupo dos K-feldspatos e micas (como rochas de origem sedimentar e granitoides), além da identificação de depósitos evaporíticos superficiais – como carnalita e silvita.
2. Canal de Tório (Th): Caracterização de áreas muito intemperizadas, normalmente a maior concentração de Th pode ser associada ao processo de decaimento do U. Dessa

forma, entende-se que o tempo de deposição desses materiais deve ser maior para que parte significativa do U tenha se transformado em Th. Como os levantamentos abrangem poções muito superficiais da litosfera, entende-se também que estes materiais devem se encontrar intensamente intemperizados.

3. Canal de Urânio (U): Identificação de minerais acessórios ricos em U, tais como uraninita, comumente observada em pegmatitos, granitoides ou rochas formadas em ambiente oxidante.

Por fim, são realizadas também as análises das razões entre os elementos avaliados: Th/K, K/U, U/Th e o fator F ($K \times U/Th$). Ainda segundo Oliveira, essas avaliações são utilizadas com intuito de ressaltar as relações entre os elementos nas áreas de estudo, destacando anomalias e demonstrando os contrastes. A razão Th/K costuma auxiliar na identificação de regiões com ocorrência de hidrotermalismo e anomalias potássicas associadas à contatos geológicos. A razão U/Th, por outro lado, pode auxiliar no entendimento do ambiente de formação dos litotipos avaliados, assim como suas idades relativas pela relação de decaimento (U-Th) descrita anteriormente.

3.1 GEOLOGIA REGIONAL

O Cráton São Francisco (Almeida 1977) compreende uma das porções mais interiores e estáveis da placa Sul-Americana, composta por rochas arqueanas e paleoproterozoicas que não foram afetadas pelo Ciclo Brasileiro ou por orogenias mais jovens.

A porção oeste do Quadrilátero Ferrífero (Dorr 1969) situa-se em parte na porção sudeste do Cráton São Francisco, enquanto a parte leste pertence ao Orógeno Araçuaí (Figura 3-1). A geologia do Quadrilátero Ferrífero é representada por uma típica seqüência arqueana composta por terrenos granito-gnáissicos de alto grau metamórfico. Sobre estes foram depositadas rochas do Supergrupo Rio das Velhas, metavulcanossedimentares do tipo *greenstone belts*, também de idade arqueana (Dorr, 1969). Sobrepondo essa seqüência, encontram-se rochas metassedimentares proterozoicas do Supergrupo Minas (Dorr 1969), e dos Grupos Sabará (Renger *et al.* 1994) e Itacolomi.

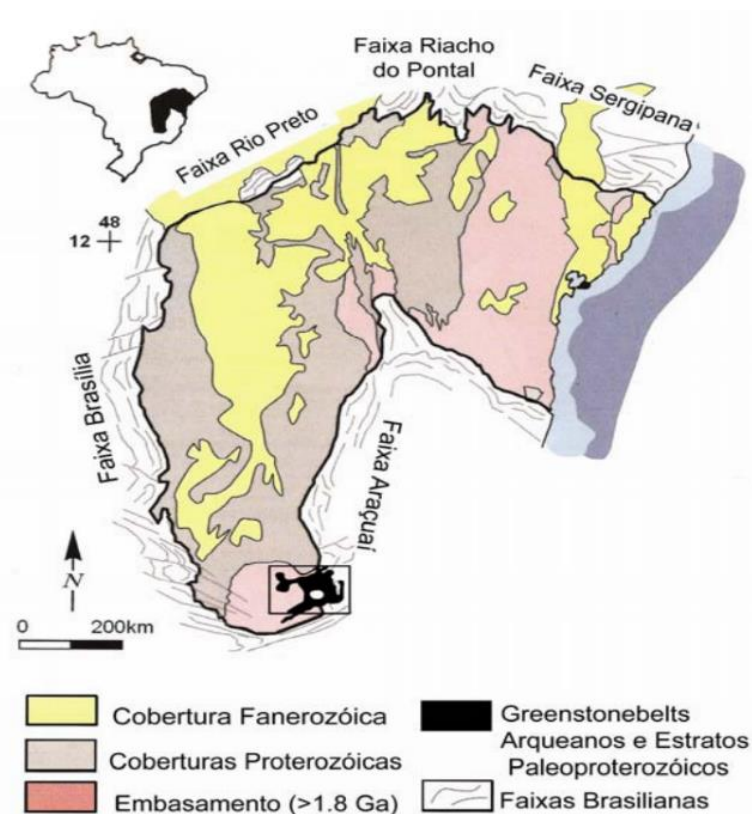


Figura 3-1 - Localização do Quadrilátero Ferrífero no Cráton do São Francisco (Alkmim 2004).

O Quadrilátero Ferrífero (QF) constitui uma importante província mineral brasileira, em virtude dos seus expressivos depósitos de minério de ferro e ouro, entre outros. O termo Quadrilátero Ferrífero foi introduzido por Dorr (1957), devido ao formato aproximadamente retangular da expressão em superfície das formações ferríferas e quartzitos associados ao Supergrupo Minas, mais resistentes à erosão que os terrenos dominados pelo *greenstone belt* e os complexos granito-gnáissicos da região. Geralmente, essas rochas mais resistentes se compõem as cristas das serras que limitam a província mineral e representam a expressão superficial de uma série de sinclinais e anticlinais que constituem o arcabouço estrutural da região.

A estratigrafia regional do Quadrilátero Ferrífero compreende quatro grandes conjuntos litológicos, como pode ser observado no mapa geológico da Figura 3-2:

- Complexos Metamórficos;
- Supergrupo Rio Das Velhas;
- Supergrupo Minas;
- Supergrupo Estrada Real.

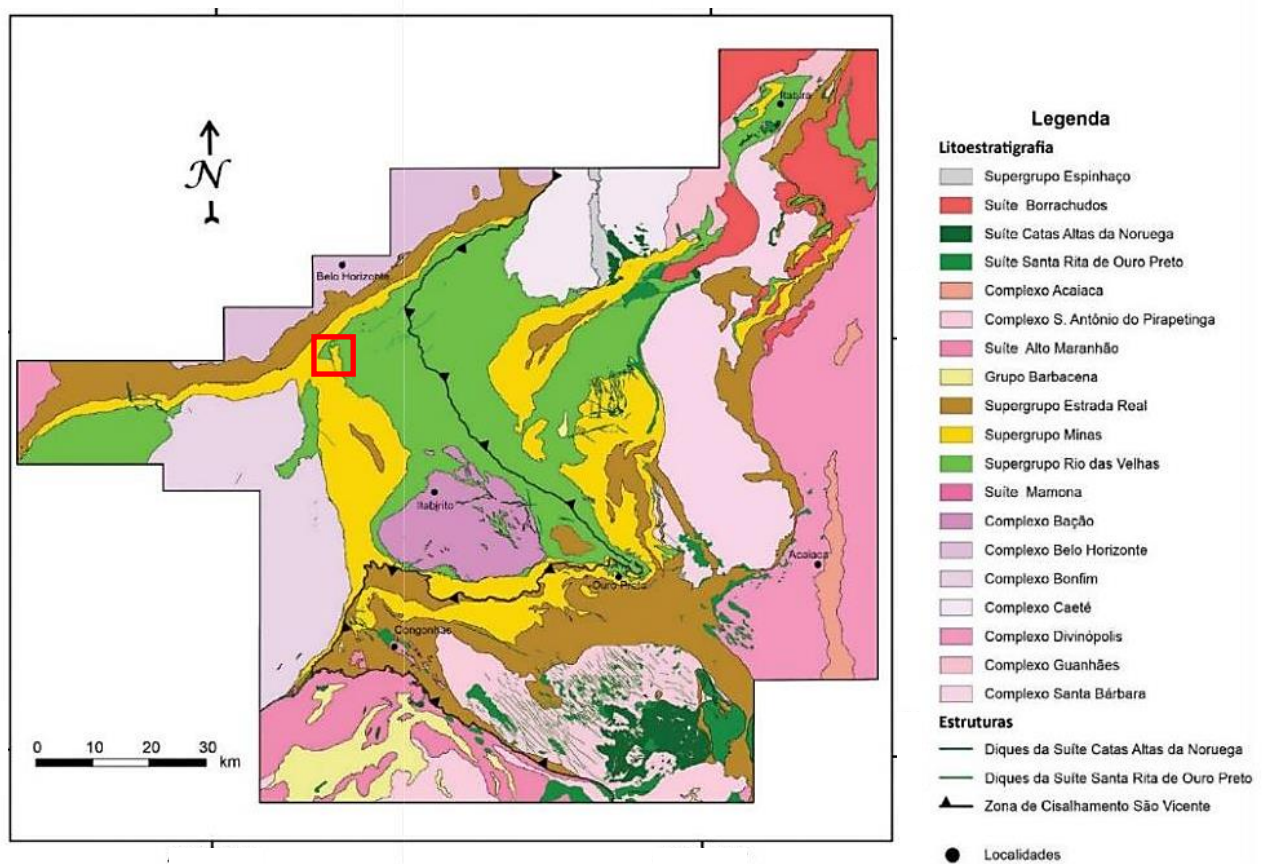


Figura 3-2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2019). Destacada, pelo retângulo vermelho, a área de estudo contemplada.

O embasamento do Quadrilátero Ferrífero é composto por terrenos granito-gnáissicos e migmatitos de composição granodiorítica-tonalítica-trondhjemítica (TTG), com idades de cristalização arqueanas variando entre 3,2 a 2,7 Ga (Teixeira *et al.* 2000; Lana *et al.* 2013). É representado pelos Complexos Metamórficos Caeté (CMC), Belo Horizonte (CMBH), Bonfim (CMBf), Santa Bárbara (CMSB), Bação (CMB) e Mantiqueira (CMM).

O Supergrupo Rio das Velhas compreende, ao menos, duas gerações de *greenstone belts* datadas em cerca de 2,90 e 2,78 Ga (Baltazar & Zucchetti 2007). É constituído de sequências metavulcanossedimentares arqueanas, divididas em três grupos distintos, onde o Grupo Quebra Osso ocupa a base de sua coluna estratigráfica (Endo *et al.* 2019), sobreposto pelo Grupo Nova Lima, seguido pelo Grupo Maquiné, no topo.

O Supergrupo Minas é uma sequência metassedimentar de idade paleoproterozoica (Machado *et al.* 1989; Babinski *et al.* 1991) dividida em três Grupos, sendo o Grupo Caraça a unidade basal, constituída por metassedimentos clásticos, a unidade intermediária, representada pelos sedimentos químicos de ambiente plataformar do Grupo Itabira, e o Grupo Piracicaba, a unidade de topo,

composta também por metassedimentos clásticos. Na base do Supergrupo Minas se encontra ainda o Grupo Tamanduá, de ocorrência restrita e composto por quartzitos, xistos quartzosos e argilosos e itabiritos filíticos e dolomíticos, situado estratigraficamente entre os Grupos Maquiné e Caraça.

O Supergrupo Estrada Real reflete uma sucessão do tipo *flysch* e molassa sin-orogênicos, representadas pelas rochas metassedimentares marinhas do Grupo Sabará, que se encontra sotoposto as unidades do Grupo Piracicaba, e continentais do Grupo Itacolomi, de ocorrência restrita à região de Ouro Preto, registrando idades de deposição em cerca de 2,1Ga (Dorr 1969, Endo *et al.* 2020).

As rochas do Quadrilátero Ferrífero se apresentam intrudidas por uma série de suítes ígneas que datam sobretudo do neoproterozoico, além de coberturas terciárias e quaternárias. A Figura 3-3 apresenta a coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.

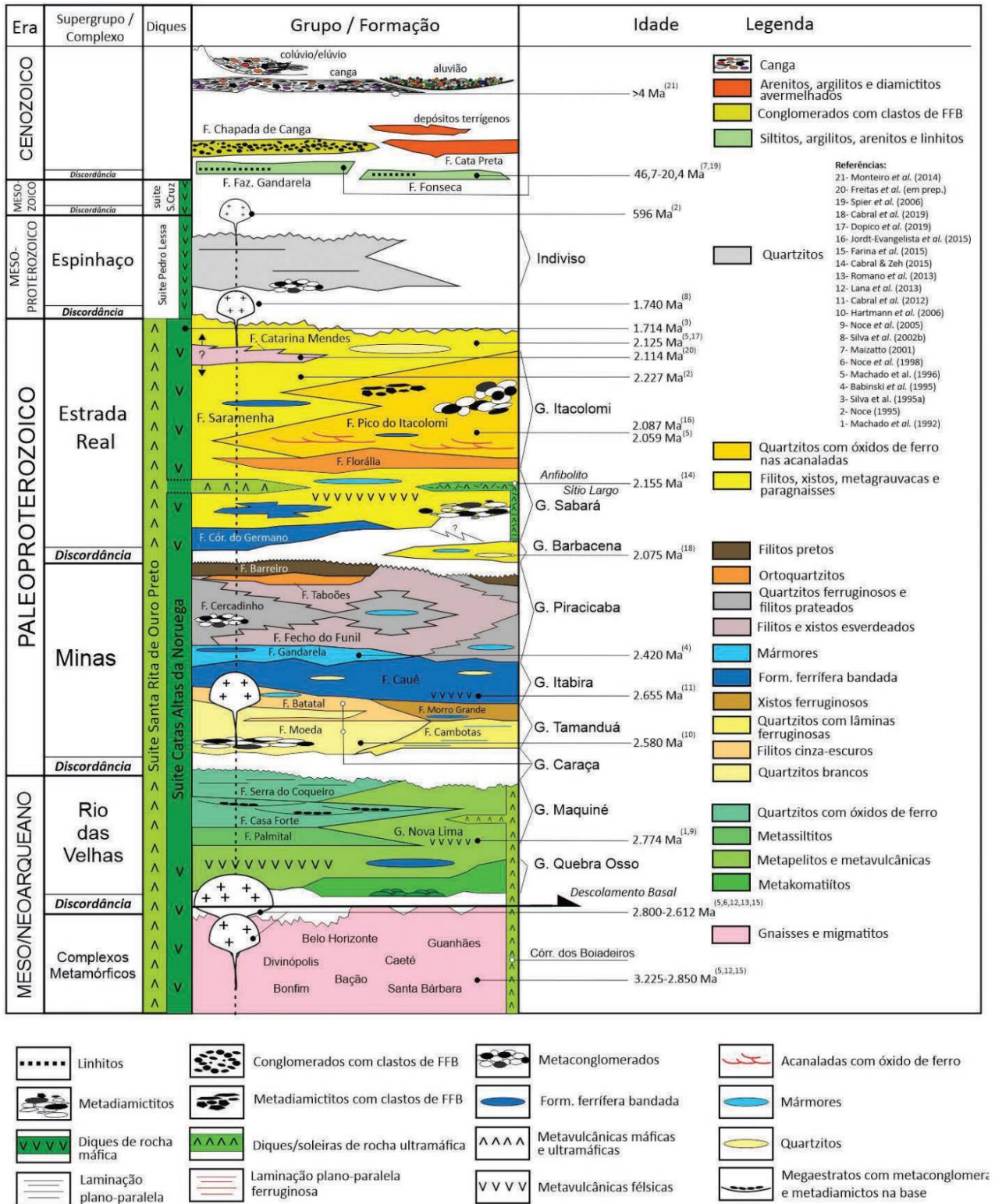


Figura 3-3 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2019).

Há megaestruturas orientadas em todo o Quadrilátero Ferrífero, com sinformes, antiformes e *nappes*, além de outras estruturas em dobras associadas a falhas. As principais estruturas são:

- o arqueamento Rio das Velhas, que corresponde a uma estrutura arqueada de grande extensão;
- o anticlinal de Mariana, que se localiza na região sudeste do Quadrilátero Ferrífero;
- o sinclinal Dom Bosco, também localizado na porção sudeste;
- o sinclinal Santa Rita, que se encontra na porção oeste;
- os sinclinais Gandarela, Moeda e Ouro Fino, na porção noroeste;
- o homoclinal da Serra do Curral, situado na porção norte.

Além das megaestruturas, ocorrem também grandes falhamentos. São eles: Fundão, Engenho, Cambotas e Água Quente (Dorr 1969).

Dessa forma, o Quadrilátero Ferrífero é constituído por rochas supracrustais arqueanas e paleoproterozoicas alóctones sobre o embasamento cristalino, sendo polideformadas e metamorfizadas em baixo a médio grau, organizando-se em dois sistemas: a Nappe Curral com vergência para NNE e o Sistema de Nappes Ouro Preto com vergência para SSW (Endo *et al.* 2005).

A Nappe Curral (Figura 3-4) é uma megadobra alóctone com vergência para norte que domina o cenário estrutural da porção ocidental do Quadrilátero Ferrífero. A zona de charneira desta estrutura compreende a região da junção do Homoclinal Curral e do Sinclinal Moeda, materializada pelo anticlinal Curral-Bonfim cuja atitude axial é 120/60. Tal anticlinal força um escape lateral de massas, dobrando e rotacionando as unidades supracrustais responsáveis pela gênese dos sinclinais e anticlinais com eixos ortogonais a direção principal E-W (p.ex.: Anticlinal Catarina, Sinclinal Gaivotas e Moeda; Endo *et al.* 2005; Madeira 2018).

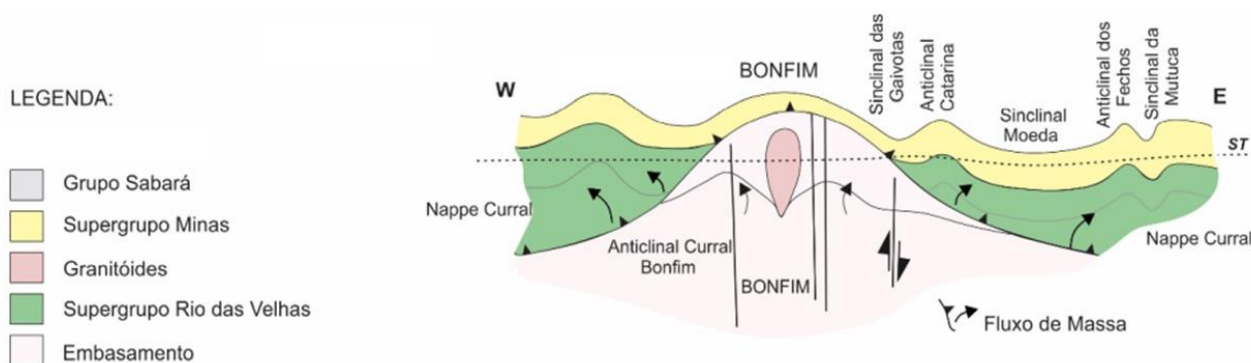


Figura 3-4 - Seção modelo da Nappe Curral (Endo *et al.* 2005. Adaptado de Madeira 2018).

O flanco normal se encontra redobrado, formando o Sinclinal Moeda, e se estende continuamente desde a região da Mina de Capão Xavier até as proximidades da Mina de Fábrica. O

front da nappe está indicado pela falha de empurrão do Curral, localizada na interface entre o Grupo Sabará e o Supergrupo Minas, a norte da Serra do Curral (Endo *et al.* 2005).

3.2 GEOLOGIA LOCAL

Tendo em vista que a área de estudo se encontra sobre a Nappe Curral, destaca-se que as principais dobras associadas à essa estrutura são os anticlinais Curral-Bomfim, dos Fechos e Catarina, além dos sinclinais Moeda, Mutuca, Gaivotas e Mangabeiras (Figura 3-4). Falhas de empurrão com mergulhos para SE, como por exemplo, as falhas Mutuca, Gorduras, Catarina e Barreiro (Figura 3-5) cortam o Sinclinal da Moeda e a Serra do Curral, refletindo um campo compressivo ESE-WNW. Dentre as estruturas, destaca-se uma foliação com orientação preferencial 115/55 (Alkmim & Marshak 1998; Endo *et al.* 2005).

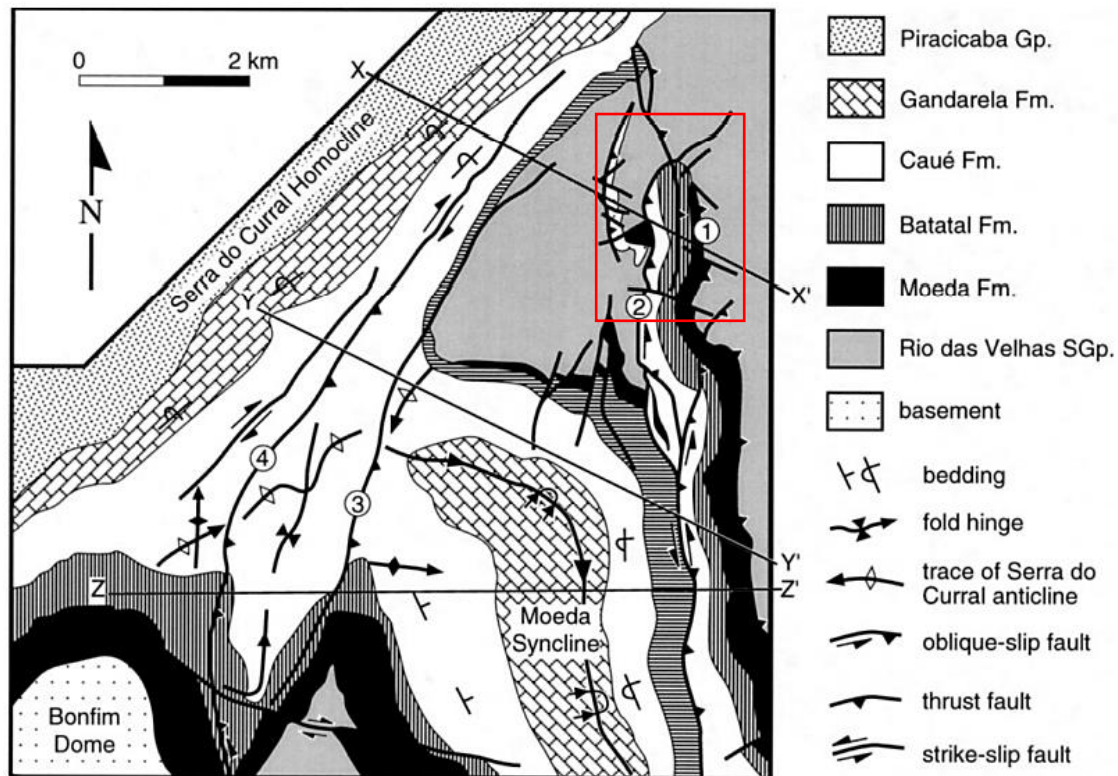


Figura 3-5 - Relações estruturais na intersecção entre o Homoclinal da Serra do Curral e o Sinclinal da Moeda. 1, falha de Gorduras; 2, falha de Mutuca; 3, falha da Catarina; 4, falha do Barreiro (Alkmim & Marshak 1998). Em destaque (retângulo vermelho) a área de estudo.

A serra do Curral desenvolve-se sobre uma megaestrutura: o Homoclinal Curral, orientado aproximadamente em ENE-WSW na borda norte do Quadrilátero Ferrífero. A sucessão estratigráfica em seu interior encontra-se invertida, sendo assim interpretada como o flanco invertido de uma anticlinal vergente para noroeste (Dorr 1969; Pires 1979 e Alkmim & Marshak 1998).

O Sinclinal Moeda apresenta orientação N-S com vergência, da estrutura sinformal, para oeste e, quando observado em planta, o flanco oriental possui curvatura voltada para oeste (Dorr 1969). A estrutura sinformal contém, em seu interior, todas as unidades do Supergrupo Minas, onde sua envoltória é definida pelo acamamento sedimentar (S_0). Já no flanco oeste, o acamamento aparece subparalelo à foliação metamórfica S_1 e, no flanco leste, apresenta a relação estrutural de um flanco inverso. Neste flanco, o ângulo de mergulho do acamamento sedimentar varia de 50° a 80° nos sentidos NE, E, e SE, e, no flanco oeste, mais homogêneo, de 50° a 60° para E. Em toda a sua extensão, o flanco leste está em contato com as rochas do Supergrupo Rio das Velhas, que, na borda oeste, se limitam à região norte (Braga 2006).

O substrato rochoso da área de estudo é constituído por unidades que compõem os Supergrupos Rio das Velhas e Minas. A Formação Palmital, que integra o Grupo Maquiné, e a Unidade Ressedimentada Clástica, que compõe o Grupo Nova Lima, limitam a dobra parasítica ao Sinclinal Moeda na porção oeste. A região também abarca duas formações do Grupo Caraça e uma do Grupo Itabira (Endo *et al.* 2019).

A Unidade Ressedimentada Clástica engloba metadiamicritos e metaconglomerados polimíticos, matriz suportados, além de quartzitos, filitos e metagrauvas, localmente dolomitizados. A Formação Palmital é composta por quartzo-sericita xistos a quartzitos sericíticos finos com estratificações cruzadas de pequeno a médio porte (Endo *et al.* 2019). Cavalcanti *et al.* (2020) também observaram nos arredores da Cava litotipos da Formação Mestre Caetano, que também compõe o Grupo Nova Lima, composta por intercalações rítmicas de rochas metavulcanoclásticas, como (plagioclásio)-sericita-clorita-quartzo-xisto, plagioclásio-clorita-quartzo-xisto (metagrauva), (carbonato)-sericita-quartzo-clorita-xisto (siltito).

As Formações Moeda e Batatal compõem o Grupo Caraça, sendo a primeira composta por quartzitos e metaconglomerados, quartzo-mica xisto com lentes de filito intercaladas, e a segunda é integrada por filitos sericíticos, filitos carbonosos, filitos quartzosos e filitos carbonáticos, com intercalações de quartzitos finos na base e mármore dolomíticos no topo, além de xistos. A Formação Cauê, que integra o Grupo Itabira, é constituída por itabiritos silicosos, dolomíticos e anfibolíticos, hematititos, mármore, mármore ferruginoso e filito ferruginoso, localmente magnetititos, metajaspilitos e quartzitos ferruginosos (Endo *et al.* 2019; 2020).

Zavaglia (1995) identificou, ao longo do flanco nordeste do Sinclinal Moeda, um corredor transpressivo-sinistral, denominado Corredor Tamanduá-Mutuca, de idade Brasileira, formado por zonas de cisalhamento dúcteis de direção geral NS, com movimentos reversos sinistrais, das quais se destacam as falhas da Mutuca e Gorduras (demonstradas na Figura 3-5), e por falhas transcorrentes

destrais de orientação ENE-WSW. O autor ainda descreve a ocorrência de falhas mesoscópicas de empurrão e falhas normais. Tal zona de cisalhamento é caracterizada pela repetição das camadas das formações Batatal e Cauê, em sequência invertida, ao longo de trecho de cerca de 8 km.

Por fim, na área de estudo são observadas três principais interpretações acerca da ocorrência das unidades em superfície. A primeira é apresentada no mapa geológico de Minas Gerais, elaborado pela CPRM (2003), no qual os autores interpretam a área como um homoclinal com estratigrafia invertida que, posteriormente, foi interpretado de forma diferente por Endo *et al.* (2019) e Cavalcanti *et al.* (2020). No segundo, a área apresenta uma disposição espacial coerente com a posição de um sinclinal a partir da repetição das camadas, no entanto os autores não deixam claro essa interpretação e o mapa apresentado não contém o eixo de dobra indicando essa geometria. Já o terceiro trabalho – Cavalcanti *et al.* (2020) – apresenta interpretação coerente com o proposto por Endo, com a presença do eixo do sinclinal, que explicita o que não estava claramente definido no trabalho anterior. Os mapas citados encontram-se nas Figura 3-6, Figura 3-7 e Figura 3-8 respectivamente.

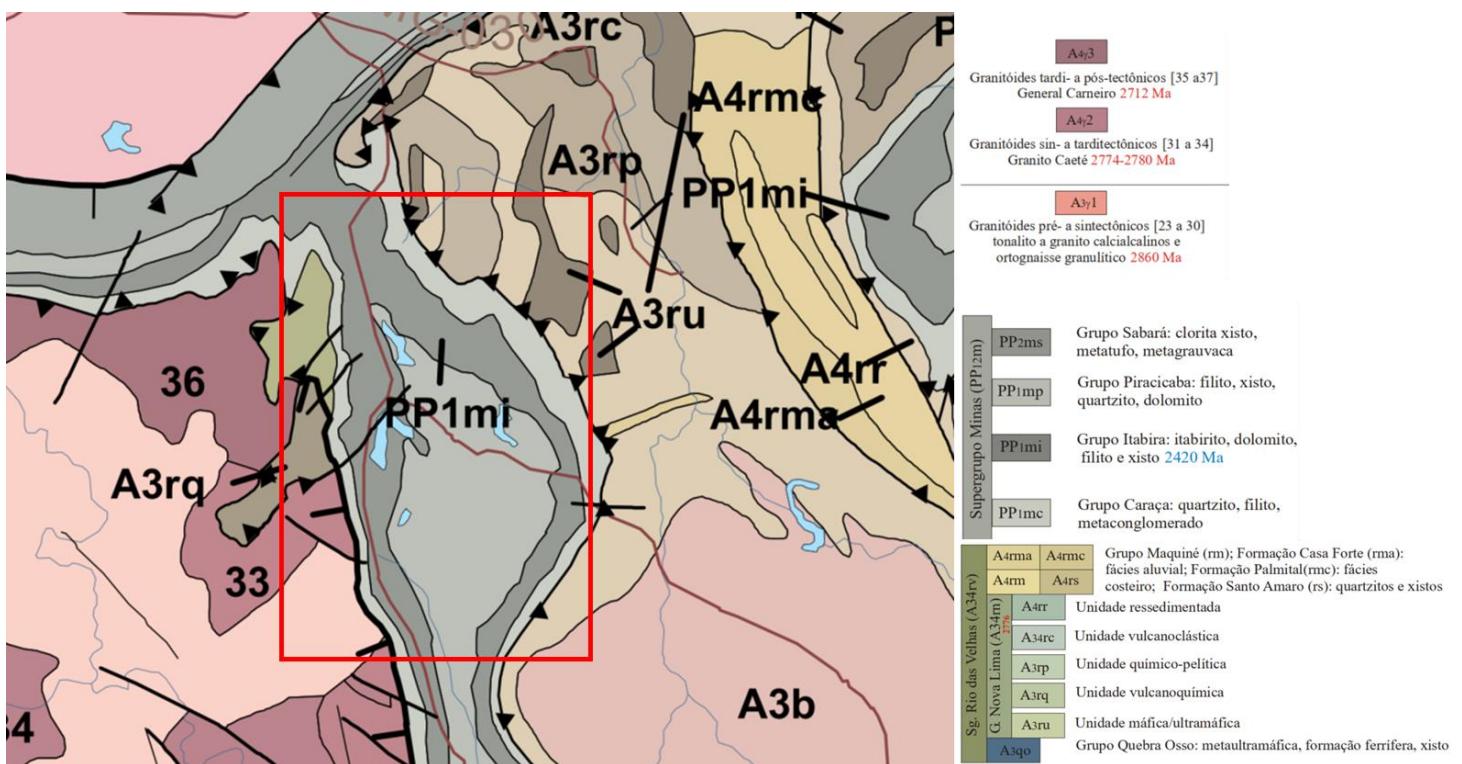


Figura 3-6 - Trecho do mapa geológico de Minas Gerais em escala 1:1.000.000 (CPRM, 2003). Destacada, em vermelho, a área de estudo.

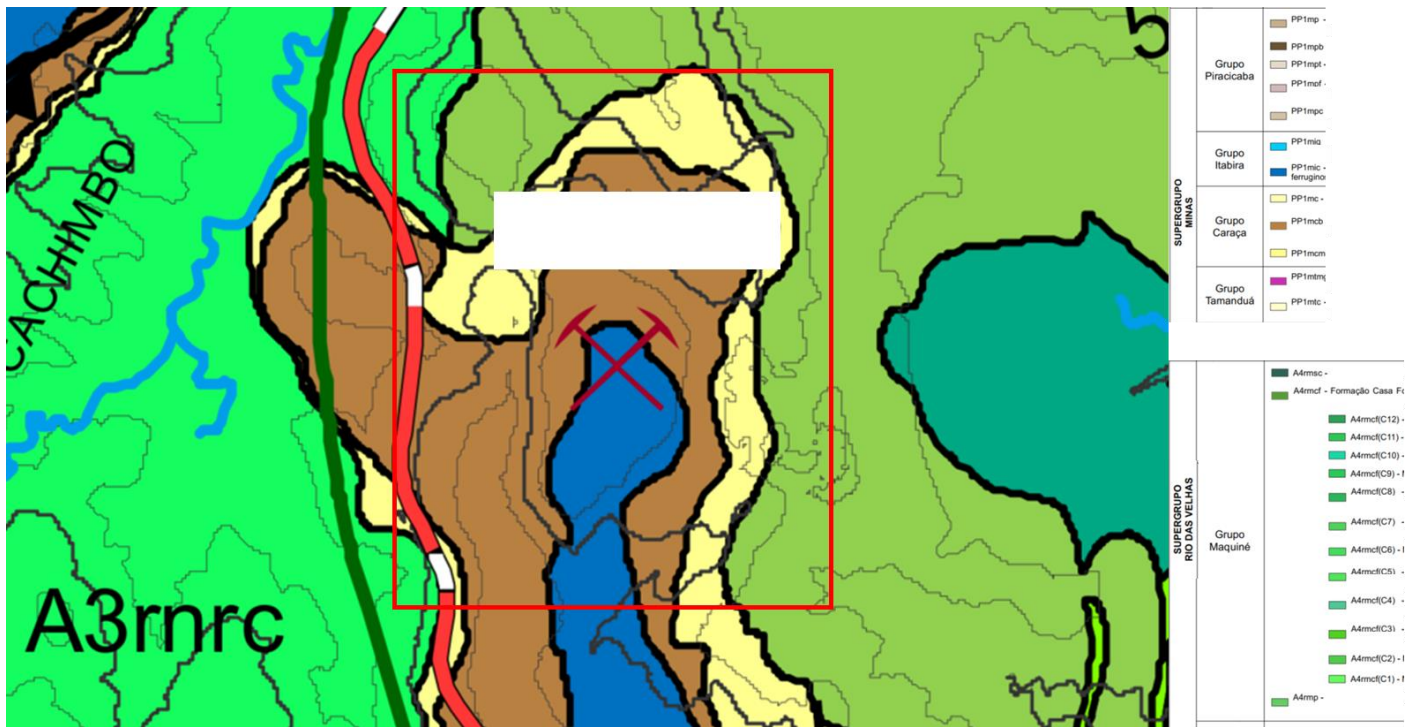


Figura 3-7 - Trecho do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero em escala 1:150.000 (Endo et al. 2019). Destacada, em vermelho, a área de estudo.

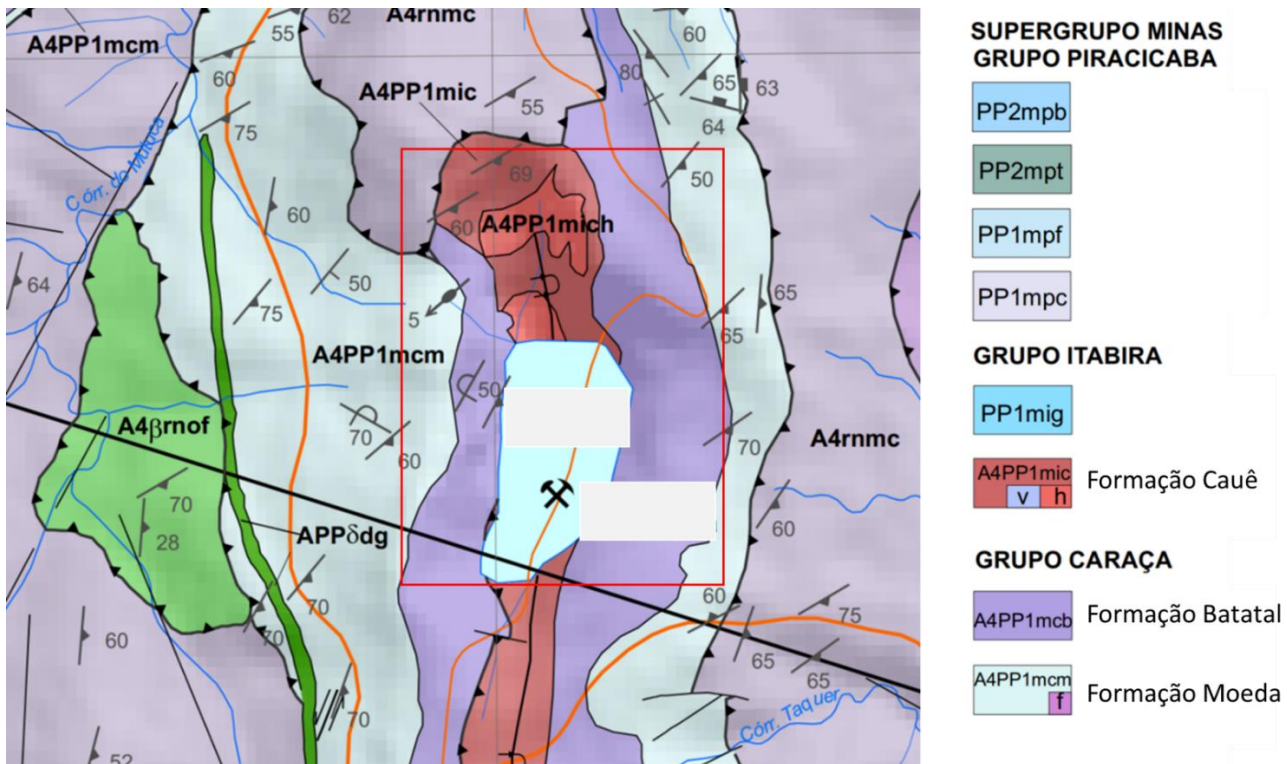


Figura 3-8 – Trecho do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero em escala 1:25.000 (Cavalcanti et al. 2020). Destacada, em vermelho, a área de estudo.

CAPÍTULO 4

MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO

4.1 CRITÉRIOS, PREMISSAS E LOGÍSTICA DAS ATIVIDADES DE CAMPO

Neste capítulo, são apresentadas a logística, assim como as premissas adotadas para o desenvolvimento deste trabalho no que concerne às atividades de campo e caracterização dos maciços durante a etapa de mapeamento e compilação dos dados geológico-geomecânicos levantados na área de estudo.

Para o planejamento das atividades de dados de campo, foi realizada uma visita preliminar de reconhecimento dos principais acessos da cava, bermas e vias laterais para uma avaliação dos quantitativos de pontos a serem levantados na escala de mapeamento proposto: 1:10.000. A imagem de satélite utilizada ao fundo dos mapas apresentados foi obtida em julho de 2021 a partir das imagens do “Google Satélite”, datada em 27/06/2021.

Destaca-se neste levantamento o reconhecimento e quantificação das áreas da cava para a elaboração dos seguintes mapas temáticos: Mapa de Áreas Inacessíveis e Coberturas Antrópicas (Figura 4-1), correspondendo a cerca de 40% da área; além da área da cava recoberta pelo lago, com cerca de 15% da área total. As áreas inacessíveis são aquelas cujo acesso encontra-se inviável por questões de segurança, visto a ocorrência de feições erosivas – tais como ravinamentos e voçorocas -, além de rupturas ou escorregamentos localizados. Por “coberturas antrópicas” entende-se qualquer material de origem antrópica tais como depósitos, edificações e pilhas de estéril (PDEs).

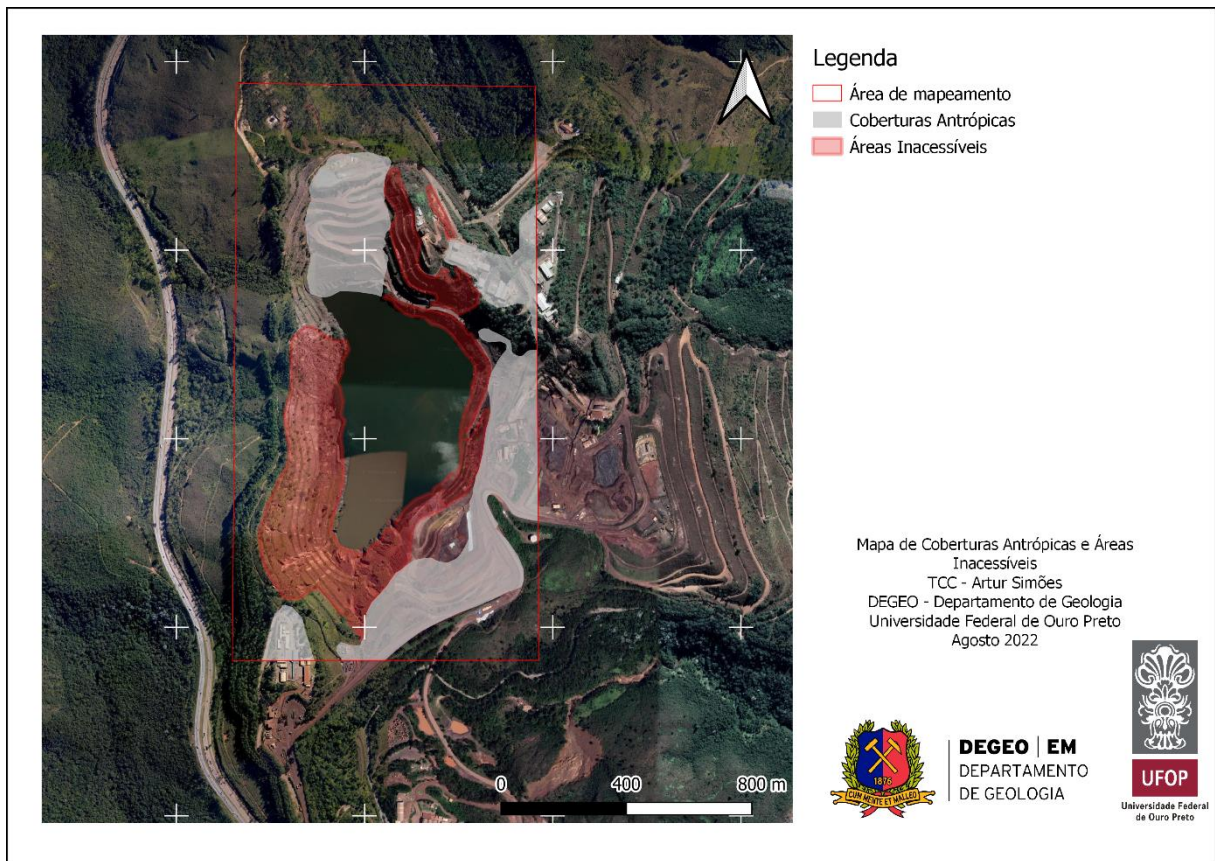


Figura 4-1 - Mapa de Áreas Inacessíveis e Coberturas Antrópicas.

Durante as atividades de campo, foram feitas reavaliações nos quantitativos de pontos de mapeamento, tendo em vista as restrições de acesso observadas. Os pontos executados podem ser observados na Figura 4-2: Mapa de pontos.

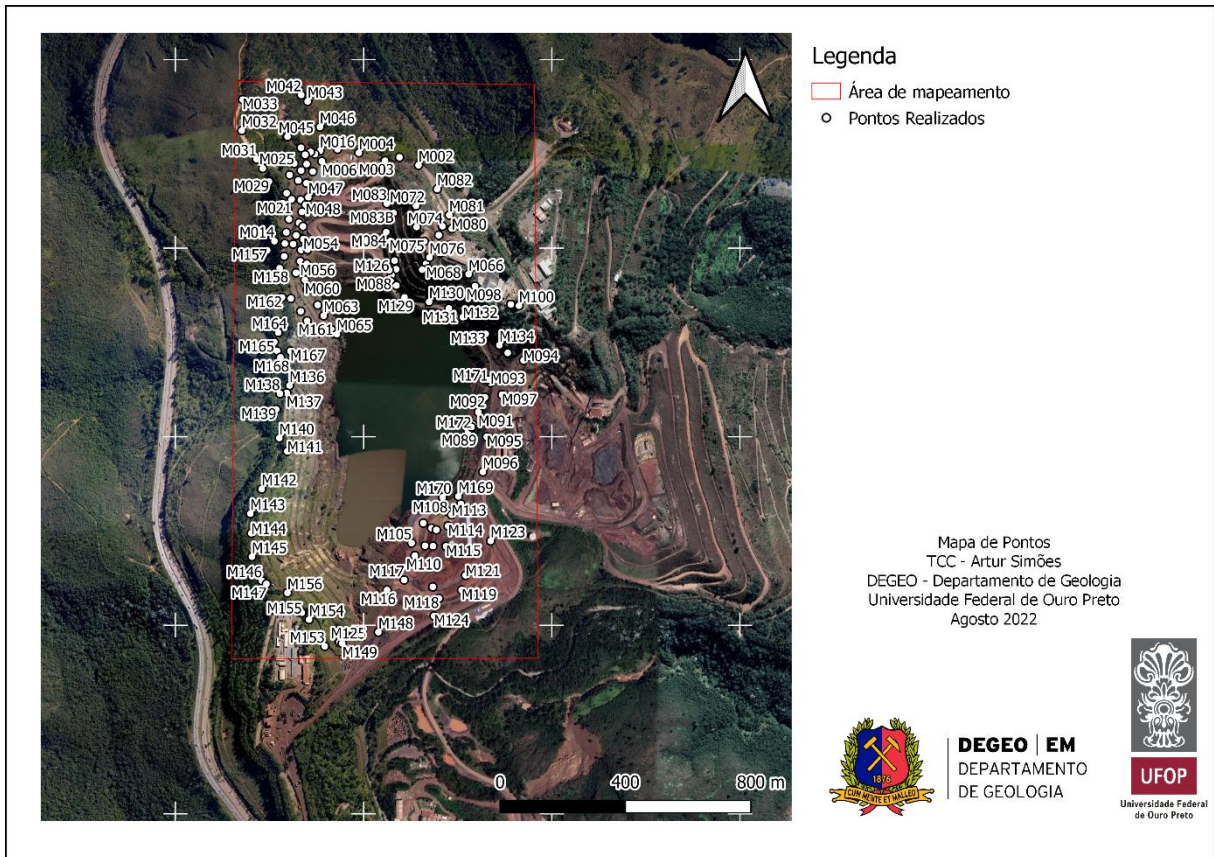


Figura 4-2 - Mapa de Pontos do levantamento geológico-geomecânico.

O mapeamento geológico-geomecânico foi realizado com o intuito de definir os materiais e estruturas que ocorrem em superfície, bem como suas características e propriedades geotécnicas, assim como a posição dos contatos entre eles.

De modo geral, a cava apresenta seus taludes em rochas encaixantes das Formações Ferríferas, representadas por xistos, filitos, quartzitos e quartzitos miloníticos, ocorrendo localmente coberturas superficiais em canga.

Os materiais localizados nas áreas inacessíveis tiveram suas posições e contatos inferidos pela continuidade das camadas, além da utilização auxiliar de um mapa geológico de curto prazo elaborado pela empresa responsável pela Cava e omitido neste relatório a pedido desta. Dessa forma, o mapeamento realizado teve como base o mapa de Curto Prazo, assim como o Geológico Regional apresentado no capítulo anterior. Em cada ponto realizado foram feitas verificações e validações, sendo posteriormente efetuados os possíveis ajustes nos contatos geológicos inferidos.

Para os locais inacessíveis e regiões de comprovadas modificações do antigo arranjo da cava, tais como recobrimento nas faces de taludes e execução de acessos com grandes movimentações de massas de diversas composições, foram mantidos os contatos geológicos do mapa de curto prazo. Ao fim do capítulo 4 serão apresentados o mapa geológico da área resultante deste mapeamento, assim

como outra versão com a distinção dos contatos observados e inferidos a partir do mapa de curto prazo.

4.2 LITOTIPOS MAPEADOS

A seguir é apresentada uma descrição e caracterização dos materiais/litotipos identificados na área de estudo:

4.2.1 Coberturas Antrópicas

As coberturas antrópicas na área da cava se distribuem ao longo de todo o seu entorno imediato, a exceção do talude Oeste.

Estes locais são caracterizados pela implantação de várias estruturas com finalidades diversas, tais como Plantas e Edificações Industriais, *Dump's*, PDEs e conformações de acessos no interior da cava. Os materiais constituintes destas estruturas são extremamente variados, desde depósitos hematíticos até estéreis, com as mais diversas composições e características, conforme apresentado na Figura 4-3.

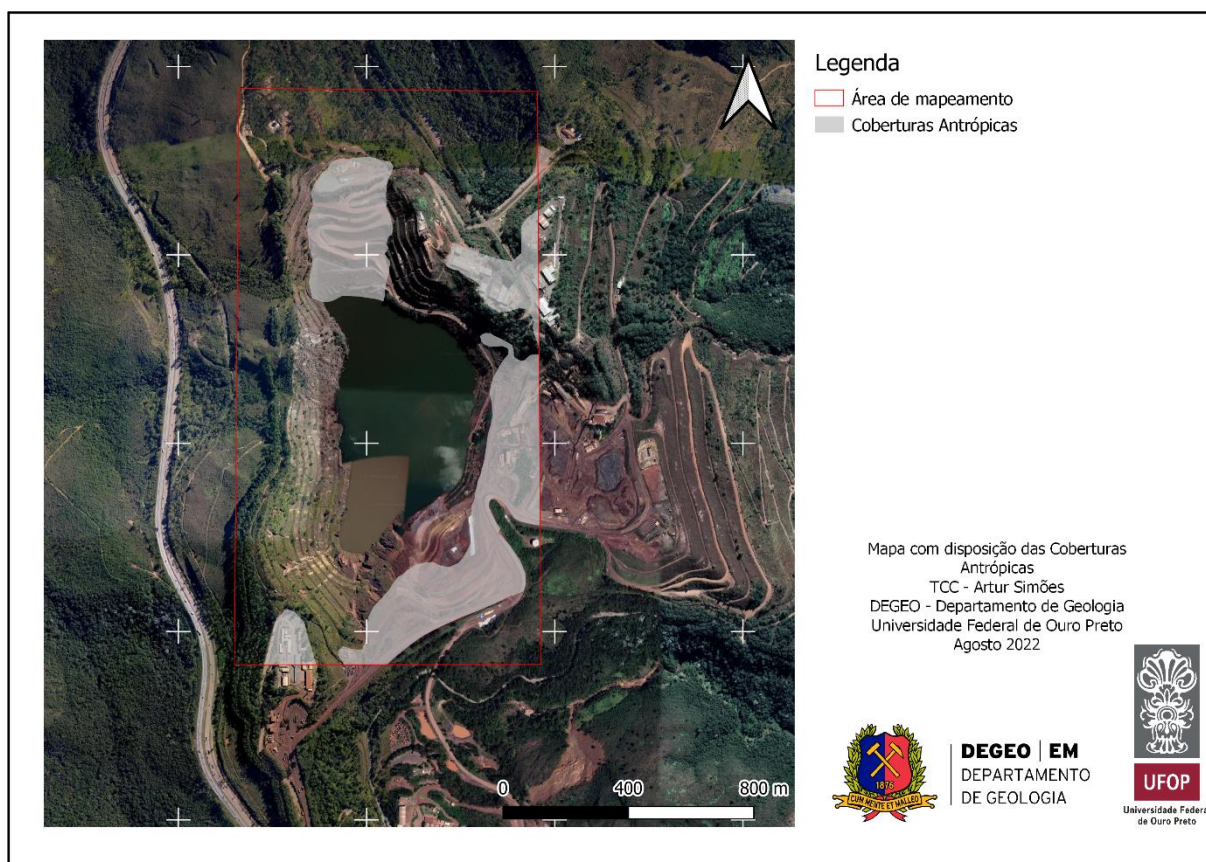


Figura 4-3 - Disposição das Coberturas antrópicas na área de estudo. Na região norte e suldeste são observadas as PDEs. Enquanto no trecho sudoeste, leste e nordeste plantas e edificações industriais.

Na Figura 4-4 observam-se depósitos de granulometrias variadas, angulosos, e compostos principalmente por fragmentos de quartzitos, itabiritos e hematita, em meio a uma massa de matriz arenosa grossa até a fração argila. Além disso, inúmeros blocos métricos de itabirito compacto ocorrem nestes depósitos.



Figura 4-4 - (a) Ponto M119 - PDE na região sul - Grande diversidade composicional nas características de seus materiais de estéreis. (b) Ponto M118 - PDE SUL - Localmente podem ser observados níveis/camadas métricas de materiais de composição variada desde itabiritos argilosos a rochas quartzíticas em contato com grandes blocos podendo condicionar planos de anisotropias de resistência (análogos a descontinuidades) na estrutura.

Na Figura 4-5 exemplificam-se duas outras situações de coberturas antrópicas típicas observadas na cava, constituídas por aterros para conformação de vias de acesso e estoques de minério executados no interior da cava.

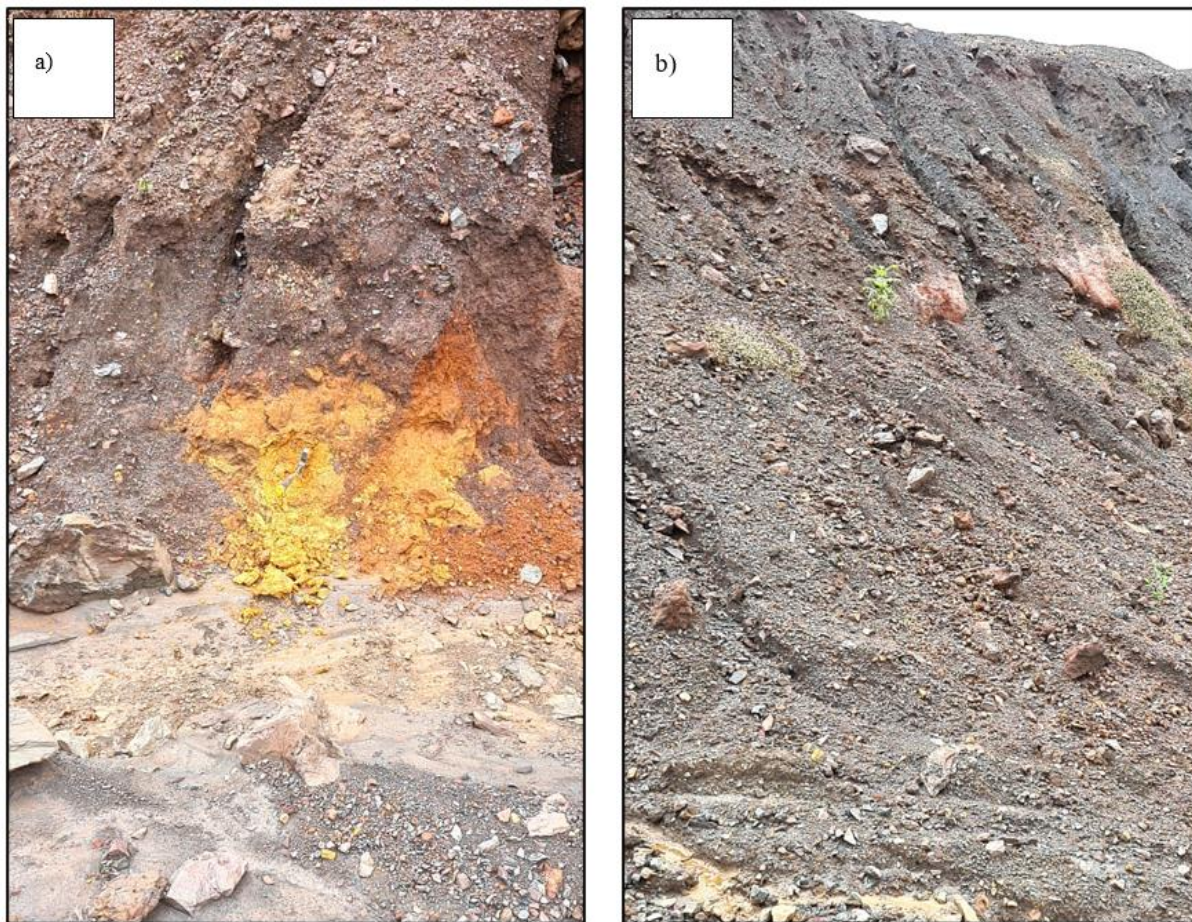


Figura 4-5 - (a) Ponto M097 - Acesso interno na cava para o sistema de captação no lago. Depósito de composição variada limitando a observação de afloramentos. (b) PDE na região norte – depósito de material hematítico de granulometria média a fina, podendo apresentar até 4 metros de espessura aparente.

4.2.2 Canga

Na área mapeada, a canga se encontra em coberturas localizadas em duas porções de baixa representatividade, situadas na região ao sul do talude oeste, e na porção nordeste, próxima às edificações (Figura 4-6).

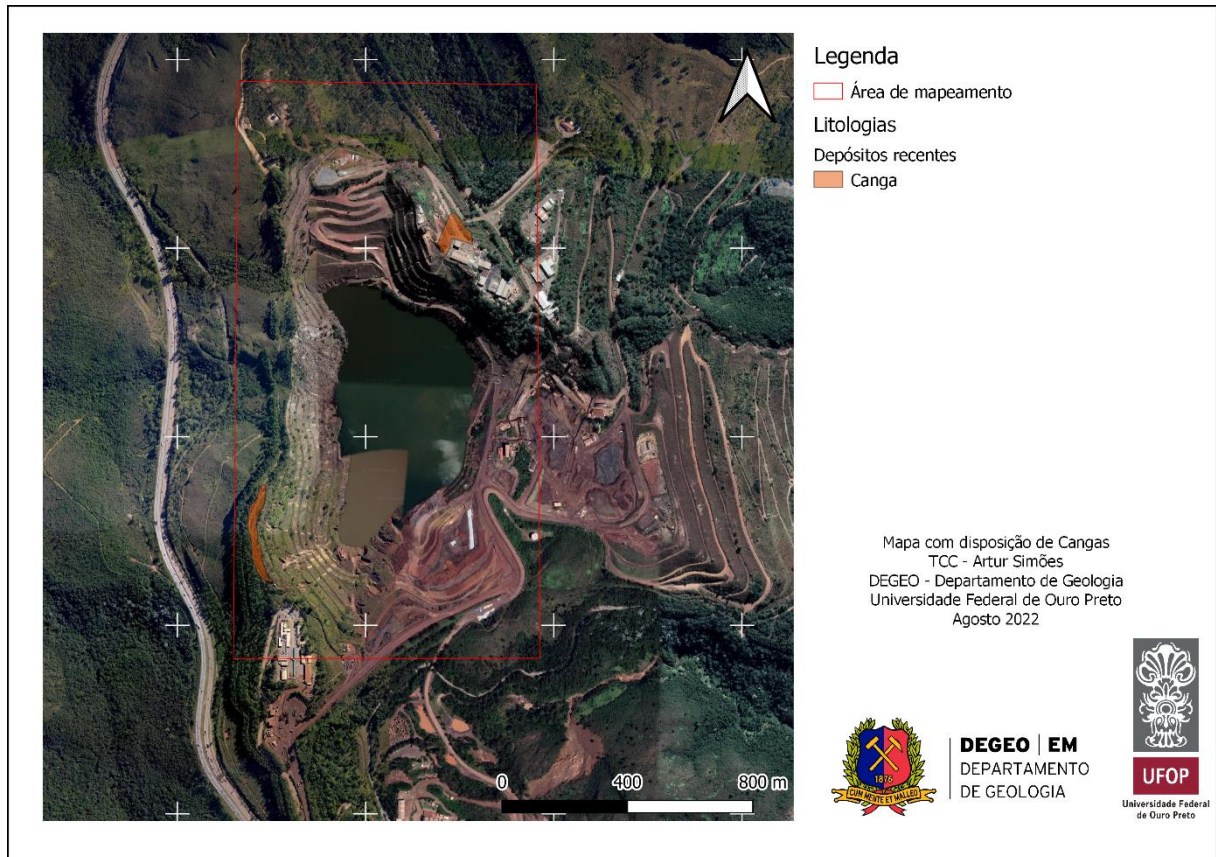


Figura 4-6 - Disposição da canga na área de estudo.

Ocorrem em depósitos do tipo coluvionares, representados por uma camada delgada na região, com espessura média de 3,0 metros, que varia entre 1,5 e 5,0 metros com a presença de clastos centimétricos (3 a 7 cm) angulosos. Em áreas próximas ao talude Nordeste, é possível observar cortes com espessuras maiores desse material. Tais depósitos encontram-se sobrepostos a níveis de rochas filíticas brandas decompostas. As Figura 4-7 e Figura 4-8 ilustram as características deste material:



Figura 4-7 - Ponto M143 - Canga com fragmentos de hematita e itabiritos em matriz laterítica.



Figura 4-8 - Ponto M067 - Afloramento em canga recobrimdo filito dolomítico de baixa resistência no talude Leste, com espessura de até 5 metros.

Na maioria dos afloramentos na região no talude Leste, o contato da canga com o filito dolomítico é erosivo e a sua matriz laterítica apresenta graus de resistência maior do que a dos filitos. O material observado pode ser caracterizado como de alta resistência, com presença de fragmentos de rocha em tamanho de pedregulhos a cascalhos, cuja composição era predominantemente de hidróxidos de ferro e fragmentos de itabirito e hematita compacta, conforme demonstrado na Figura 4-7.

Na porção a Sul, apresenta-se um corpo alongado com cerca de 300 m de extensão, 30 m de largura e cerca de 5 m de espessura média. Já na porção Norte, a canga foi mapeada próxima das

edificações, perfazendo uma área de cerca de 500 m², podendo apresentar espessuras superiores a 5 metros.

4.2.3 Metachert

Durante a etapa de mapeamento, foi possível o reconhecimento desta litologia em superfície em apenas um afloramento. Logo, a sua delimitação no mapa geológico deste trabalho, a exceção do ponto M128, foi baseada no mapa de curto prazo fornecido pela empresa responsável pela cava – conforme Figura 4-9.

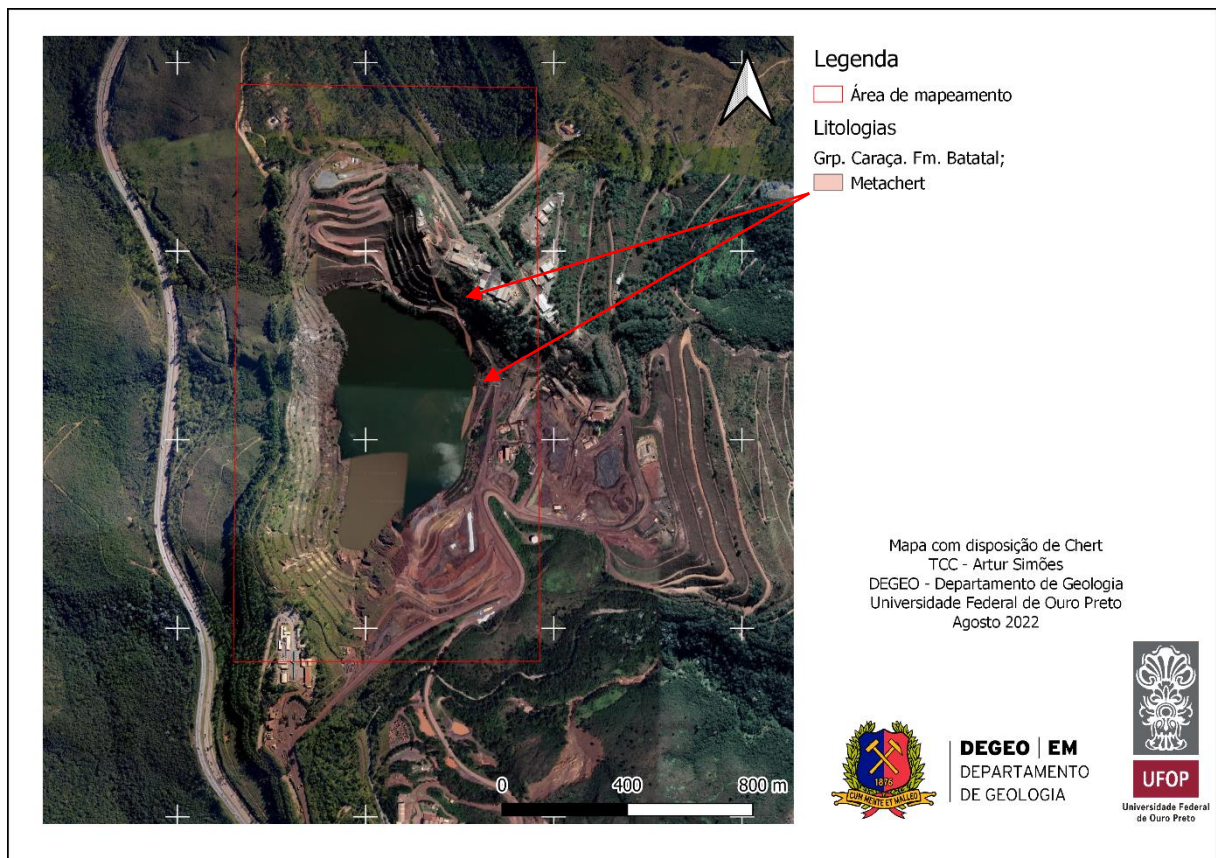


Figura 4-9 - Disposição do metachert na área de estudo.

O metachert foi identificado no ponto M128 (Figura 4-10), representado por um único afloramento com cerca de 10 metros de extensão, observado em uma ravina resultante dos processos de erosão superficial na base do talude Leste.

É caracterizado por alta resistência, com matriz em areia fina, predominantemente quartzosa, recristalizada, de coloração cinza esbranquiçada a levemente amarelada, intensamente fraturado, com materiais oxidados nas discontinuidades – possivelmente pela percolação de fluidos ricos em óxidos ou hidróxidos de ferro.



Figura 4-10 - Ponto M128 - Afloramento de maciço em metachert de dimensões métricas (aproximadamente 10 metros de extensão), em ponto de ravinamento na base do talude Leste.

4.2.4 Básica Intrusiva

Durante a etapa de mapeamento, não foi possível a visitação e reconhecimento geológico em afloramento desta litologia em superfície, logo sua posição foi também inferida a partir do apresentado no mapa de curto prazo.

Na área de estudo, a rocha básica intrusiva ocorre na porção sul, sendo fotointerpretada como majoritariamente como rocha muito branda (R1-) de acordo com as feições erosivas e seu posicionamento na cava.

A rocha intrusiva possui sua representatividade na área de estudo restrita a um corpo alongado com 350 m de extensão, localizado no extremo sudoeste conforme Figura 4-11.

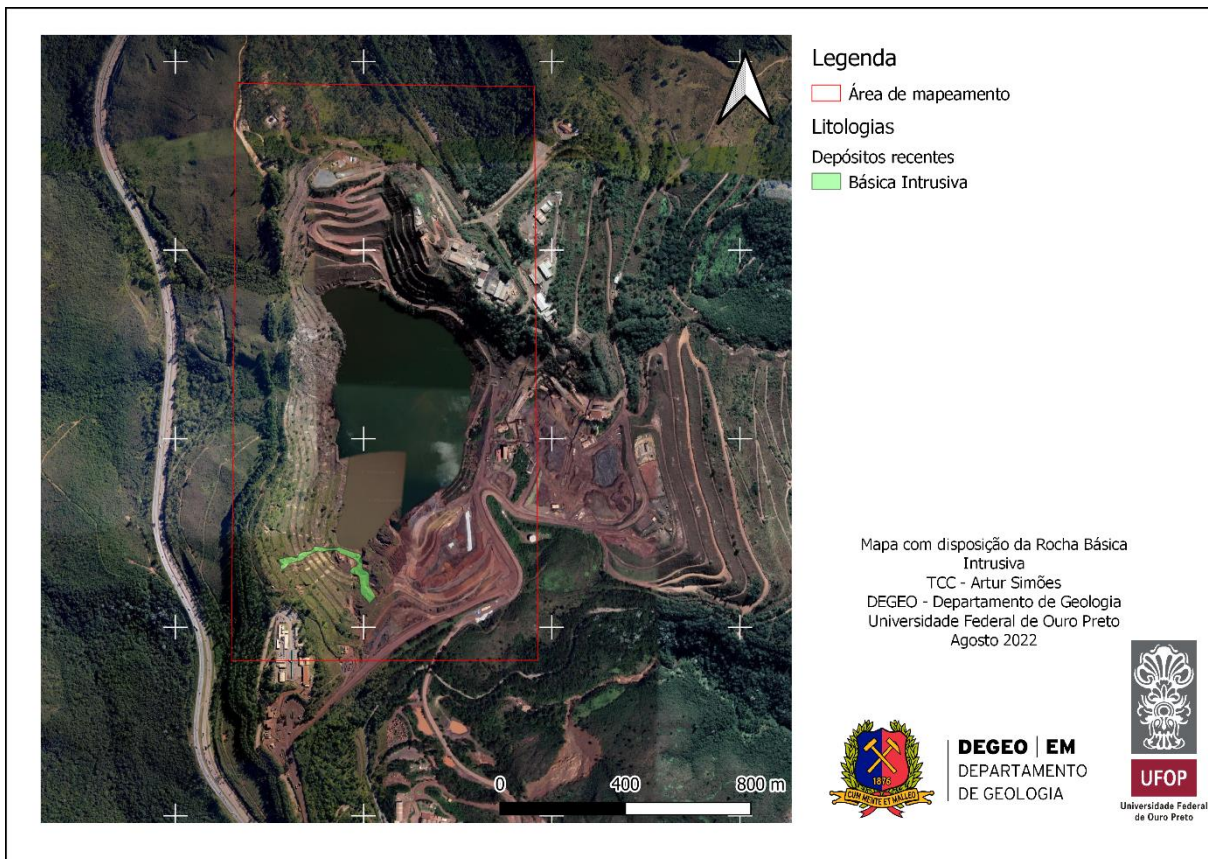


Figura 4-11 - Disposição da básica intrusiva na área de estudo.

Caracteriza-se pela coloração rósea e amarela escura devido ao elevado grau de alteração em relação à encaixante. A descrição e identificação da básica intrusiva foi efetuada a partir dos dados disponibilizados na forma de descrição de três testemunho de sondagens, conforme foto apresentada na Figura 4-12.



Figura 4-12 - Intervalos das caixas de sondagem do furo 0013. Testemunhos observado a partir de fotos fornecidas. Parâmetros obtidos e descrição realizada pela empresa detentora da área de estudo. Trechos descritos como “Básica Intrusiva”. O parâmetro resistência está classificado como “semicompacto” apesar da ocorrência de materiais mais alterados em intervalos localizados.

4.2.5 Hematitito

O hematitito foi observado somente em pequena porção na parte inferior da cava no flanco oeste. Ressalta-se que, neste mapeamento, esta litologia foi observada em apenas dois pontos (M062 e M063) próximos ao lago, sendo parcialmente obstruída por material movimentado ao longo da berma. Por isto, a sua delimitação foi também baseada no mapa de curto prazo, conforme apresentado nas Figura 4-13.

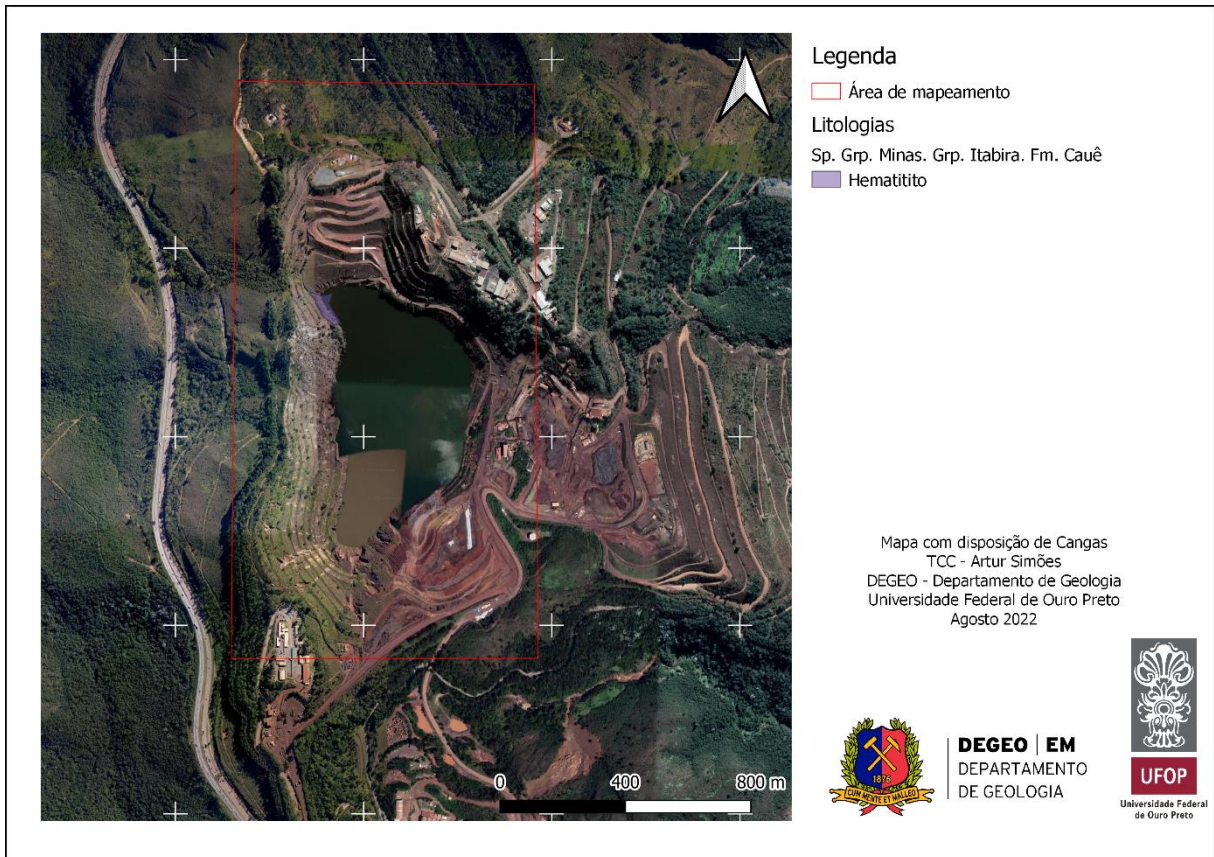


Figura 4-13 - Disposição do hematitito na área de estudo.

O hematitito foi caracterizado como semicompacto (resistência na faixa de R3 a R4) apresenta coloração cinza escura típica e pouco silicoso, ocorrendo por vezes associado a concentrações de óxidos e hidróxidos em um maciço aproximadamente homogêneo e fragmentando-se como “placas” nas interseções dos planos de bandamento.

Não foi possível a determinação de aspectos estruturais nos pontos aflorantes, como ilustrado na Figura 4-14.

Estes pontos encontravam-se parcialmente encobertos pela vegetação rasteira, com taludes recobertos e conformados em acessos, com indícios de fragmentação decorrente de processos de detonação.



Figura 4-14 - (a) Ponto M062 – hematitito recoberto pela vegetação ao longo da face de um talude parcialmente reconformado. (b) Ponto M063 – hematitito de granulação média a grossa, inconsolidado e fragmentado.

4.2.6 Itabirito Argiloso

Assim como a rocha básica intrusiva, não foi possível o acesso e reconhecimento geológico em afloramento do itabirito argiloso durante a etapa de mapeamento, logo sua posição foi também inferida a partir do apresentado no mapa de curto prazo. Por esse motivo, também não foi possível realizar sua descrição em termos de mineralogia e textura.

O itabirito argiloso se apresenta na área de estudo restrito a um corpo com cerca de 250 m de extensão e 150 m de largura, situado no extremo sul da cava.

Não foi possível a sua identificação na base de dados disponibilizada pela empresa, uma vez que não havia registro fotográfico das sondagens que pudesse auxiliar na sua descrição. Deste modo, o limite foi baseado no mapeamento de curto prazo, conforme apresentado na Figura 4-15.

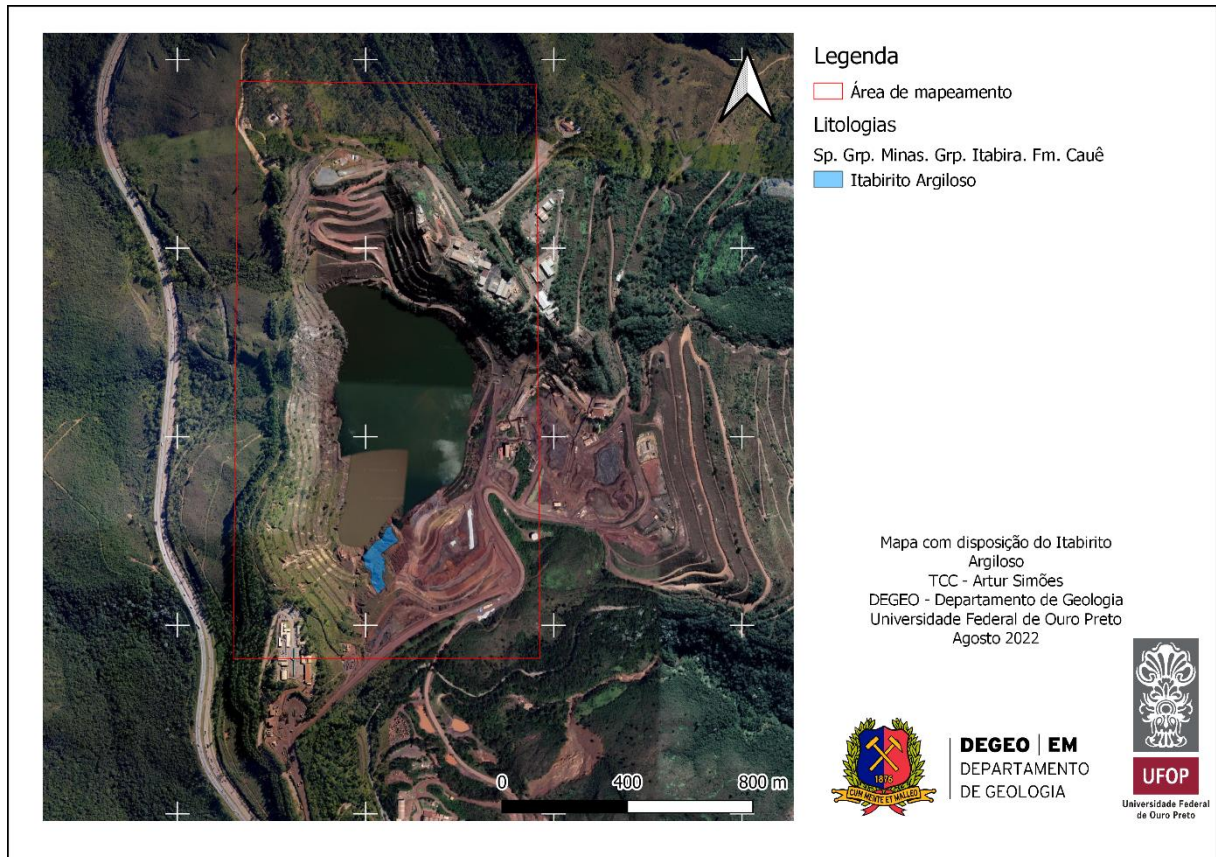


Figura 4-15 - Disposição do itabirito argiloso na área de estudo.

4.2.7 Filito Dolomítico

O filito dolomítico é o litotipo predominante na cava, assim como em entorno imediato, sendo observado em duas regiões:

Na porção do talude Leste, se estende ao longo de uma extensa faixa de orientação Norte-Sul, com espessura variando de 40 m a 140 m e encontra-se em contato inferior com a formação ferrífera (itabiritos dolomíticos). Quando possível a sua observação, em função da presença do lago, o seu contato de topo ocorre com o filito sericítico. Na porção Sul, ocorre em duas grandes áreas, sobretudo no interior da cava; entretanto, fora da cava, a oeste, seu limite está baseado no mapa de curto prazo devido a dificuldades de acesso em terreno íngreme e mata fechada. A Figura 4-16 apresenta a disposição do filito dolomítico na área de estudo.

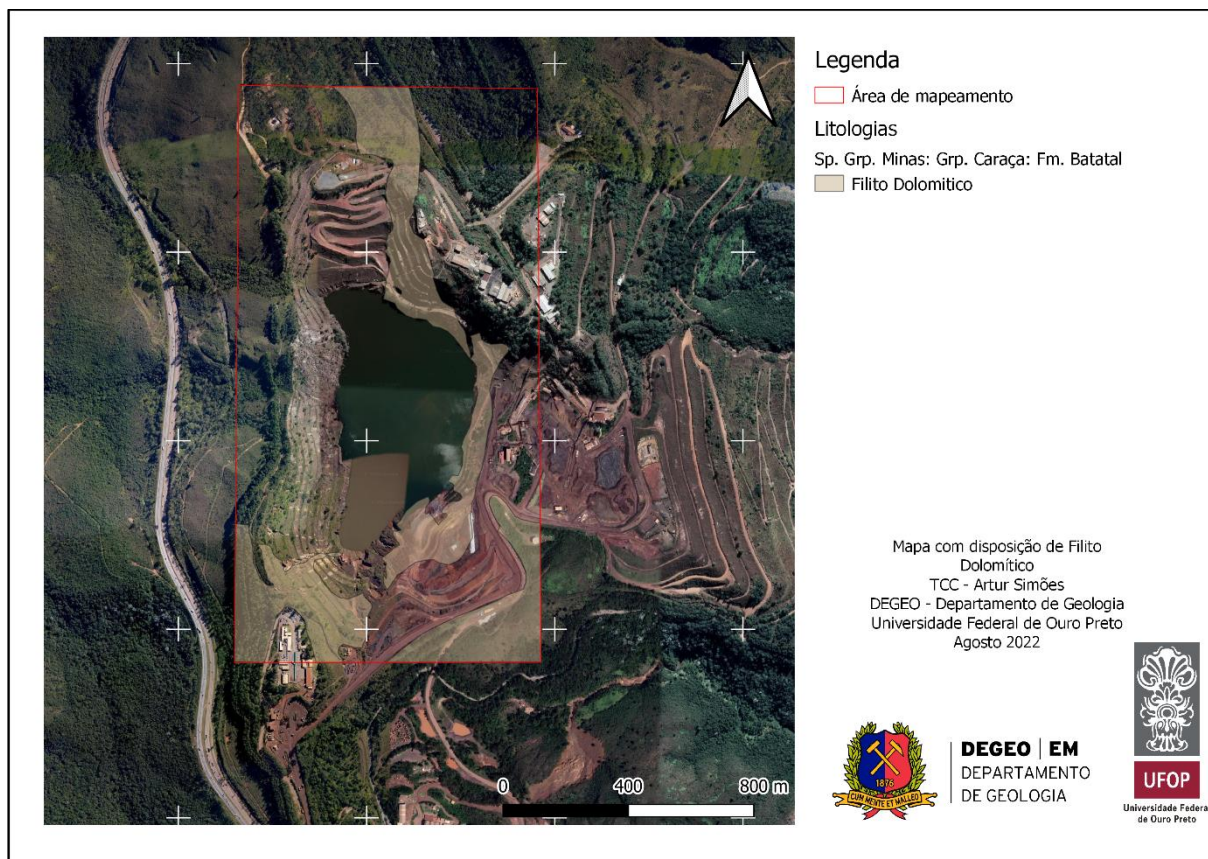


Figura 4-16 - Disposição do filito dolomítico na área de estudo.

Trata-se de um litotipo de foliação proeminente, rico em argilominerais e de coloração amarelada. Quando enriquecido por ferro, sua cor torna-se acinzentada a tons escuros. Foi testada sua reação com ácido clorídrico (HCL), tendo apresentado leve reação (borbulhamento) com o pó do material – o que corroborou com a sua caracterização como filito dolomítico. Ocorre com intercalações de material argiloso de coloração ocre amarelado a escuro, bem estruturado. Ocorrem também porções enriquecidas por ferro, próximas aos Itabiritos ou eventualmente pequenas lentes decimétricas em dolomito, que conferem uma tonalidade de aspecto de “borra de café” – Figura 4-17 (b). No entanto, apresenta-se predominantemente com coloração amarelada, conforme descrito anteriormente e exemplificado na Figura 4-17 (a).



Figura 4-17: (a) Ponto M083 filito dolomítico com intercalações milimétricas em argilominerais; (b) Ponto M127 filito dolomítico de aspecto “borra de café”.

4.2.8 Filito Sericítico

O filito sericítico ocorre somente no talude Leste, em sua porção mais a Norte, dispondo-se em duas camadas alongadas de direção aproximadamente Norte-Sul. Se apresenta com espessura decamétrica, com foliação proeminente, evidenciando alteração mineral sericítica, de coloração avermelhada. Parte de seu limite foi inferido com base no mapeamento de curto prazo devido a sua ocorrência em áreas inacessíveis da cava. Sua distribuição na área de estudo está apresentada na Figura 4-18.

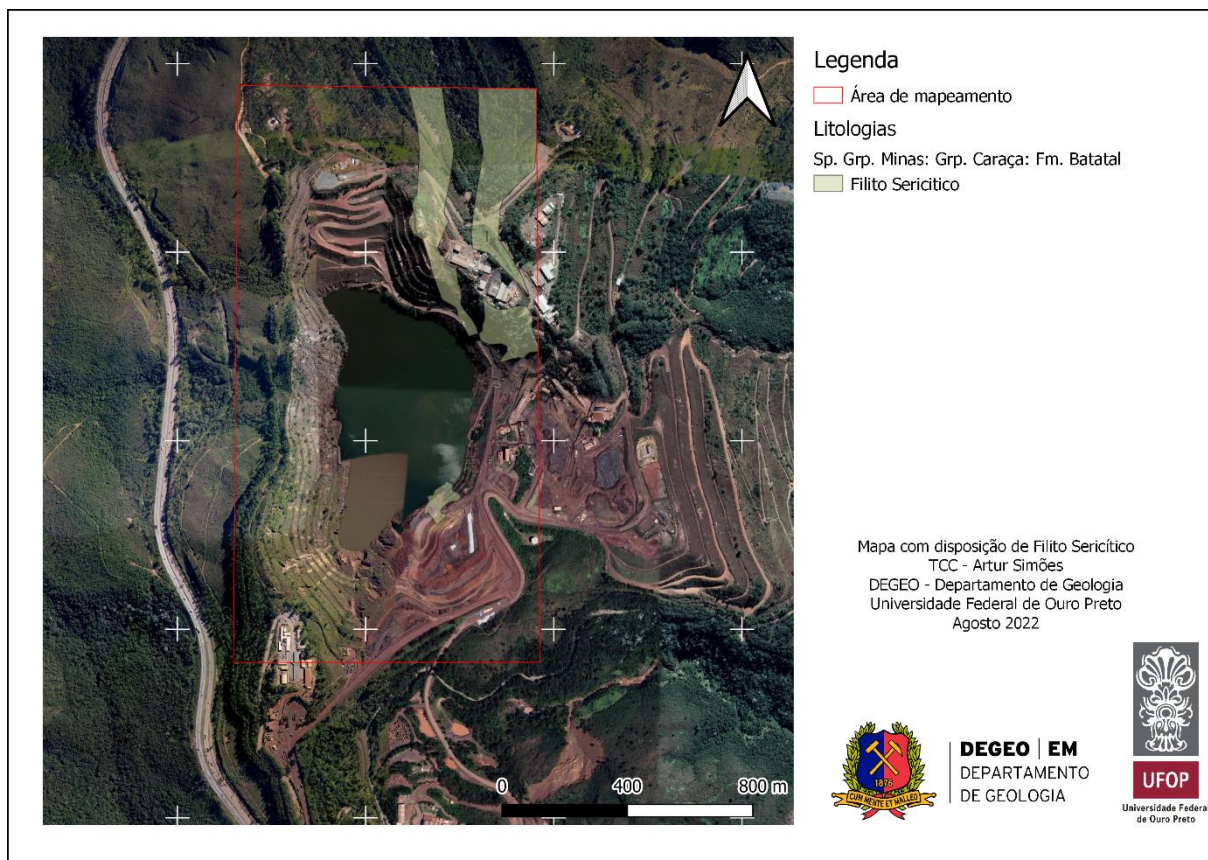


Figura 4-18 - Disposição do filito sericítico na área de estudo.

O filito sericítico ocorre intercalado com material argiloso de coloração amarelada a avermelhada, tal como ilustrado na Figura 4-19.

Em campo, foi verificada a ocorrência de vários pontos de instabilidade ao longo de bermas e faces do talude na porção leste, em escala métrica a decamétrica. Grande parte destes processos está associada ao arranjo geométrico da cava, com destaque para a ausência do sistema de drenagem superficial, e às condicionantes estruturais do litotipo – conforme exemplificado na Figura 4-19 (b).

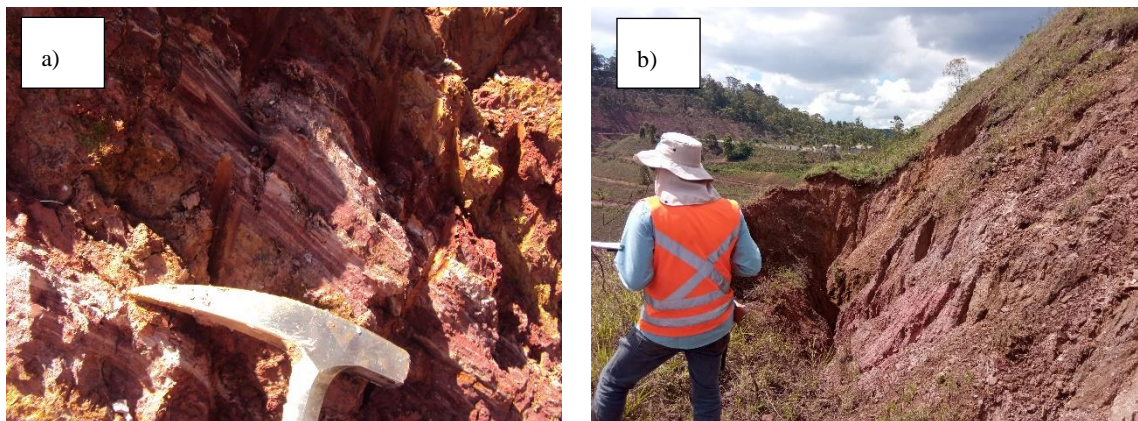


Figura 4-19 - (a) Ponto M002 - Filito sericítico com intercalação milimétrica de minerais argilosos marcada pela forte presença de sericita; (b) Ponto M070 Filito sericítico no talude Leste, de resistência muito branda, com a ocorrência de processo erosivos superficiais.

4.2.9 Filito cinza/prateado

O filito está representado em duas porções da área de estudo:

Na porção Leste, se estende ao longo de uma faixa de orientação Norte-Sul, com cerca de 80 m de espessura. Para esta porção da cava, este litotipo encontra-se em contato tanto na base quanto de topo com o filito sericítico. Já na porção Sul ocorre em uma grande área, sobretudo no interior da cava, sendo ainda interceptado pela básica intrusiva, conforme limite baseado no mapeamento de curto prazo, tanto dentro como fora da cava. No Flanco Oeste, se estende ao longo de todo setor, enquanto no Leste está limitado a uma faixa decamétrica parcialmente recoberta por coberturas antrópicas e edificações, dispendo-se, neste flanco, como um faixa alongada na direção NNW-SSE (Figura 4-20).

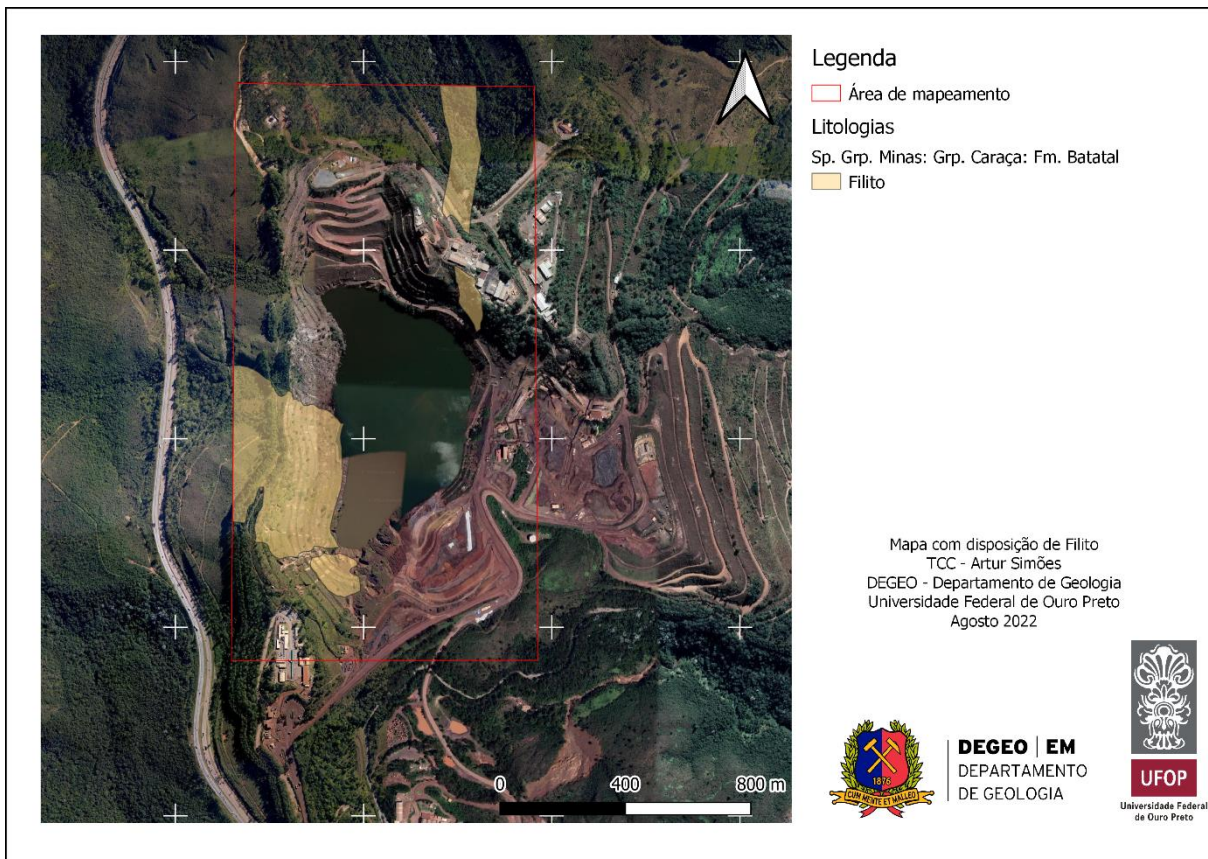


Figura 4-20 - Disposição do Filito na área de estudo.

O filito ocorre em faixas intercaladas com material argiloso de coloração cinza a prateado – típico do filito batatal -, bem estruturado com a foliação bem definida. Trata-se de uma rocha de granulação muito fina, rica em micas e argilominerais, o que a confere sedosidade ao tato (Figura 4-21).



Figura 4-21 - Ponto M139 Filito cinza prateado, alterado e com intercalações milimétricas de níveis argilosos de baixa resistência (R1).

4.2.10 Quartzito Milonítico

O quartzito milonítico ocorre no talude Oeste da cava, em sua porção noroeste, em contato com o Xisto, apresentando granulometria média a fina, de coloração amarelada a clara – conforme Figura 4-22.

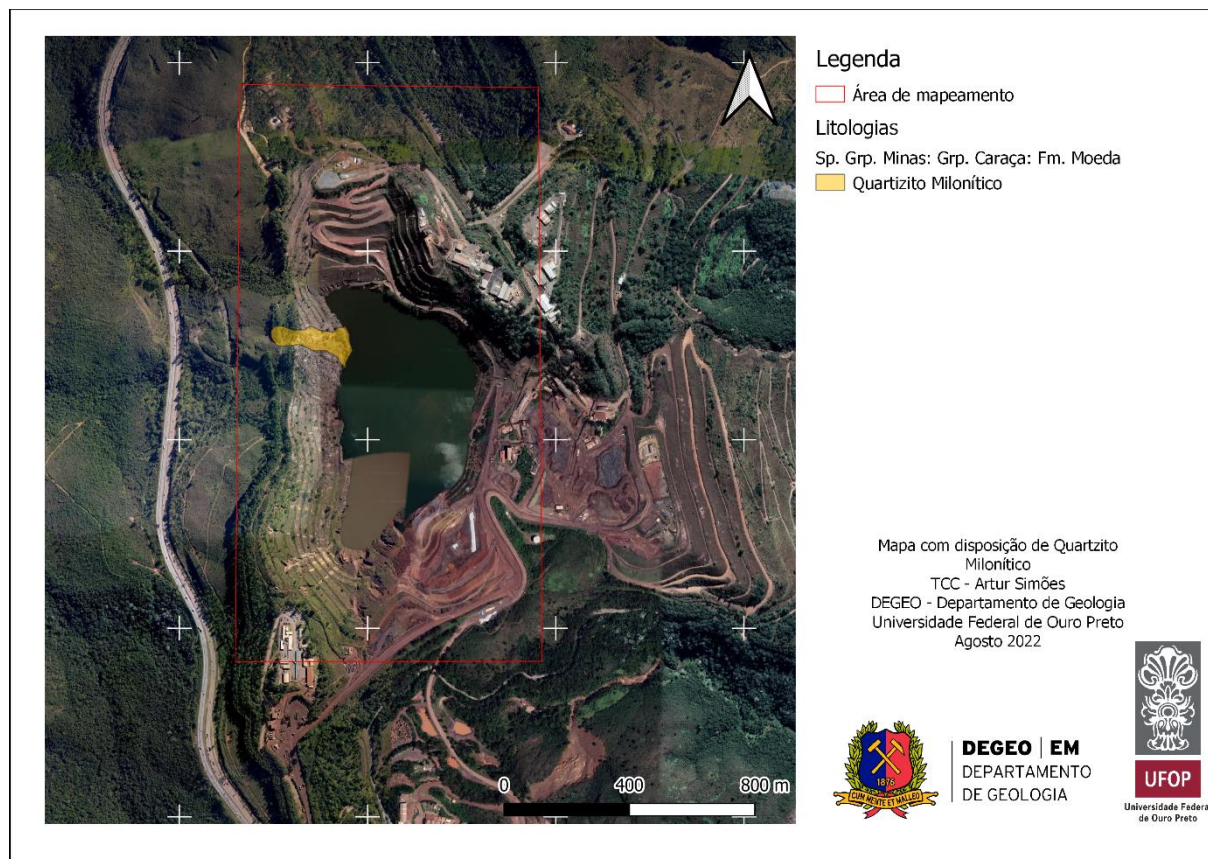


Figura 4-22 - Disposição do quartzito milonítico na área de estudo.

Em função da sua estruturação/milonitização, torna-se esbranquiçado devido à cominuição dos grãos de quartzo. Podem ser observadas faixas com minerais micáceos, o que por vezes confere um aspecto xistoso, conforme ilustrado na Figura 4-23.

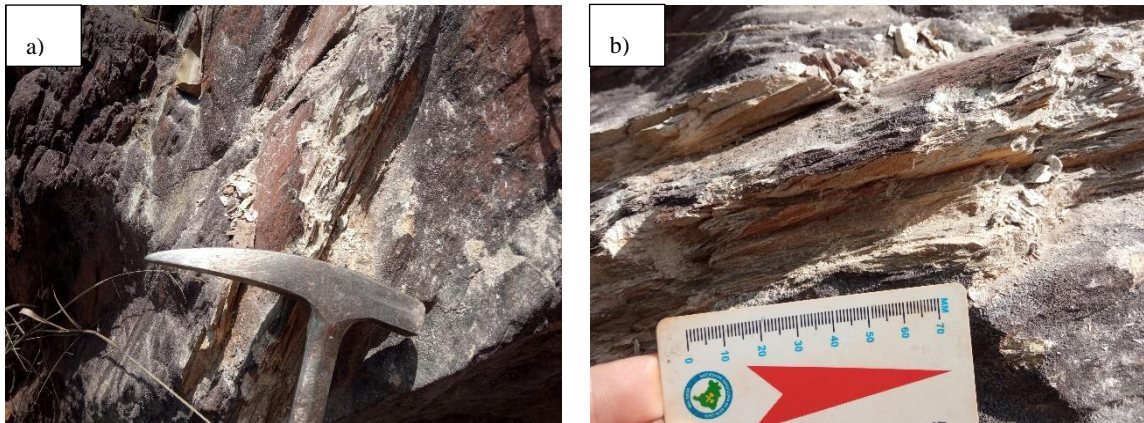


Figura 4-23 - (a): Ponto M064 Quartzito milonítico. (b): Ponto M064 Quartzito milonítico em detalhe da foliação milonítica com a cominuição dos grãos de quartzo e presença de micas.

4.2.11 Quartzito

O quartzito foi verificado no talude Oeste da cava, em sua porção noroeste, em contato com os quartzitos miloníticos (Figura 4-24).

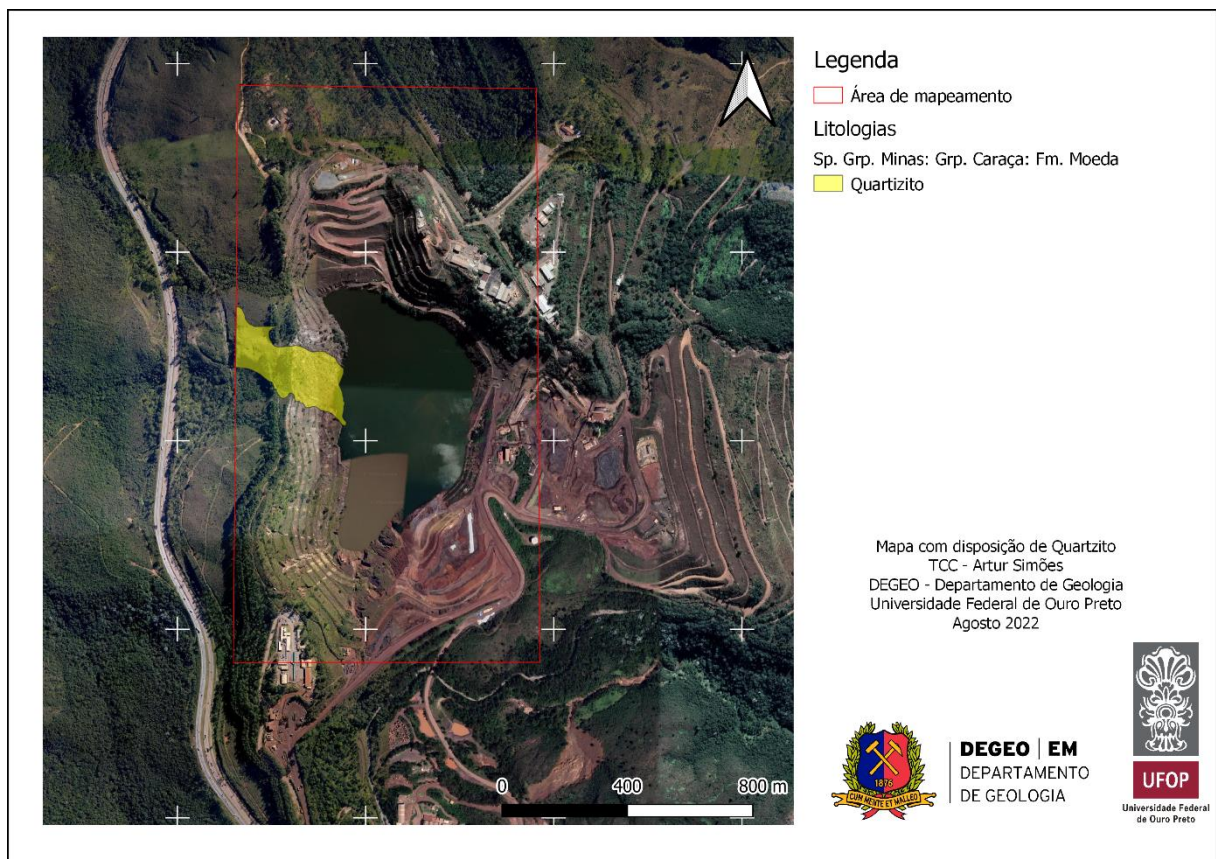


Figura 4-24 - Disposição do quartzito na área de estudo.

O quartzito apresenta granulação média a grossa, coloração amarelada e alto grau de recristalização da matriz. A ocorrência mapeada limitou-se a quatro pontos no interior da cava (M136, M138, M167 e M168), situados na crista da cava na porção Oeste, junto à face do talude global, dispondo-se majoritariamente no interior da área inacessível da cava.

No entorno imediato da cava, foi possível mapear a continuidade desta litologia, onde encontra-se em contato tectônico por falha tanto de base com o xisto quanto de topo com filito, perfazendo uma faixa com aproximadamente 150 m de espessura (Figura 4-25).

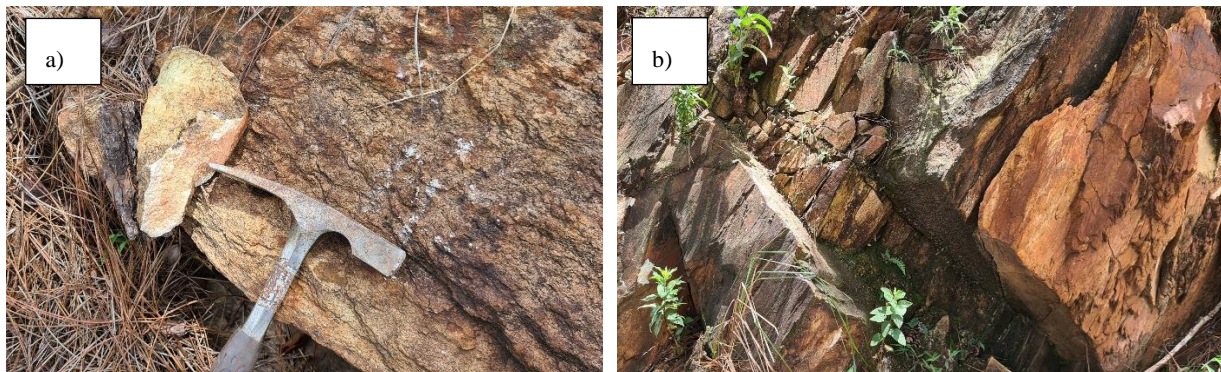


Figura 4-25 - (a): Ponto M138 - Quartzito no entorno da cava mostrando aspecto foliado com granulação média. (b): Ponto M136 - Quartzito no interior da cava de resistência mediana e intensamente fraturado.

4.2.12 Xisto

Esta unidade abrange uma área situada na porção Noroeste (Figura 4-26) da cava e no seu entorno imediato. O xisto é marcado pela ocorrência de intercalações rítmicas de rochas metavulcanoclásticas do tipo sericita-clorita-quartzo-xisto. Essas intercalações podem variar desde milimétrica até níveis centimétricos, não sendo possível observar, nos afloramentos, um padrão de alternância composicional.

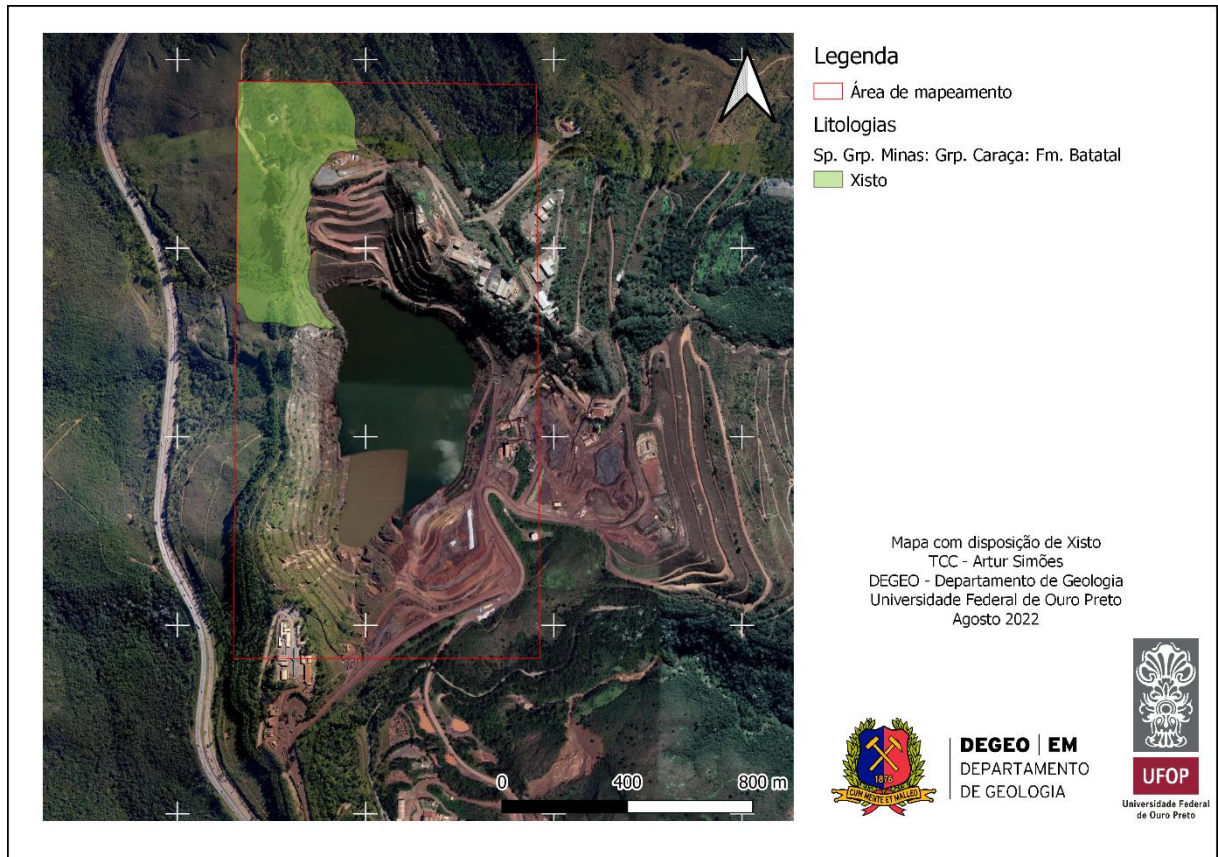


Figura 4-26 - Disposição do xisto na área de estudo.

O xisto se apresenta alterado, com coloração avermelhada, foliação proeminente e intercalações centimétricas de material mais quartzoso, o qual confere um incremento em sua resistência, configurando as classes geomecânicas RMR – essa questão será detalhada no item 4.7 -, conforme exemplificado na Figura 4-27.

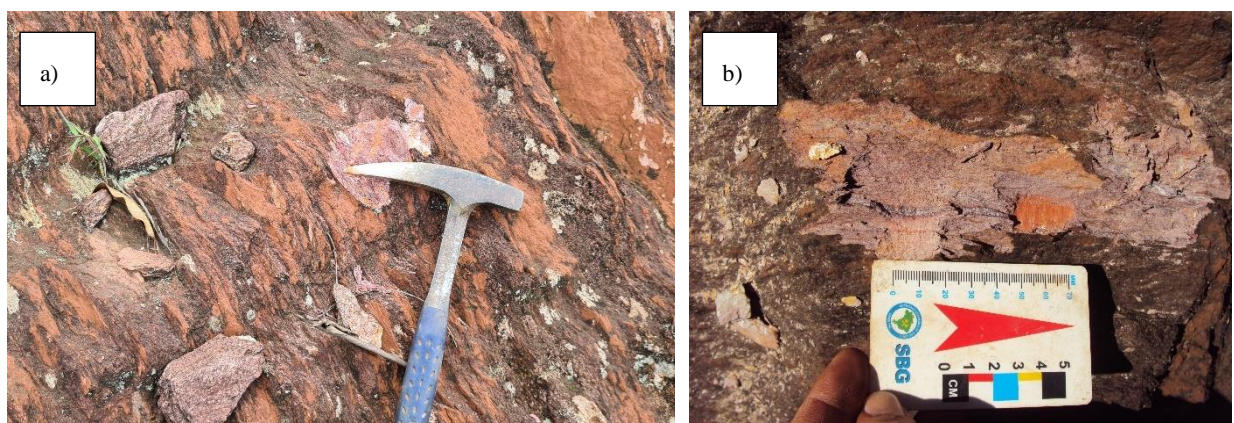


Figura 4-27 - (a) e (b) Ponto M019 Xisto de coloração avermelhada com intercalações de níveis milimétricos argilosos e níveis silicosos, que conferem maior resistência à litologia.

4.3 COMPILAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DOS CONTATOS GEOLÓGICOS

Tendo em vista que grande parte da área de estudo (em torno de 55%) era composto por áreas sem acesso para realização do mapeamento, a utilização do mapa de curto prazo da mina se fez necessário para identificação da extensão de determinados materiais, assim como da posição de parte dos contatos, conforme descrito no item 4.1. Os materiais e contatos inferidos a partir do mapa de curto prazo foram detalhados no item 4.2 ao se abordar cada litotipo mapeado.

Dessa forma, ressalta-se que nos locais inacessíveis e naqueles onde houve comprovada modificação do antigo arranjo da cava, foram mantidos os contatos geológicos do mapa de curto prazo.

A Figura 4-28 apresenta a compilação dos litotipos mapeados com os respectivos ajustes dos contatos geológicos que tiveram como base o mapa de curto prazo.

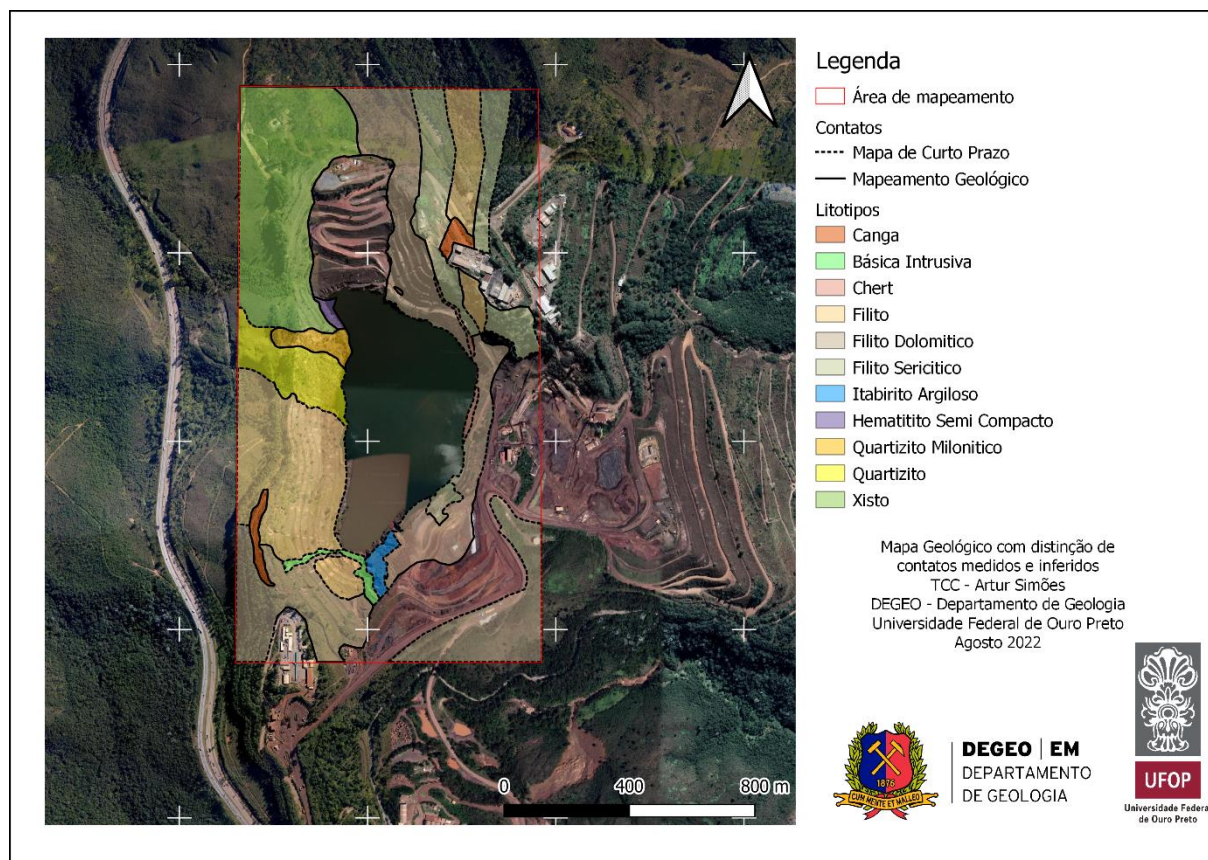


Figura 4-28 - Mapa Geológico da área de estudo. Os contatos foram definidos a partir do mapeamento realizado. Nos locais em que não foi possível acesso, foram mantidos os contatos litológicos apresentados no mapa geológico de curto prazo fornecido pela empresa responsável.

4.4 AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS REGIONAIS NA ÁREA DA CAVA

Avaliando-se as estruturas identificadas no mapa elaborado por Alkmim & Marshak (1998) apresentado na Figura 3-5, é possível notar duas grandes falhas em escala regional:

- a. Falha de Gorduras;
- b. Falha de Mutuca.

A Falha de Gorduras pôde ser identificada nos pontos M110 (Figura 4-29) e M117, sendo que, no primeiro, foi evidenciada por um plano que exhibe alteração devido à oxidação ao longo da face do talude. No entanto, a Falha de Mutuca não foi identificada em campo, sendo apenas inferida a partir da geologia regional.

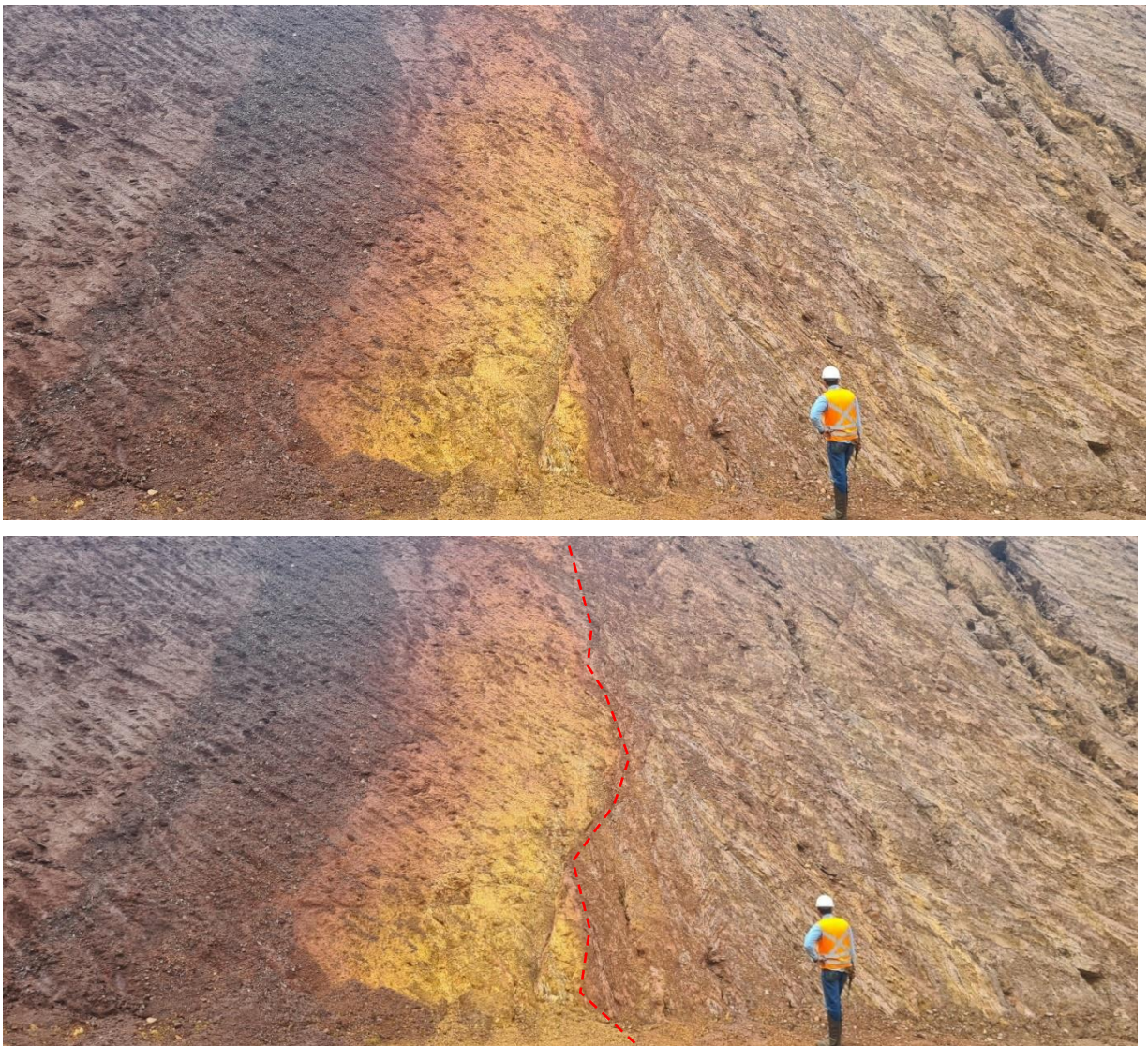


Figura 4-29 - Ponto M110 – Feição estrutural da Falha de Gorduras localizada na porção Sul, próxima à PDE Sul, com atitude 110/75, exibindo estruturas S-C. A linha tracejada indica o plano de falha observado.

Ainda sobre a avaliação da intersecção entre o Homoclinal da Serra do Curral e o Sinclinal da Moeda, contexto em que se insere a cava estudada, Pires (1979) e Alkmim & Marshak (1998) apresentam uma série de falhamentos na região, com destaque para falhas de cavalgamento (*thrust faults*) e de rejeito direcional (*strike-slip faults*). Foram identificados indícios de rejeitos direcionais na região Leste da cava, próximo ao local em que foram identificados indício de rupturas e feições erosivas de escala decamétrica – conforme Figura 4-30.

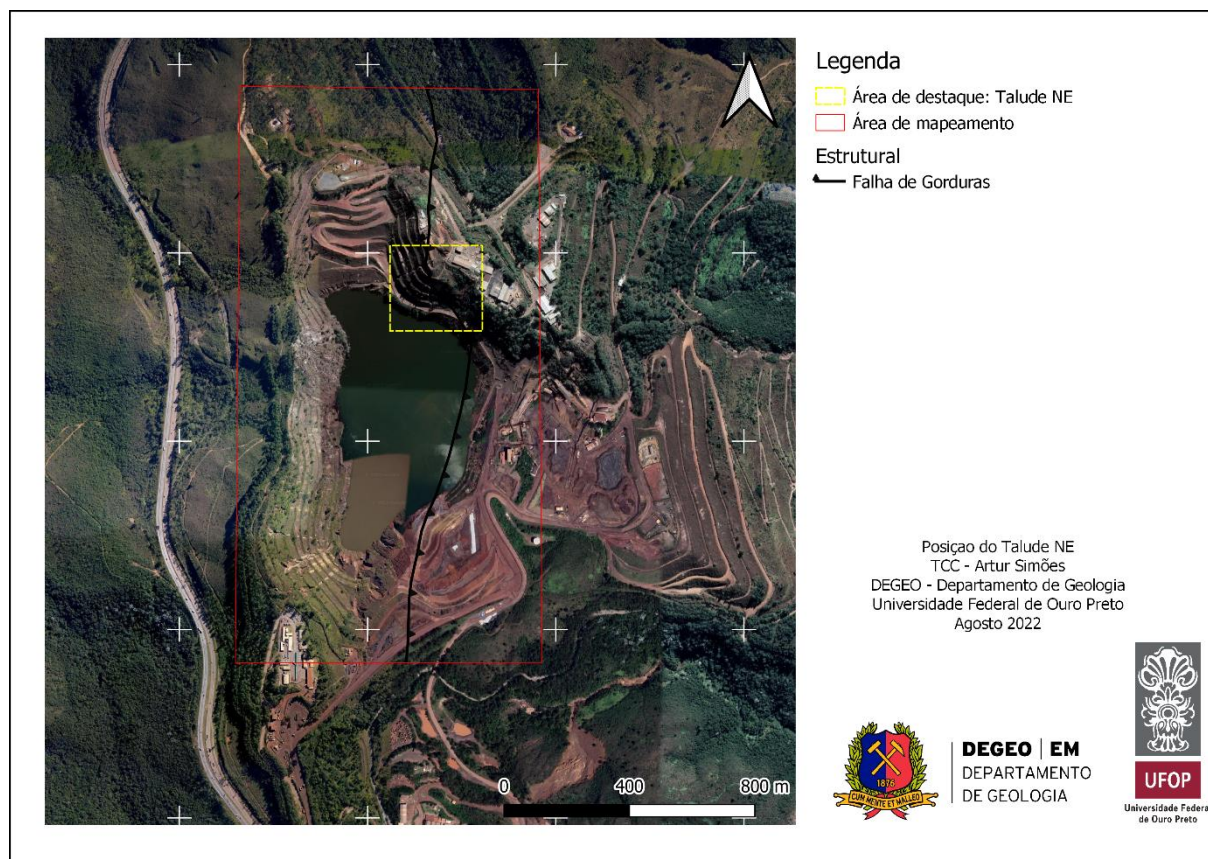


Figura 4-30 - Área de estudo com destaque (em amarelo) para a região do talude NE com indícios de instabilizações no local em que se observa rejeitos direcionais relacionados à Falha de Gorduras.

Além disto, a direção das estruturas no talude NE demonstra uma provável ação tectônica (falhamento ou estruturas locais de cisalhamento) devido às inflexões observadas nas estruturas planares e exemplificadas pela posição da foliação principal (Sn) nessa região – conforme Figura 4-31. Esta avaliação se mostrou coerente com as falhas direcionais e de cavalgamento descritas pelos referidos autores, assim como esperado para uma região intensamente deformada em diferentes eventos ao longo do tempo geológico, tal como o Quadrilátero Ferrífero.

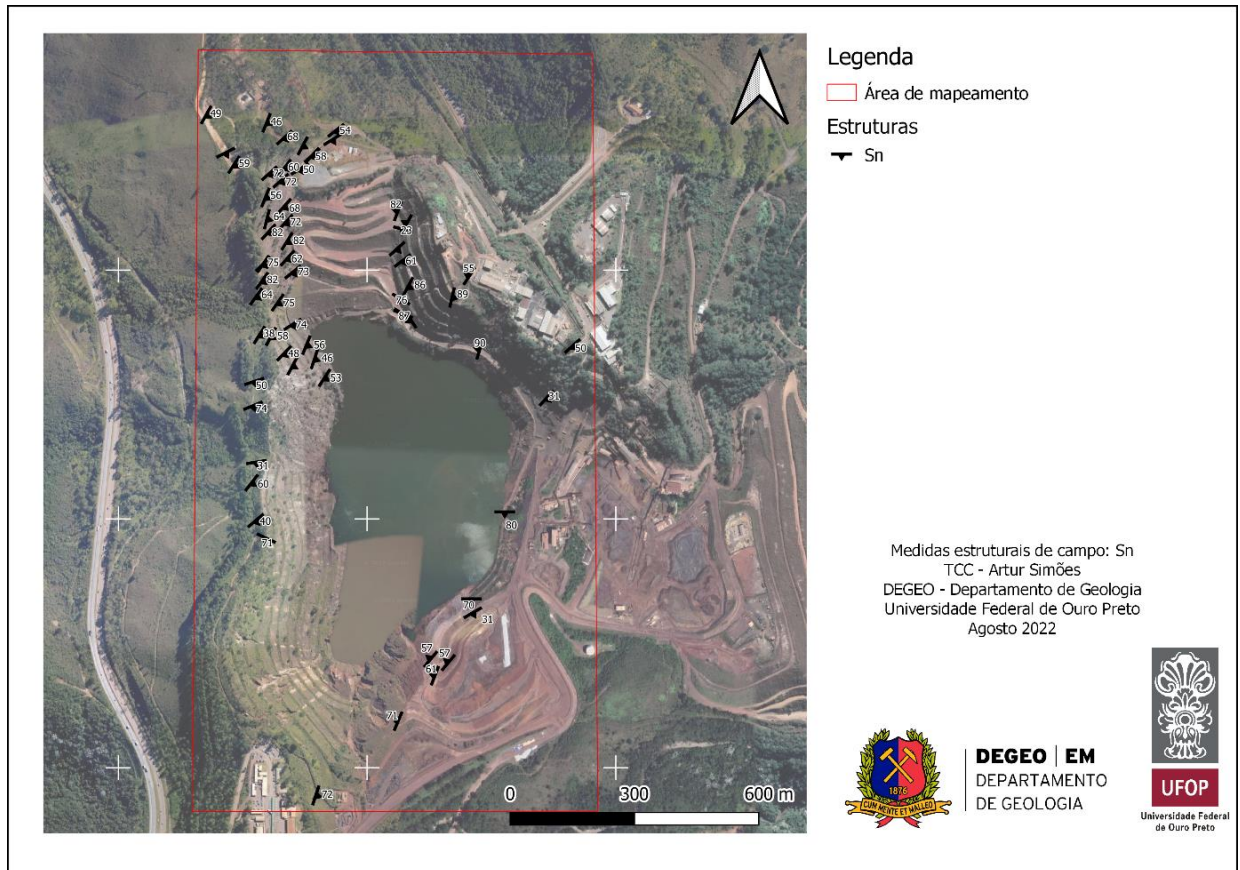


Figura 4-31 - Direção da foliação Sn medidas na etapa de mapeamento da área de estudo.

4.5 AVALIAÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS

A avaliação dos dados estruturais foi realizada com base nos dados coletados na área da cava e seu entorno imediato. Esta avaliação foi realizada por meio de análises estereográficas seguindo os seguintes critérios:

- Representação das atitudes utilizando o critério de direção de mergulho / mergulho (*dip direction / dip*).
- No diagrama estereográfico, foi utilizado o critério de distribuição de Fisher e a projeção inferior *equal area* (rede de Schmidt-Lambert).

A análise das orientações das estruturas foi realizada com o auxílio do programa computacional DIPS, versão 8.0 fornecido pela Rocscience®.

As feições estruturais de maior destaque e presentes nos vários litotipos são:

- i. Acamamento: dado pela gradação composicional e textura das rochas metassedimentares;
- ii. Bandamento Composicional, dado por bandas de constituição e texturas diferentes;
- iii. Foliação: estrutura planar resultante de esforço direcional associado à origem do metamorfismo. Encontra-se distribuída ao longo de toda extensão da região mapeada.

- iv. Lineação de Estiramento Mineral: dado pela orientação preferencial de estiramento mineral ou de minerais placóides;

A distribuição das estruturas metamórficas não se mostrou igual nas diferentes litologias devido, principalmente, às suas diferentes respostas reológicas de cada material. No entanto, entende-se que existe uma foliação principal (S_n) com caimento para SE que se apresenta como a estrutura mapeada com maior persistência. Esta estrutura será melhor detalhada em item subsequente deste documento.

Devido à dificuldade de acesso na maior parte da área mapeada, conforme anteriormente discutido, além do alto grau de alteração nos materiais observados, não foi possível obter um número suficientemente grande de medidas para o tratamento estatístico das estruturas observadas nos diversos litotipos. No entanto, entende-se que a análise e apresentação dos resultados mantém-se valorosa visto que indicam tendências estruturais identificadas por este trabalho de mapeamento, que poderão ser confirmadas ou refutadas em trabalhos futuros, além da possibilidade de serem utilizados na ausência de informações mais precisas.

As juntas e fraturas (Fr) ocorrem seccionando as foliações nos diversos litotipos, sendo, pois, posteriores a ela. Estas discontinuidades compõem um conjunto de famílias mal definidas, não apresentando desenvolvimento homogêneo ao longo da área mapeada. Apresentam-se de modo mais expressivo nas rochas mais competentes, tais como os quartzitos e xistos de maior resistência, enquanto nas rochas menos competentes mostram-se como planos de fraqueza preferenciais, por onde os processos naturais de intemperismo e erosão são expressos com maior notabilidade. Os resultados obtidos para cada feição estrutural encontram-se a seguir:

4.5.1 Acamamento (S_0)

O Acamamento é a estrutura reliquiar planar de menor frequência de observação, conforme esperado em uma região intensamente deformada como o Quadrilátero Ferrífero. Sua observação esteve limitada a 5 pontos no Filito Dolomítico, em dois domínios distantes entre si, sendo obtida uma distribuição dispersa. A média das distribuições dos polos dos planos do acamamento apresenta o valor de 275/28 (Figura 4-32).

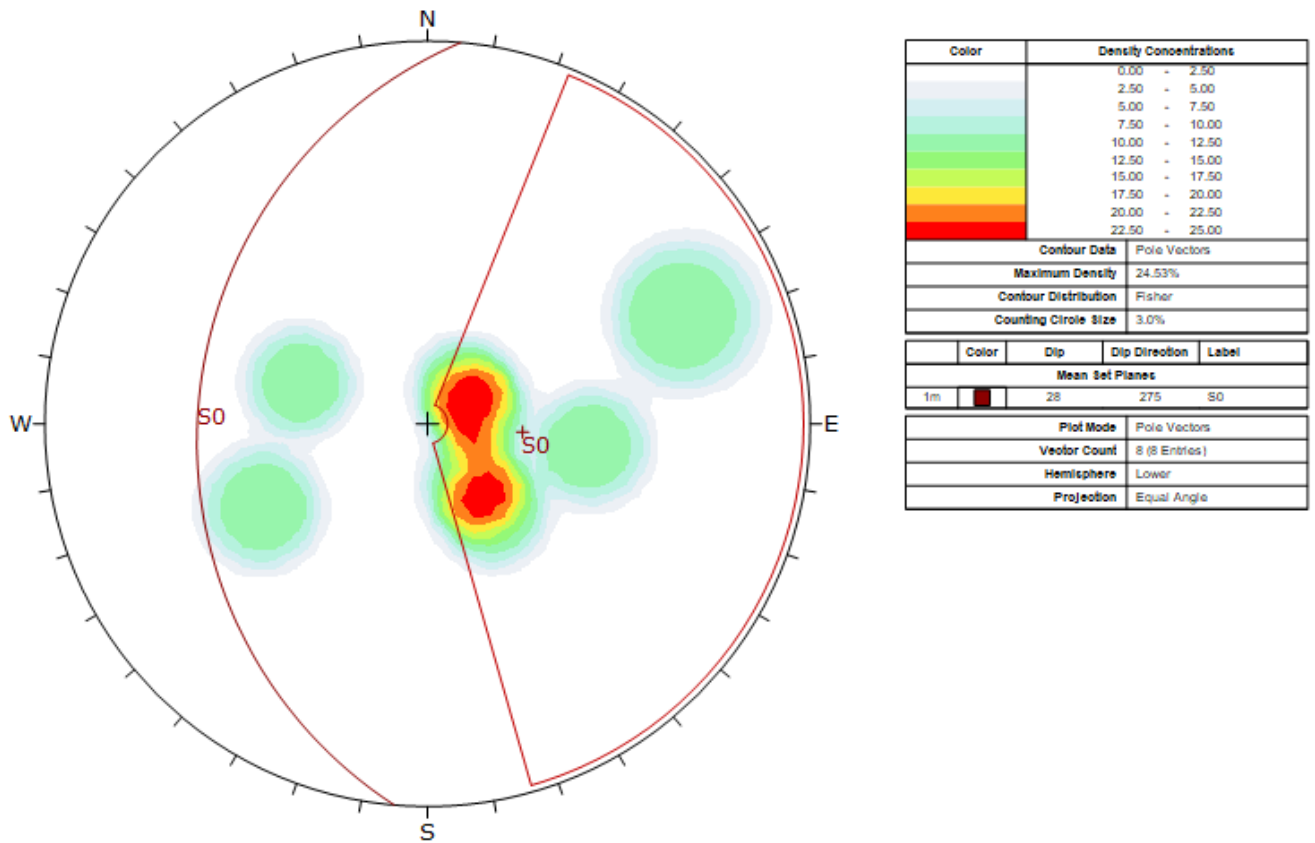


Figura 4-32 - Diagrama Estereográfico (Schmidt) – Polos e planos predominantes do Acamamento reliquiar (S_0).

4.5.2 Foliação (S_n)

A Foliação é a feição estrutural mais importante na área de estudo por se mostrar penetrativa e persistente. A evolução da foliação se mostra diferente nos diferentes litotipos: nas litologias de granulação mais fina (filitos e xistos mais pelíticos), ocorre de maneira mais pronunciada e persistente, enquanto nos litotipos de granulação mais grossa, seu desenvolvimento se mostra menos persistente, sendo caracterizado como milonítica para os quartzitos miloníticos. Parte das estruturas das estruturas inicialmente cadastradas como foliação foram reinterpretadas como bandamento composicional sendo, por isso, apresentadas no próximo item (4.5.3). A média das distribuições dos polos dos planos da foliação apresenta o valor de 132/60 (Figura 4-33).

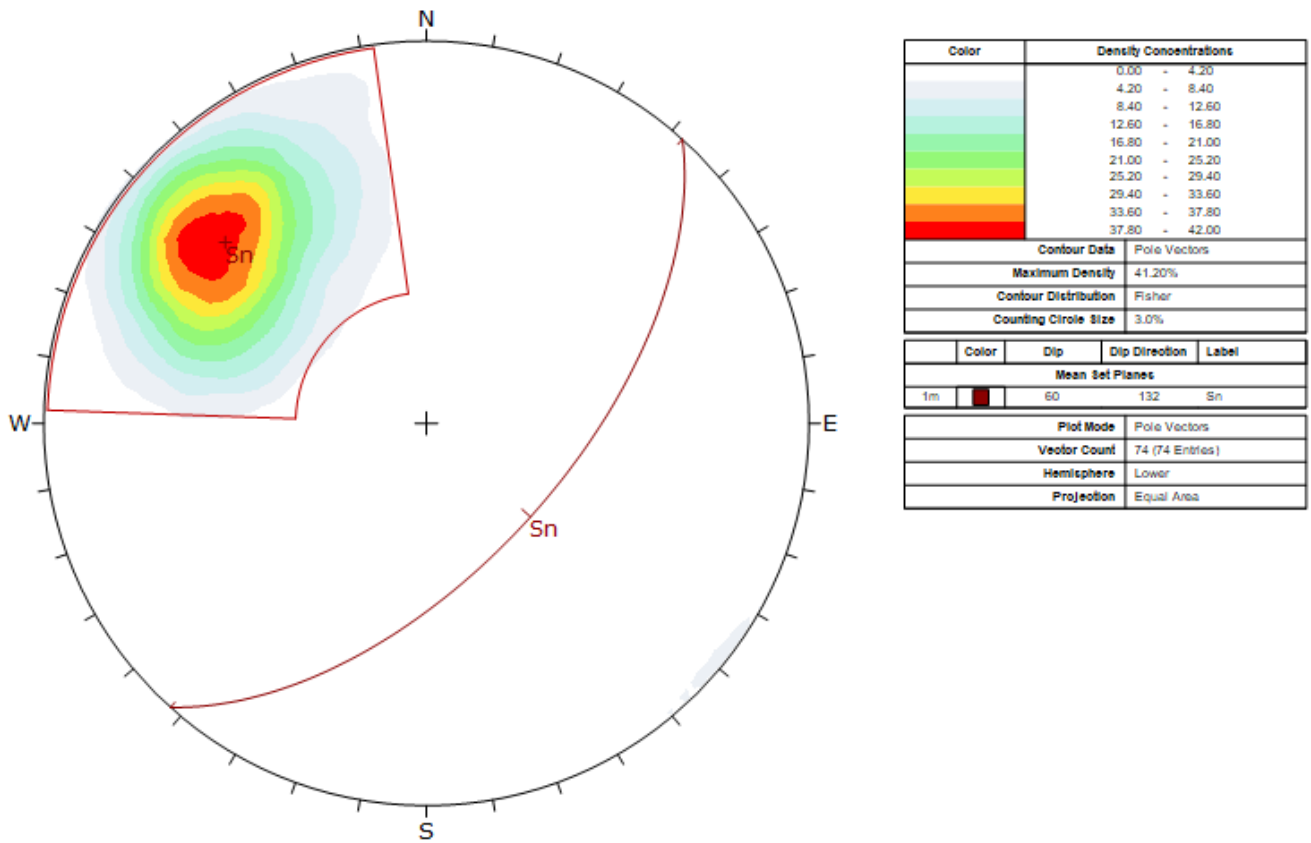


Figura 4-33 - Diagrama Estereográfico (Schmidt) – Polos e planos predominantes da Foliação (Sn).

4.5.3 Bandamento Composicional (S_b)

O bandamento composicional possui uma distribuição média dos polos observados nas direções 125/82 e 203/78. Tal bandamento foi identificado nos filitos (sericítico e dolomítico) mapeados no talude Leste, na sua porção Norte. O primeiro plano observado (S_b) apresenta-se subparalelo à foliação principal (S_n) com um mergulho levemente maior. O segundo plano (S_b+1) encontra-se aproximadamente perpendicular ao anterior, conforme apresentado na Figura 4-34.

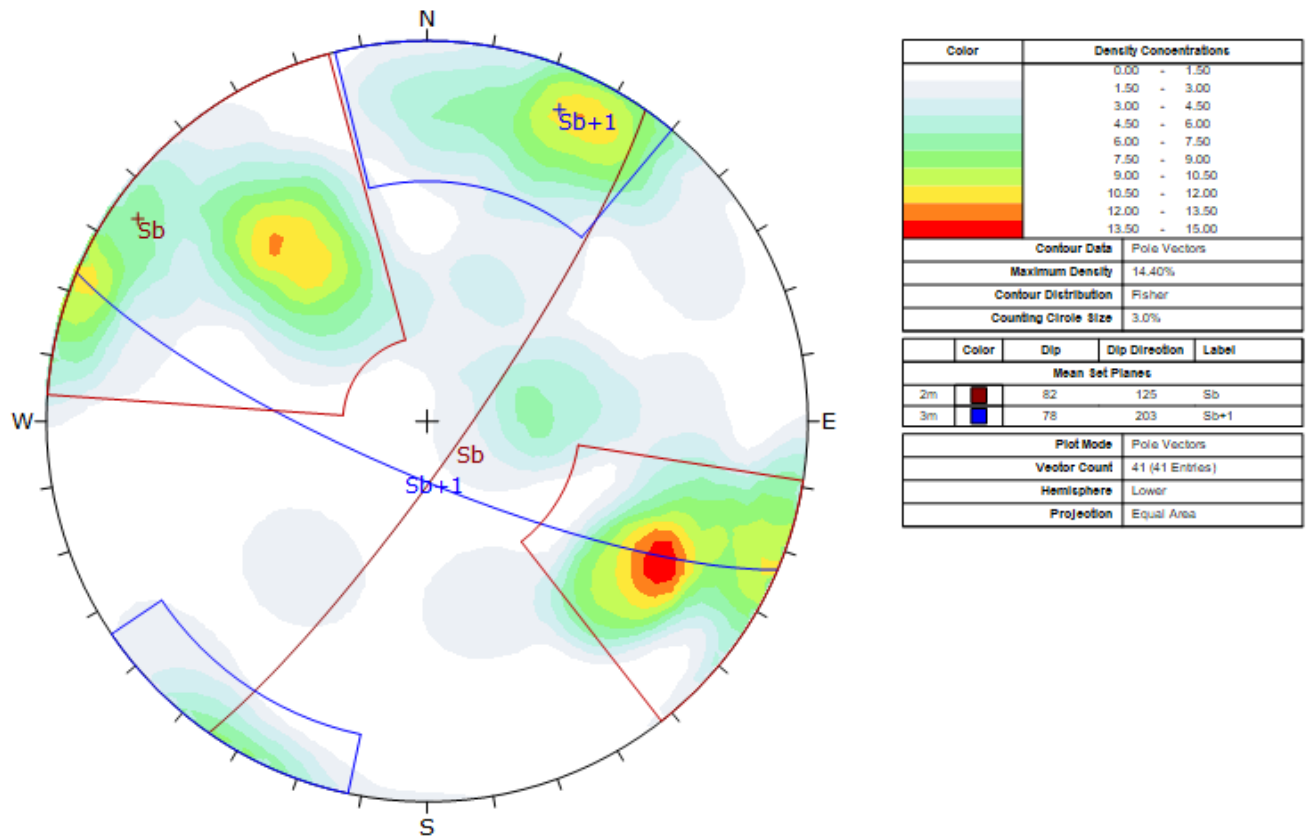


Figura 4-34 - Diagrama Estereográfico (Schmidt) – Polos e planos predominantes do Bandamento Composicional (S_b).

Não foi observado, dentre os filitos, um predomínio entre ambas as direções identificadas, no entanto, nota-se que os bandamentos se apresentam aproximadamente ortogonais e verticalizados entre si. A ortogonalidade entre as estruturas aponta para duas origens distintas, sendo um evento NNE-SSW e outro ENE-WSW, o que condiz com diferentes fases de deformação apresentadas na literatura do Quadrilátero Ferrífero. Além disso, é possível também que a estrutura S_b esteja relacionada ao Supergrupo Rio das Velhas enquanto S_{b+1} ao Supergrupo Minas – sendo necessário uma melhor avaliação uma vez finalizada a interpretação da posição das litologias das litologias em planta e suas respectivas relações estratigráficas no contexto do Quadrilátero Ferrífero.

4.5.4 Fraturas (F_n)

As fraturas foram detectadas, principalmente, nos litotipos mais competentes. Na Figura 4-35 observa-se que foram identificadas três famílias preferenciais com atitudes 297/18 (F_1), 035/66 (F_2) e 117/67 (F_3). Desta forma, entende-se que F_1 provavelmente desenvolveu-se a partir da abertura de um plano de fraqueza por S_0 , assim como F_3 por S_n , enquanto F_2 não se apresenta paralela a nenhuma das estruturas anteriormente identificadas. Entretanto, a atitude de F_2 é aproximadamente ortogonal à S_n , indicando uma possível relação com alguma estrutura não identificada em campo, tal como uma

clivagem de crenulação (S_{n+1}), comumente observada ortogonalmente à foliação principal no Quadrilátero Ferrífero.

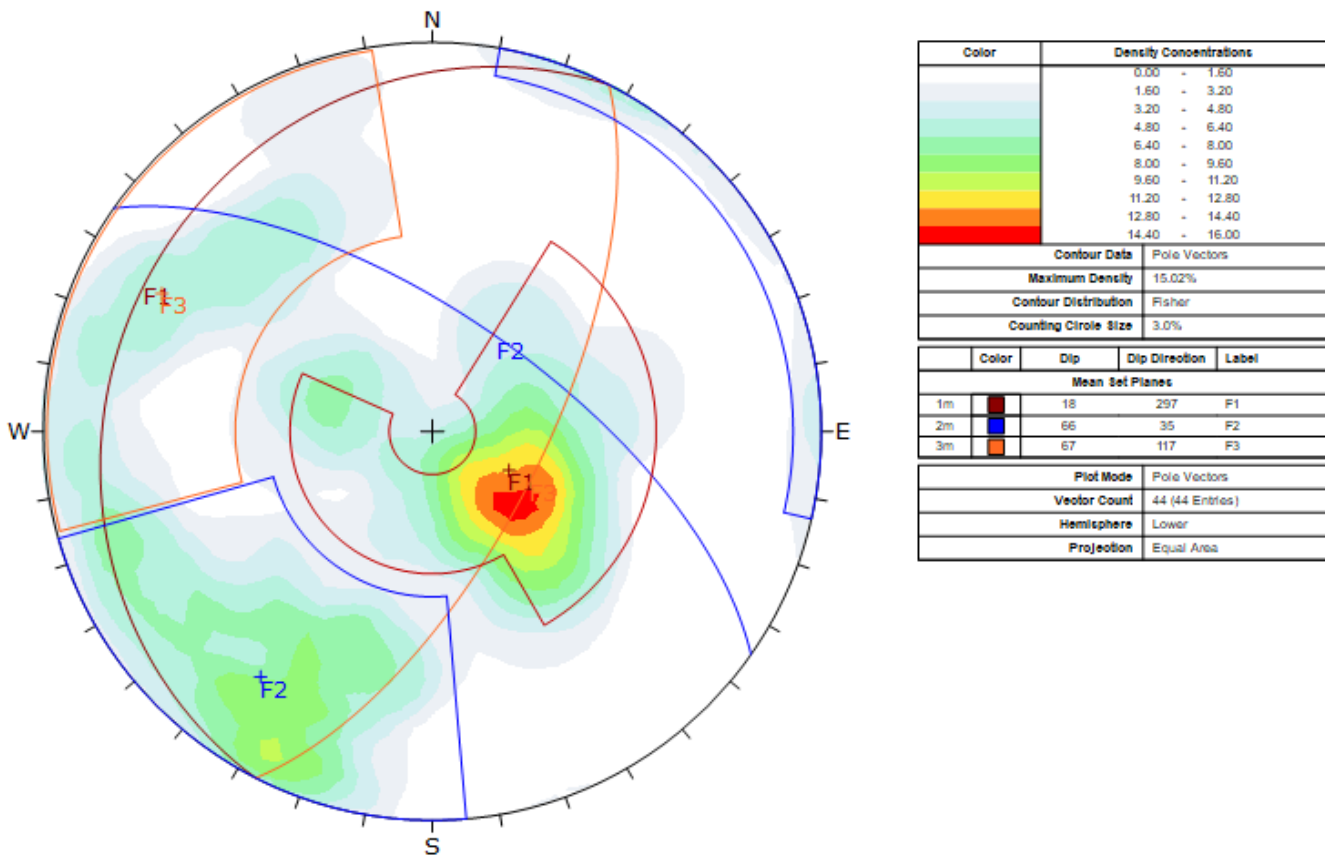


Figura 4-35 - Diagrama Estereográfico (Schmidt) – Polos dos planos de fraturamento (Fr).

4.5.5 Lineação de estiramento mineral (L_i)

A lineação de estiramento mineral (L_i) ocorre predominantemente nos xistos e eventualmente no quartzitos miloníticos assumindo uma orientação geral de 145/61 no talude NE da área de estudo. Sua identificação ocorre pontualmente, com baixa representatividade, tanto na quantidade de medidas quanto no condicionamento geotécnico dos taludes.

4.6 MAPA GEOLÓGICO ELABORADO

A Figura 4-36 apresenta o mapa geológico da área de estudo a partir da junção dos litotipos mapeados e avaliados em conjunto com o mapa geológico de curto prazo, bem como das estruturas regionais extraídas do mapa geológico da CODEMIG (2014-2017), validadas a partir do mapeamento geológico-geomecânico. Destaca-se que as estruturas regionais obtidas do mapa geológico da CODEMIG se mostraram mais aderentes ao observado em campo quando comparado ao mapa geológico utilizado como referência para geologia regional (Endo *et al.* 2019). Por isso, optou-se por

representar as estruturas deste mapa, conforme descrito no item 4.4. Destaca-se que esse mapa ainda será reavaliado nos capítulos seguintes a partir das avaliações geofísicas e integração geológica-geofísica apresentada no capítulo 5: ANÁLISE QUALITATIVA E INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA-GEOFÍSICA.

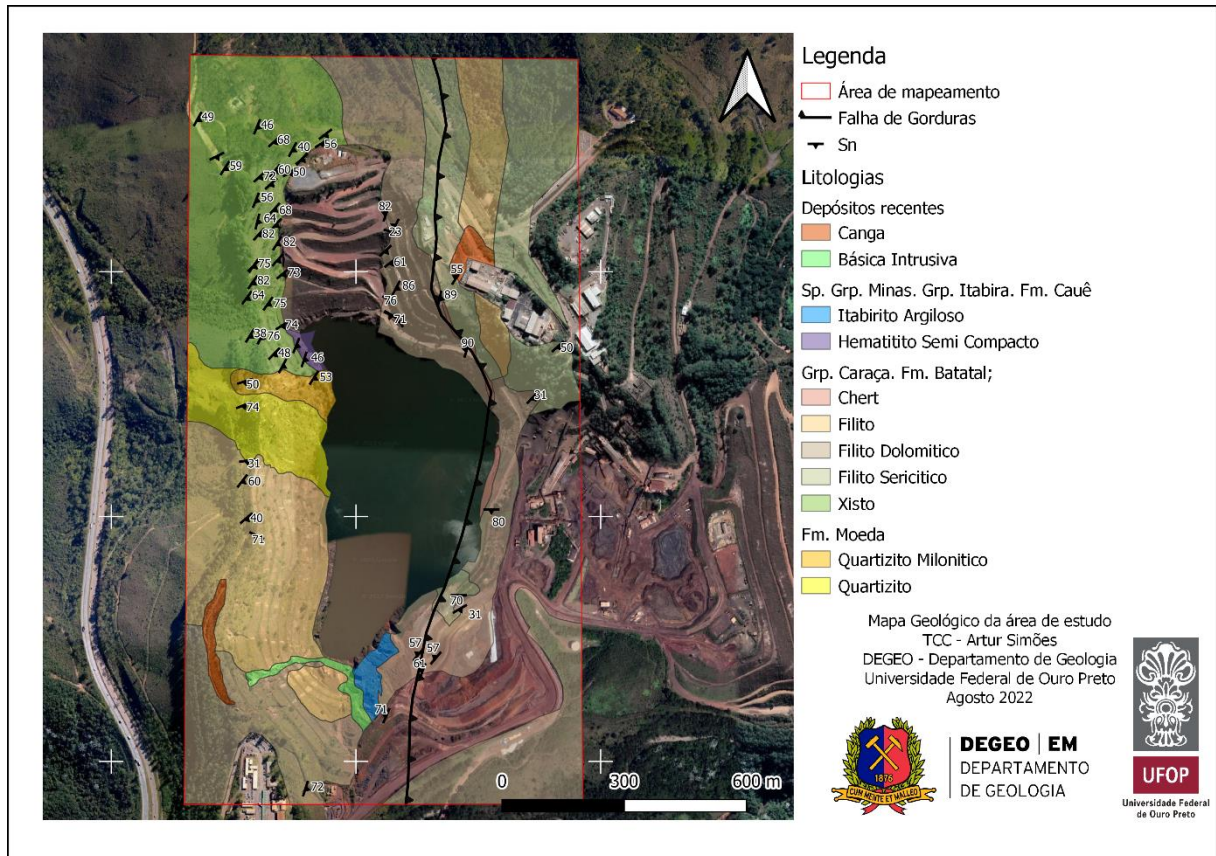


Figura 4-36 - Mapa Geológico da área de estudo.

4.7 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS

Este capítulo apresenta os resultados encontrados no que concerne às classificações geomecânicas (apresentadas no item 2.2.3) aplicadas para os maciços avaliados em campo.

4.7.1 Classificação *Weak Rock* e RMR

A definição de classes de maciço foi realizada tomando como base os parâmetros levantados em campo, os quais foram agrupados em maciços com comportamentos geomecânicos similares.

Para a identificação destes grupos, foram utilizados os critérios de classificação do sistema RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski (2011). Posteriormente, foi realizada uma interpolação dos valores obtidos e delimitadas regiões de acordo com as faixas de valores, agrupando-se, desta forma, regiões com comportamentos geomecânicos similares. As discontinuidades visualizadas em campo foram classificadas segundo o sistema RMR, no entanto optou-se por utilizar a classificação da

foliação principal para representar o maciço, visto sua ampla distribuição (que favoreceu a classificação a partir de um mesmo parâmetro em toda área da cava) além de, geologicamente, ser identificada como estrutura predominante no maciço, visto sua alta persistência, penetratividade e densidade nos maciços – frente às outras descontinuidades avaliadas, tal como as famílias de fraturas.

Os maciços rochosos alterados, nos quais não se aplica o sistema RMR, foram classificados como *Weak Rock*. Isso ocorre pois o principal parâmetro condicionante nesses casos é a resistência. Destaca-se que as rochas avaliadas apresentam anisotropia de resistência condicionada pelas descontinuidades, dentre estas destaca-se a foliação.

Foram considerados como *Weak Rock* os solos, saprolitos e litotipos friáveis de baixa coesão, com resistência variando de R0 a R2-.

Como produto da classificação e delimitação das áreas de comportamentos geomecânicos similares, foi elaborado o mapa geomecânico com classes RMR e *Weak Rock* da área de estudo, conforme apresentado na Figura 4-37.

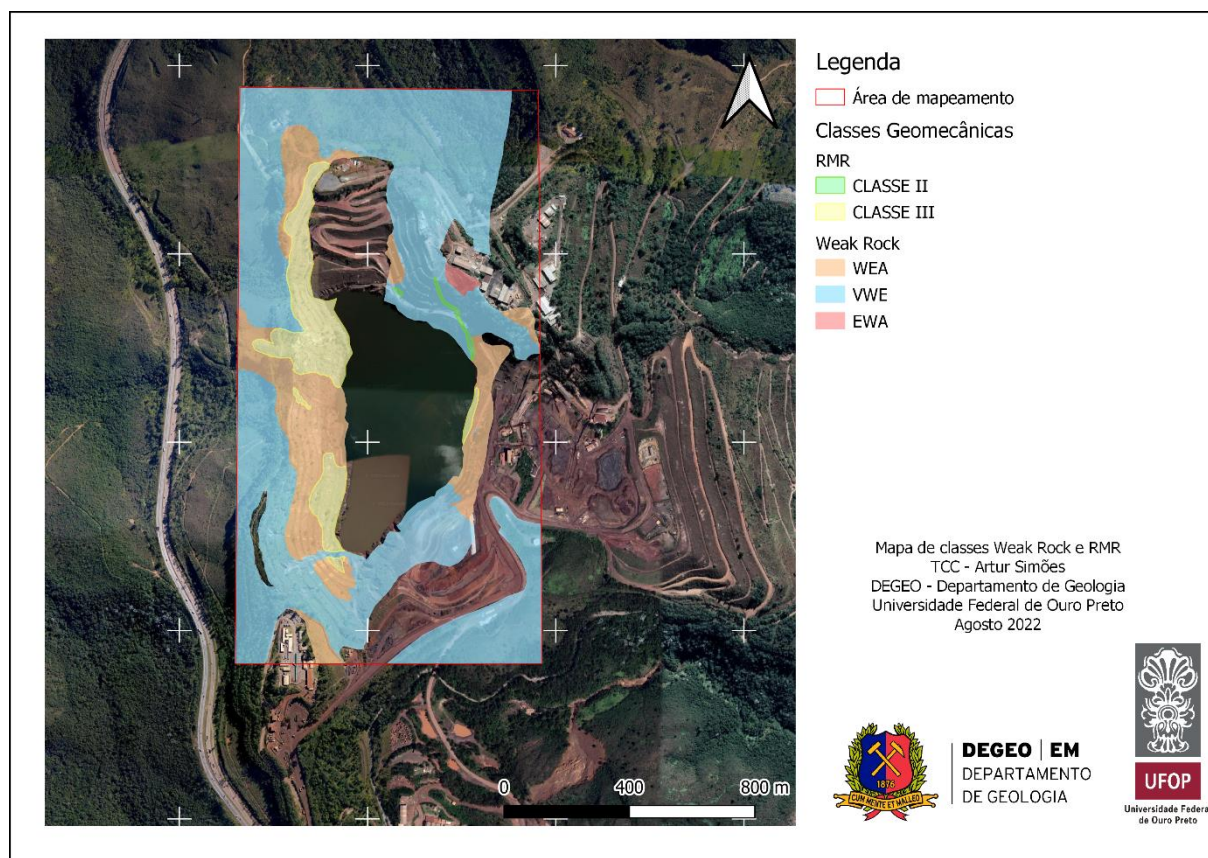


Figura 4-37 - Mapa de classes *Weak Rock* e RMR para a área de estudo.

4.7.1.1 Ocorrência de classes *Weak Rock*

Extremely Weak: maciços constituídos por solos residuais maduros, solos transportados e litotipos friáveis com resistência extremamente branda (R0). Dispõem-se em faixa alongada junto à crista da cava, no talude Leste, próximo à oficina central, onde ocorrem os filitos. Esta mesma região é marcada pela ocorrência de feições erosivas estando na porção superior de uma grande ruptura que ocorre neste talude (Figura 4-38).

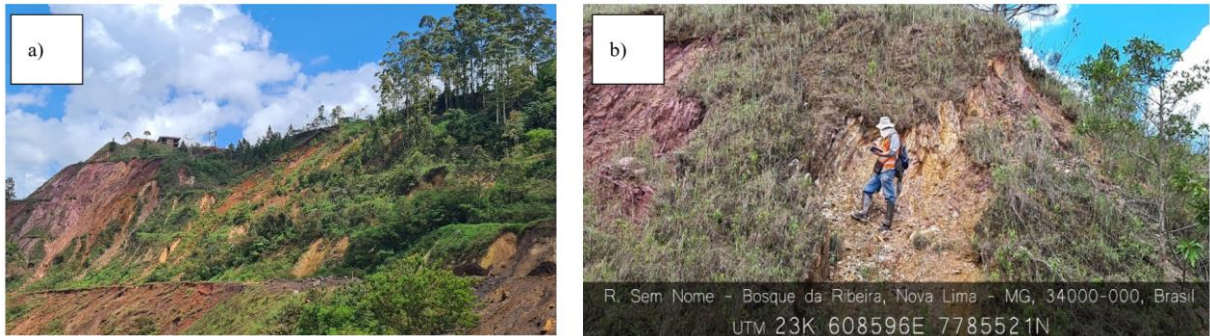


Figura 4-38 - (a) Vista panorâmica da Classe *Extremely Weak* em Filito; (b) Ponto M072: contato em filito com resistência R1⁻ posicionado à esquerda da foto e R0 a direita.

Very Weak: tal como a classe *Extremely Weak*, ambos são maciços compostos por litotipos friáveis, com resistência muito branda inferior (R1⁻). Trata-se da classe de maior predominância em toda a cava e seu entorno imediato. No talude Leste, esta classe se estende tanto a Norte quanto a Sul, sendo representados pelos filito conformando os taludes da cava (Figura 4-39).

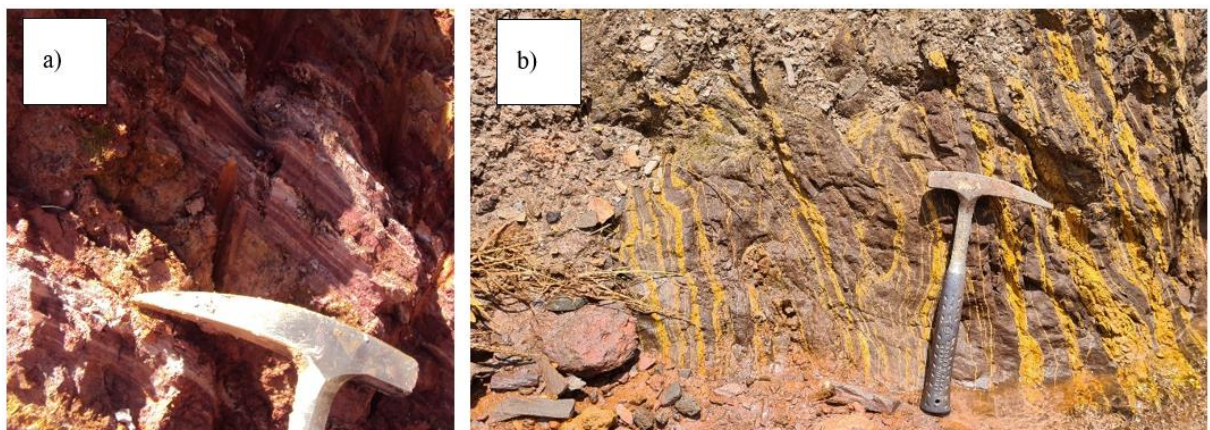


Figura 4-39 - Litotipos de classe *Very Weak* (a) Ponto M076: Filito Sericítico resistência muito branda (R1⁻), com intercalação milimétrica de minerais argilosos; (b) Ponto M083: Filito Dolomítico no talude Leste, resistência muito branda (R1⁻), apresentando um dobramento evidenciado pelo bandamento composicional.

Para o talude Oeste a classe é representada pelos xistos alterados fora do limite da cava e oeste, principalmente pelo filito dolomítico localizado na porção superior da cava (Figura 4-40). Durante a etapa de mapeamento, especialmente no entorno imediato da cava, não foram observados afloramentos de maciços rochosos (litotipos pouco alterados), a exceção do quartzito e quartzitos

miloníticos, que evidenciam litotipos de maior resistência possivelmente pela sua melhor resposta aos processos naturais de intemperismo ou alteração.

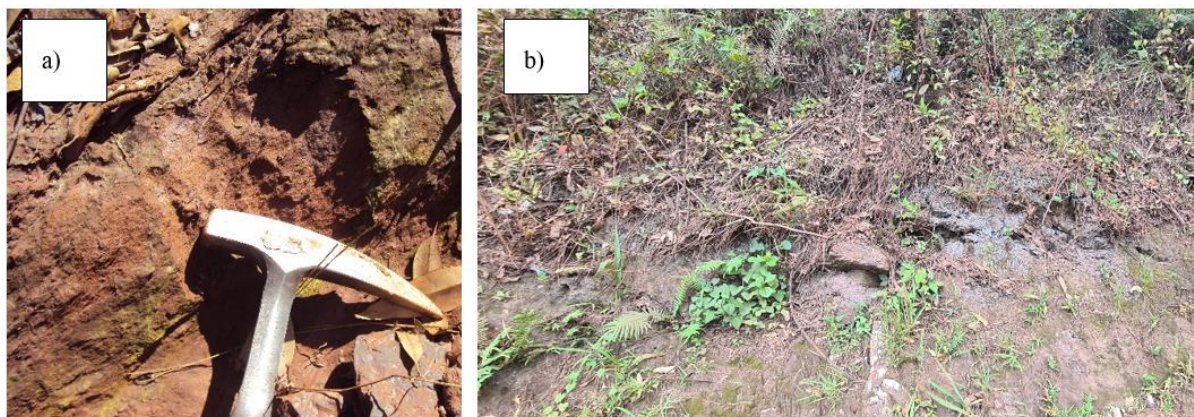


Figura 4-40 - Litotipos da classe *Very Weak* no talude Oeste; domínios NW e W de classe *Very Weak*. (a) Ponto M015 (NW): Xisto com foliação milimétrica marcada pela forte presença de sericita; (b) Ponto M141 (W): Filito de coloração cinza com intercalações de níveis milimétricos argilosos.

Weak: são maciços brandos (R1+ a R2-), compostos pelos mesmos litotipos friáveis abordados na classe *Very Weak*. Corresponde à segunda classe de maior ocorrência em área e se distribui principalmente no interior da cava e nas porções centrais dos taludes Leste e Oeste (Figura 4-41).

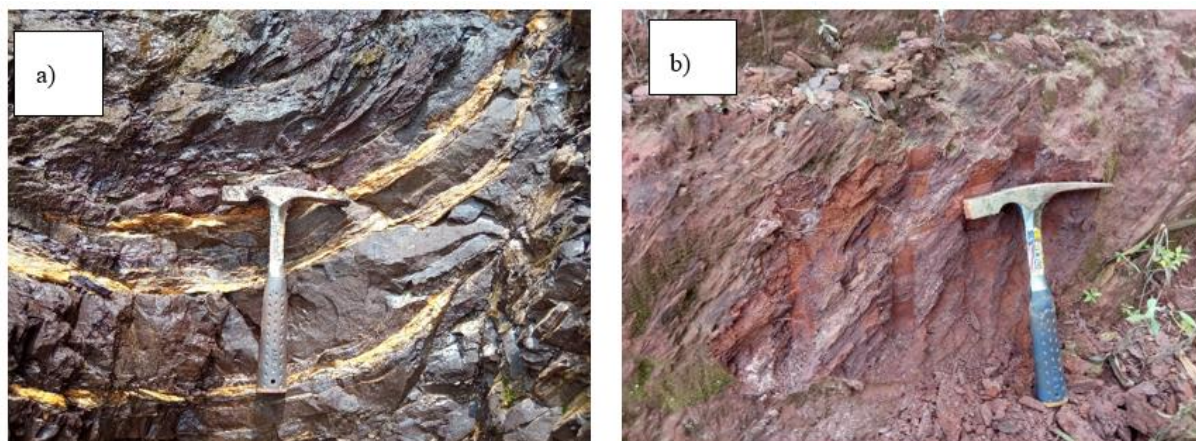


Figura 4-41 - Litotipos de classe *Weak* (a) Ponto M015: Talude E, domínio NE - Filito Dolomítico com foliação centimétrica marcada pela presença de níveis manganésiferos de resistência R1⁺; (b) Ponto M025: talude de Xisto de coloração avermelhada a marrom, alterado, com intercalações de níveis milimétricos argilosos.

4.7.1.2 Ocorrência de classes RMR

- **Maciço Classe III (maciço Regular):** maciço pouco a medianamente resistentes (R2+ a R3), intensamente alterado (W4) e RQD pobre, atribuído aos Xistos, bem como medianamente alterado (W3) e extremamente fraturado (Figura 4-42).

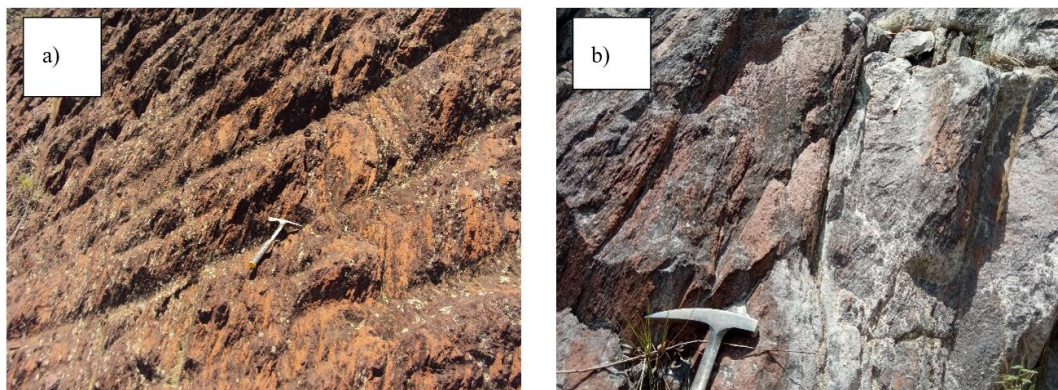


Figura 4-42 - Maciço classe III, talude Oeste, setor NW (a) Ponto M008: Xisto com foliação milimétrica; (b) Ponto M064: Quartzito Milonítico de coloração cinza clara.

- **Maciço Classe II (maciço Bom):** a definição desta classe e sua respectiva delimitação foi embasada no afloramento de metachert no ponto M128 (Figura 4-10). Este afloramento é definido como sendo de alta resistência (R4) e baixo grau de alteração (W2). Conforme informação do corpo técnico da empresa responsável, a continuidade a Sul deste corpo apresenta-se intensamente fraturada, com preenchimento de suas paredes com material oxidado.
- **Maciço Classe I (maciço Muito Bom):** este maciço não foi mapeado na área de estudo, podendo, contudo, ocorrer nas cotas inferiores, abaixo do nível do lago. Fora da área do mapeamento, foi identificado em um afloramento no ponto M101 – observado em um quartzito – conforme Figura 4-43.

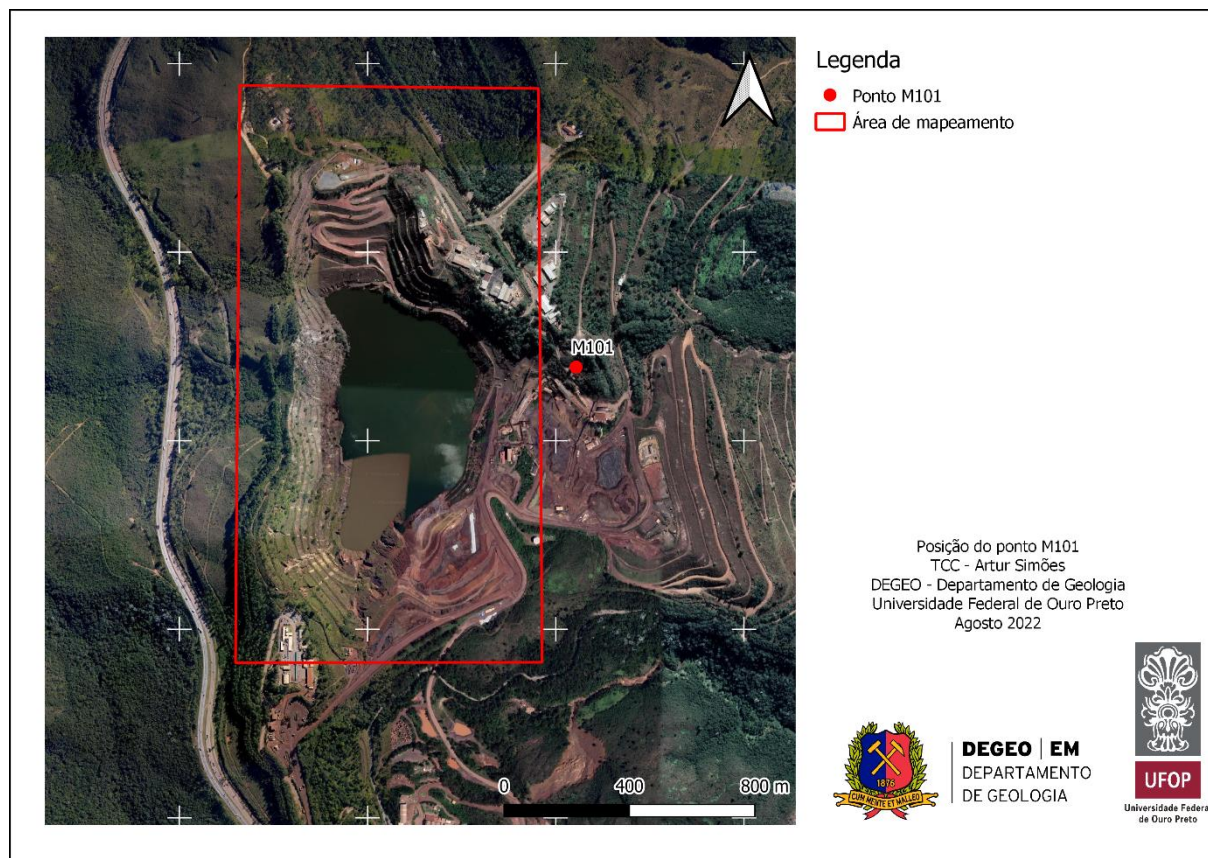


Figura 4-43 - Área de mapeamento com destaque para posição do ponto M101 com afloramento de quartzito.

4.7.1.3 Cangas e solos lateríticos

As lateritas observadas na área de estudo apresentam-se de forma pouco expressivas: representadas por dois corpos pouco persistentes, sendo mais expressiva na porção NE da cava, além de uma lente na porção SW com 60 m de extensão. Esse material se encontra melhor detalhado no item 4.2.2.

Como as lateritas foram descritas com resistência acima de R2-, foram classificadas como canga. Por isso não foi observado em campo lateritas que se encaixassem na classificação de solo laterítico.

4.7.2 Classificação GSI

A classificação pelo sistema GSI (*Geological Strength Index*) foi realizada juntamente com o sistema RMR, sendo adotados os critérios propostos em Hoek & Marinos (2000) e os dados coletados durante a caracterização geológico-geomecânica foram interpretados com a metodologia apresentada no item 2.2.1.4 deste documento.

Em campo, foi realizada a avaliação tátil visual em cada ponto levantado, a fim de enquadrar as condições observadas no diagrama GSI (Figura 4-44). Desta forma, foi possível identificar a linha correspondente à condição das estruturas do maciço e a coluna correspondente à condição da superfície das descontinuidades, de modo a obter o índice GSI correspondente. A classificação GSI, realizada em campo, foi plotada no respectivo ábaco. O resultado obtido encontra-se na Figura 4-44.

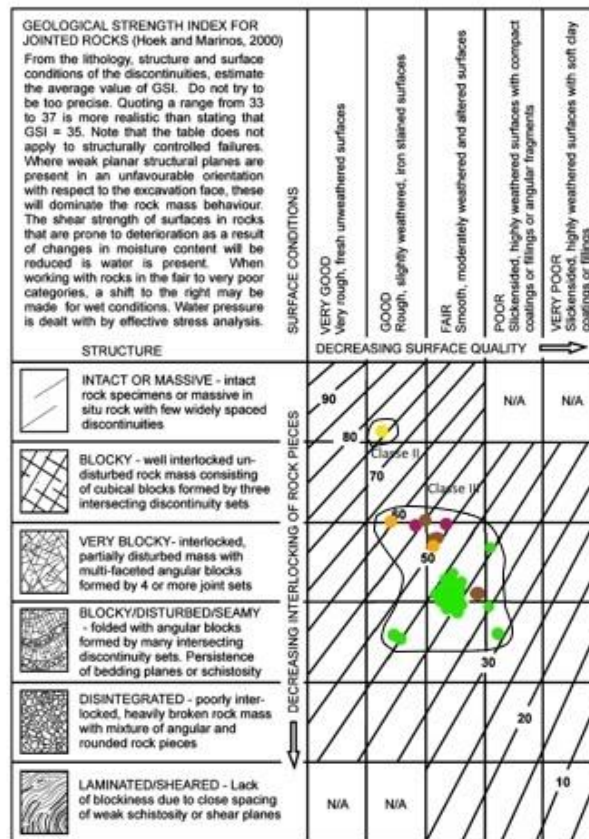


Figura 4-44 - Contornos de classe de maciço de acordo com classificação GSI (Hoek & Marinos, 2000). Destacado os pontos das litologias: em amarelo o metachert, em laranja o quartzito, em marrom o quartzito milonítico, em rosa o hematitito e em verde o xisto.

Como produto da delimitação das áreas com valores similares de GSI, foi elaborado o mapa GSI conforme a Figura 4-45.

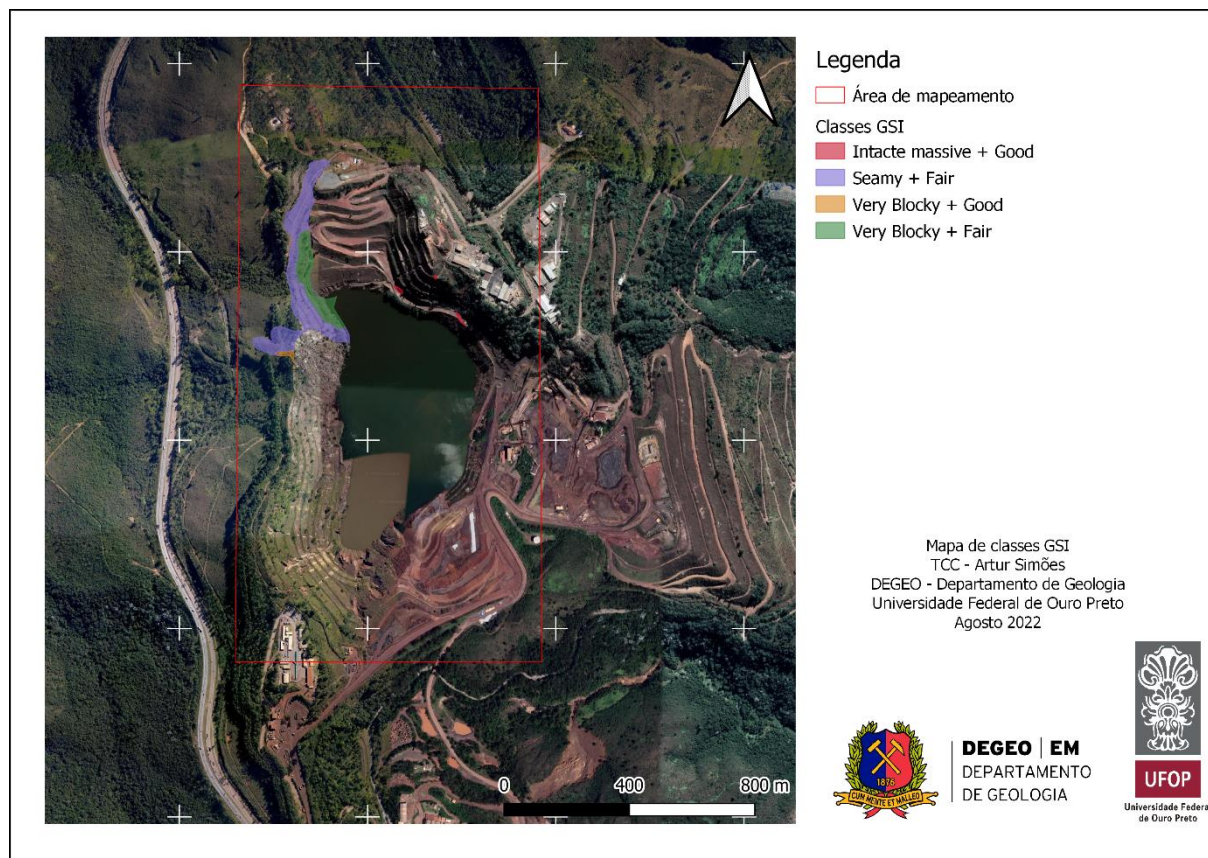


Figura 4-45 - Mapa de classificação GSI para a área de estudo.

A maior parte dos dados coletados em campo indica que, quanto à resistência e deformabilidade, grande parte do maciço rochoso da cava se enquadra no intervalo GSI *Very Blocky + Fair*. Os dados obtidos que se enquadram nesta classificação são referentes, em sua maioria, à litologia xisto, mas também abrangem quartzitos, quartzitos miloníticos e hematititos.

Apesar dos valores GSI se apresentarem em sua maioria classificados no intervalo supracitado, a “classe” GSI que abrange a maior área superficial é a *Seamy + Fair*, que abarca basicamente o xisto. As “classes” *Very Blocky + Good* e *Intacte/Massive + Good* também ocorrem em porções pontuais da cava, nos setores estruturais W e NE, respectivamente.

Verifica-se que as classes obtidas por meio do cálculo do RMR (Bieniawski 2011) ocupam regiões bem definidas do ábaco GSI (Hook & Marinos 2000), sendo a Classe III restrita ao intervalo GSI correspondente à *Very Blocky + Fair*, *Seamy + Fair* e *Very Blocky + Good*, enquanto a Classe II encontra correspondência com o intervalo *Intacte/Massive + Good*. Dessa forma, é possível observar que a correlação matemática ($GSI = RMR - 5$) foi satisfatória para balizar o valor numérico da classificação GSI, definida em campo de modo descritivo.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE QUALITATIVA E INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA- GEOFÍSICA

5.1 INTRODUÇÃO

A análise qualitativa de dados geofísicos apresenta-se como uma forma de visualizar resultados descritivos, por meio de caracterização 2D de padrões e anomalias a partir de texturas e cores dos mapas geofísicos. Dessa forma, busca-se o esboço de regiões similares, classificando-as em fácies com intuito de se estabelecer correlações com o contexto geológico (Dentith & Mudge 2014) e, neste estudo, geomecânico.

No mais, os lineamentos geofísicos podem ser vistos como parâmetros guia para avaliação de feições geológico-estruturais na área de estudo. Dessa forma, neste capítulo apresenta-se à análise geofísica qualitativa e morfoestrutural com a apresentação e avaliação dos mapas temáticos resultantes do tratamento dos dados geofísicos e avaliação dos lineamentos magnetométricos e radiométricos. Por fim, apresenta-se também a integração dos resultados da avaliação geofísica com aquela obtida a partir das técnicas de mapeamento geológico-geomecânico.

5.2 BANCO DE DADOS GEOFÍSICO

A base de dados utilizada neste trabalho é composto pela área 02 do aerolevantamentos de magnetometria e gamaespectometria advindos do Programa de Levantamento Aerogeofísico do estado de Minas Gerais (PLAMG). O programa teve início em 2001, fase em que foram levantadas as primeiras 6 áreas realizado pelo estado de Minas Gerais a partir da CODEMIG. Em 2005 o programada foi retomado e finalizado em 2005 e finalizado em 2011 com a cobertura de aproximadamente 90% da área do estado (França 2017). O levantamento incluiu intensidade do campo magnético total, sinal analítico do campo magnético, derivada vertical do campo, modelo digital do terreno, contagem total, ternário K-U-Th, Potássio, Urânio, Tório, razão U/Th, razão U/K e razão Th/K. A Tabela 5.1 apresenta o resumo do levantamento realizado em cada área.

Tabela 5.1 - Resumo do levantamento realizado pelo Programa de Levantamento Aerogeofísico no estado de Minas Gerais. Obtido de França (2017).

Ano	Áreas levantadas	Área coberta no estado de MG	Área (Km ²)	Linhas de voo (Km linear)
2000-2001 (CODEMIG/SEDE)	1 a 6	14%	78.000	344.423
2005-2006 (CODEMIG/CPRM)	7 a 9	20%	119.000	294.920
2008-2009 (CODEMIG/CPRM)	10 a 13	25%	144.000	300.223
2010-2011 (CODEMIG/CPRM)	14 a 20	28%	181.000	357.064
TOTAL/FINAL	20 áreas	87%	522.000	1.296.630

A área de abrangência foi determinada de forma visual. O principal critério considerado foi a abrangência da área de estudo de forma a compor uma extensão superior a área da cava – visto a necessidade de avaliação geológica-estrutural de feições de caráter regional a sub-regional.

O levantamento da área 02 do PLAMG O foi realizado entre agosto de 2000 e março de 2001, utilizando como base para as operações as cidades de Ponte Nova e Santo Antônio do Amparo. Essa área foi subdividida em dois blocos: Oeste e Leste.

O Bloco Oeste é composto por uma área de 21.564 km² com linhas de produção na direção N30E e linhas de controle N60W. Já o Bloco Leste, área de 13.611 km² com linhas de produção na direção N30W e linha de controle N60E. Em ambos foi adotado o espaçamento entre linha de produção 250 m e entre linhas de controle 2,5 Km.

5.3 ANÁLISE MAGNETOMÉTRICA

A análise magnetométrica deste trabalho foi realizada a partir do banco de dados apresentado no item 5.2 pela metodologia descrita anteriormente no capítulo 2.3.2. A partir dos dados obtidos do aerolevanteamento do PLAMG foram produzidos os mapas de campo anômalo (CA), amplitude do sinal analítico (ASA), além das derivadas em x (DX), y (DY) e z (DZ). Para geração dos mapas, os dados foram tratados com o processamento de filtros com o intuito de se destacar a ocorrência de anomalias magnéticas. Inicialmente foram gerados os *grids* e processados os mapas CA e ASA a partir da mínima curvatura com células de tamanho 250. Os demais mapas foram gerados a partir do processamento pelo *grid* de campo anômalo.

Os mapas gerados contavam com uma área maior que a de estudo apresentando, no entanto, uma defasagem na região nordeste. Essa defasagem desconsiderada na avaliação dos produtos uma vez que representa aproximadamente 14,5% da área de estudo em uma região cujo acesso não prejudicou a realização do mapeamento geológico-geomecânico. A Figura 5-1 apresenta a compilação dos mapas produzidos.

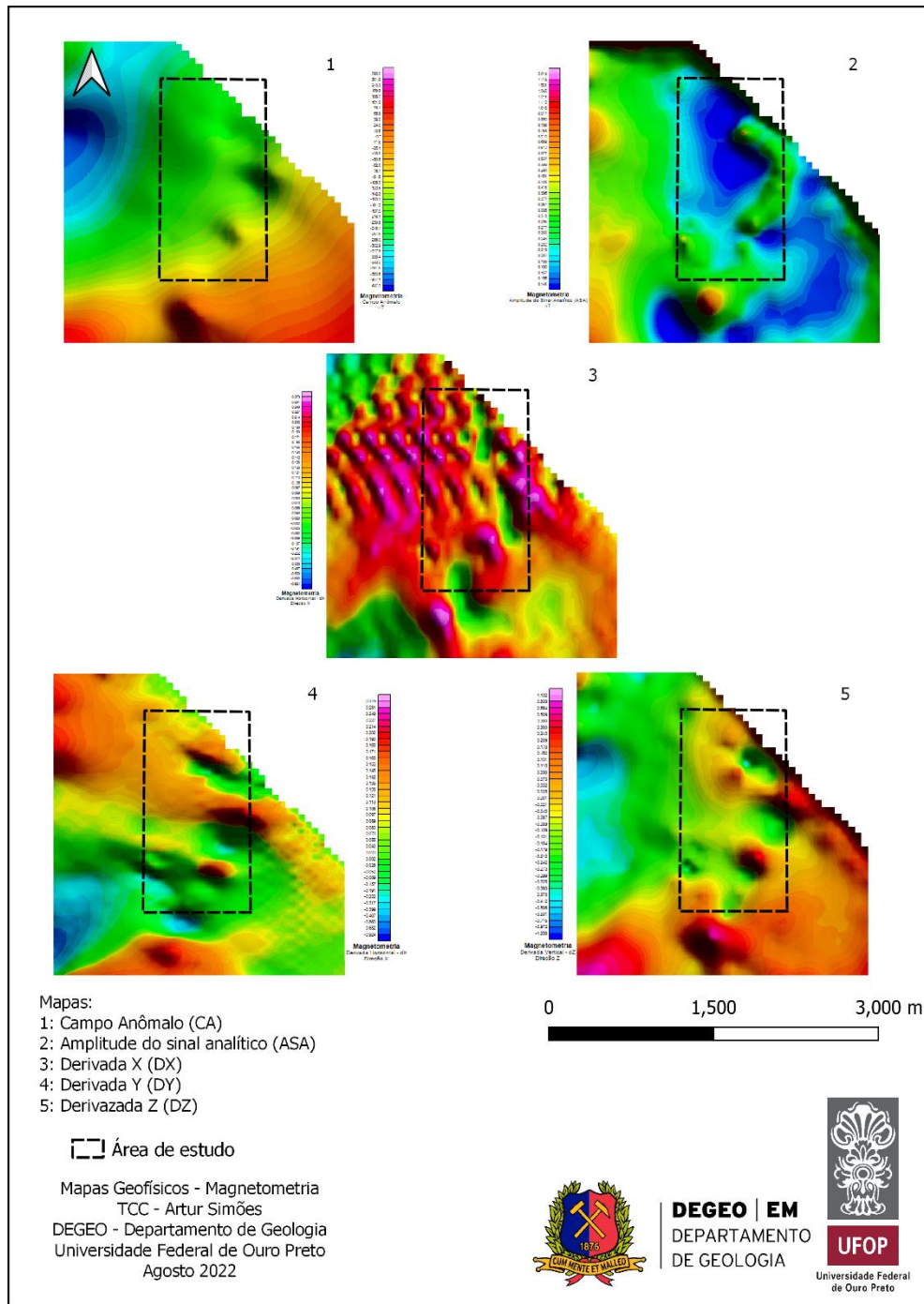


Figura 5-1 - Mapas magnetométricos produzidos neste trabalho.

Os resultados obtidos a partir dos mapas magnetométricos não se apresentaram adequados para uma boa interpretação da área de estudo. Os lineamentos geo-estruturais não se apresentaram de

forma clara, enquanto os contornos e anomalias observadas não se mostraram coerentes com o esperado pela área a partir do conhecimento prévio da região (dados do mapeamento realizado e furos de sondagem observados). A má definição desses contornos e lineamentos pode estar relacionado à disseminada presença de material magnético nessa região em que é conhecida a forte presença de depósitos ferríferos associados à formação Cauê.

No entanto, o mapa de amplitude do sinal analítico (ASA) apresentou anomalia negativa na região central da cava (área minerada), além do trecho norte – área minerada sob a qual foi posicionada uma pilha de estéril. Dessa forma, a anomalia observada se mostrou coerente com o observado na região para compreensão e definição da geometria do corpo de minério de ferro associado à formação Cauê. A Figura 5-2 apresenta o descrito anteriormente.

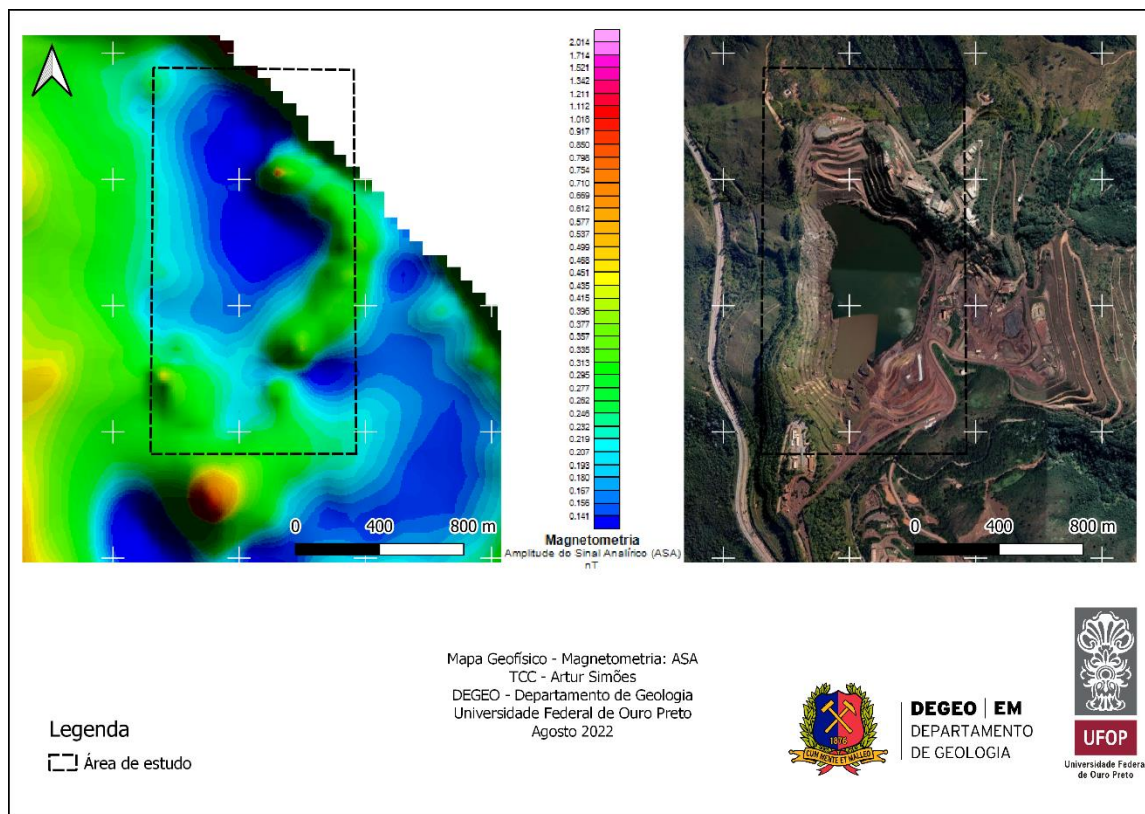


Figura 5-2 - Mapa de amplitude do sinal analítico (ASA) para área de estudo.

5.4 ANÁLISE RADIOMÉTRIA

Uma das principais aplicações da radiometria está na avaliação de materiais em superfície (devido à sua baixa penetrabilidade) e suas respectivas litologias a partir da concentração dos elementos radioativos tório (Th), urânio (U) e potássio (K) – conforme detalhado no item 2.3.3. Dessa forma, parte importante de sua aplicação está relacionada ao reconhecimento e correlação das litologias em solo e rocha superficiais.

Os *grids* foram gerados, novamente, a partir do método de mínima curvatura a partir de células de tamanho 50. Conforme detalhado no item 2.3.3, foram utilizados os dados de contagem total dos elementos radiativos descritos no último parágrafo (Th, U e K) além de suas respectivas razões. Dessa forma, foram produzidos 7 mapas, sendo eles: contagem total de U, Th, K; razões Th-K, U-Th e U-K além do mapa de imagem ternário conforme demonstrado na Figura 5-3.

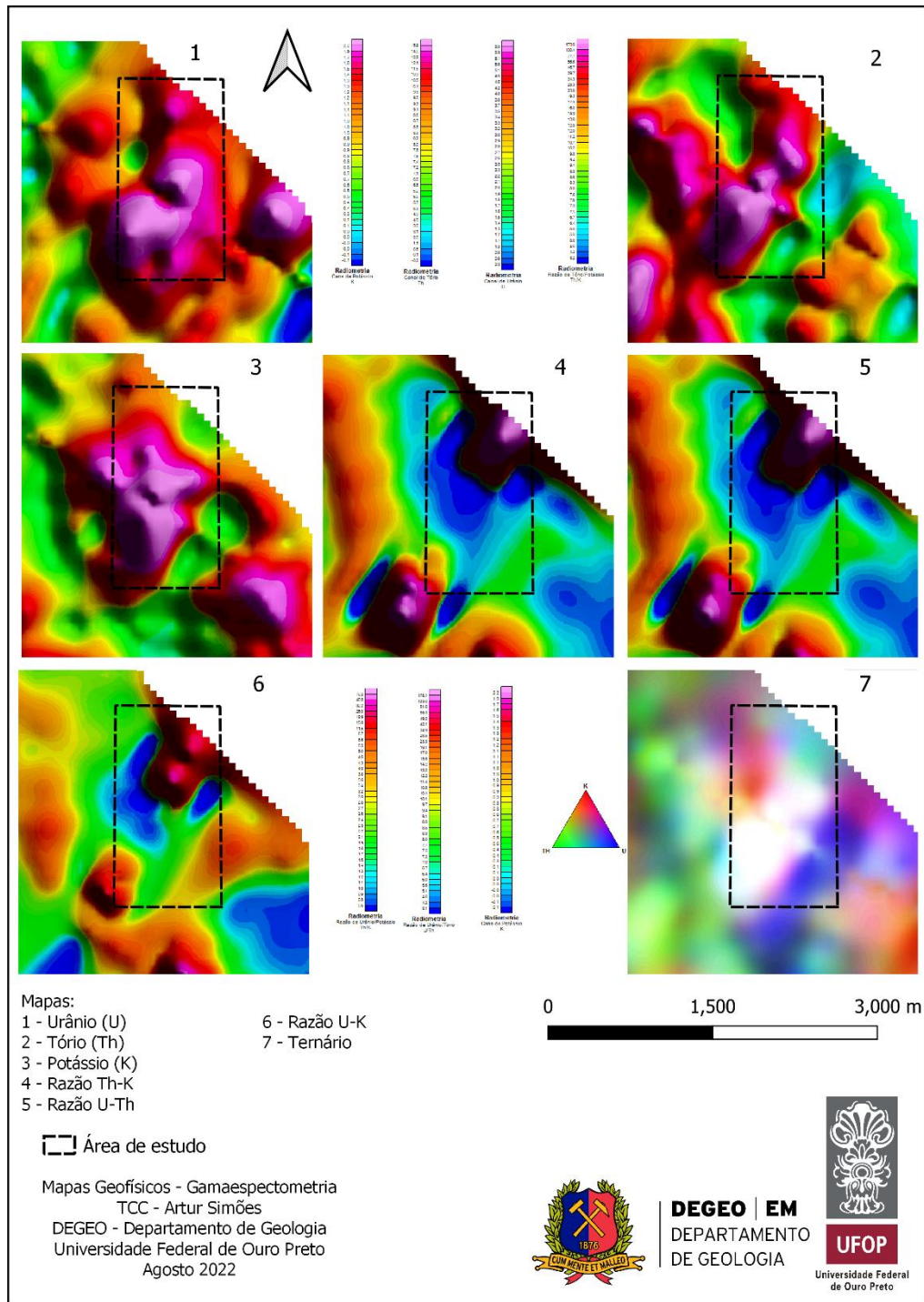


Figura 5-3 - Mapas radiométricos produzidos neste trabalho.

A partir do mapa ternário gerado, foram definidas as radiofácies da área de estudo conforme descrito na Tabela 5.2 e demonstrado na Figura 5-4.

Tabela 5.2 - Radiofácies definidas a partir do mapa radiométrico ternário

Radiofácies	Teor de Th	Teor de U	Teor de K
A	Alto	Alto	Alto
B	Baixo	Alto	Médio
C	Médio	Médio	Baixo
D	Baixo	Médio	Alto

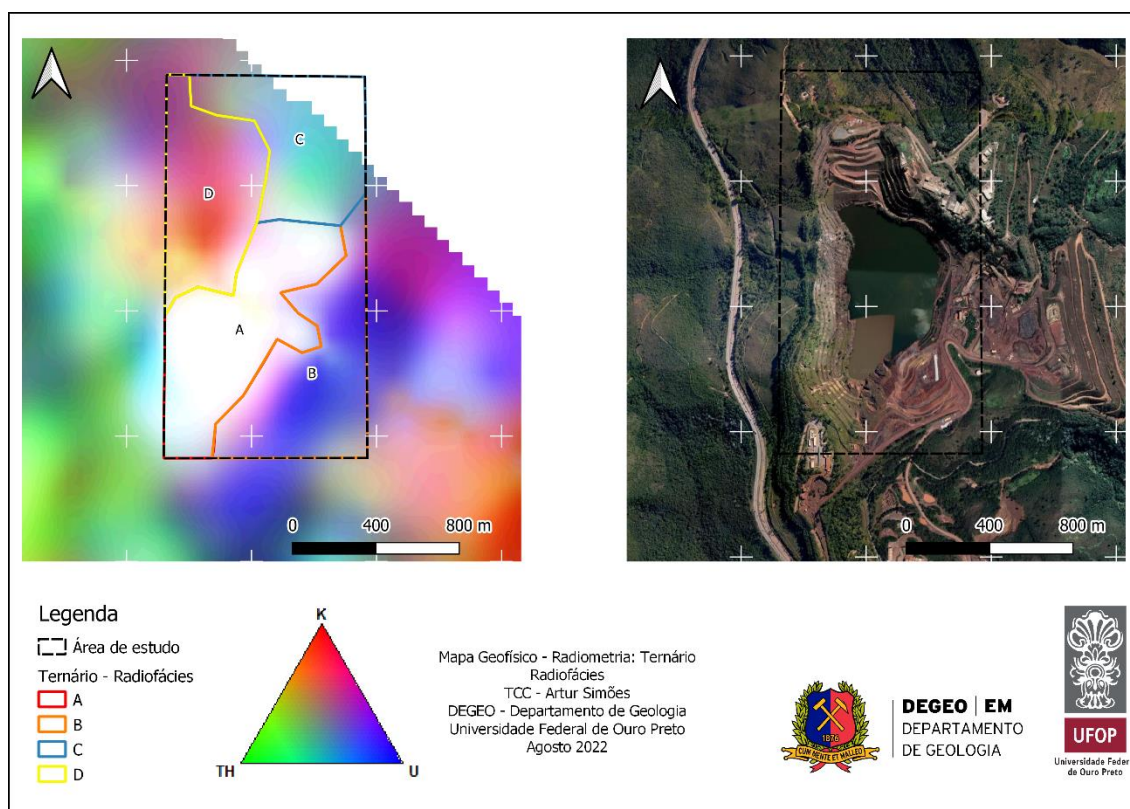


Figura 5-4 - Mapa ternário com definição de radiofácies para área de estudo.

No mapa ternário e, principalmente, em cada um dos três mapas de contagem total foram traçados os lineamentos geofísicos visto que em todos foram observados lineamentos em escala local e regional bem definidos. Este comportamento já era esperado uma vez que a região é composta predominantemente por litotipos metassedimentares. Foram traçados um total de 147 lineamentos compondo $1,23 \times 10^{17}$ m.

A direção média observada foi NW-SE, com valor de 153° (ou 333°) para os lineamentos traçados. A Figura 5-5 e Figura 5-6 apresentam os mapas com os lineamentos e o diagrama de roseta elaborado para os lineamentos citados respectivamente.

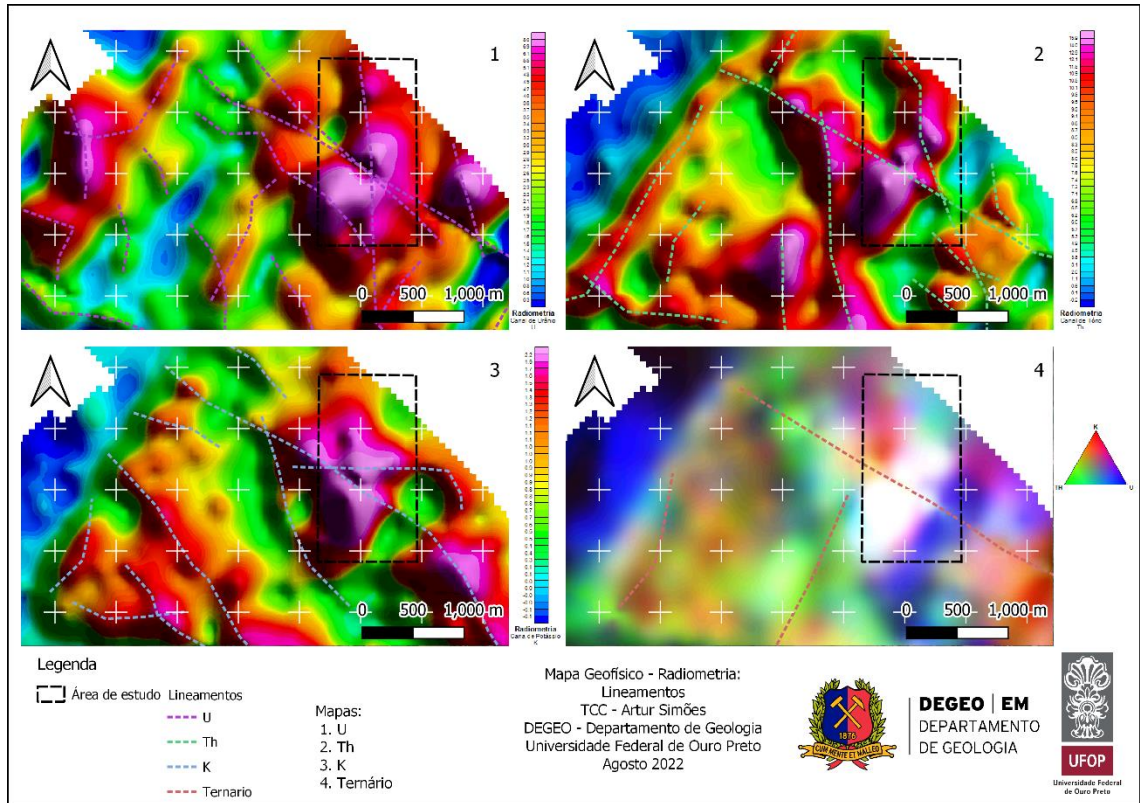


Figura 5-5 - Lineamentos geofísicos: mapas radiométricos.

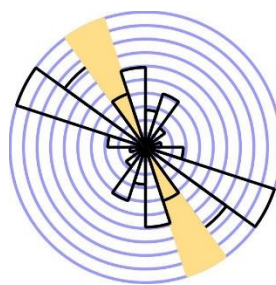


Figura 5-6 - Diagrama de roseta dos lineamentos traçados. Direção média observada: 153° – equivalente a 333°.

Por fim, ressalta-se que os mapas de concentração total de Th e U apresentaram contornos e concentrações anômalas semelhantes e parcialmente coincidentes com os contatos interpretados a partir dos dados de mapeamento. Dessa forma, entende-se que os resultados obtidos se apresentam como uma alternativa viável para uma melhor definição dos contatos, correções e melhorias na assertividade na assertividade das interpretações realizadas na etapa de mapeamento. A Figura 5-7 e Figura 5-8 apresentam os mapas de canal de U e Th respectivamente.

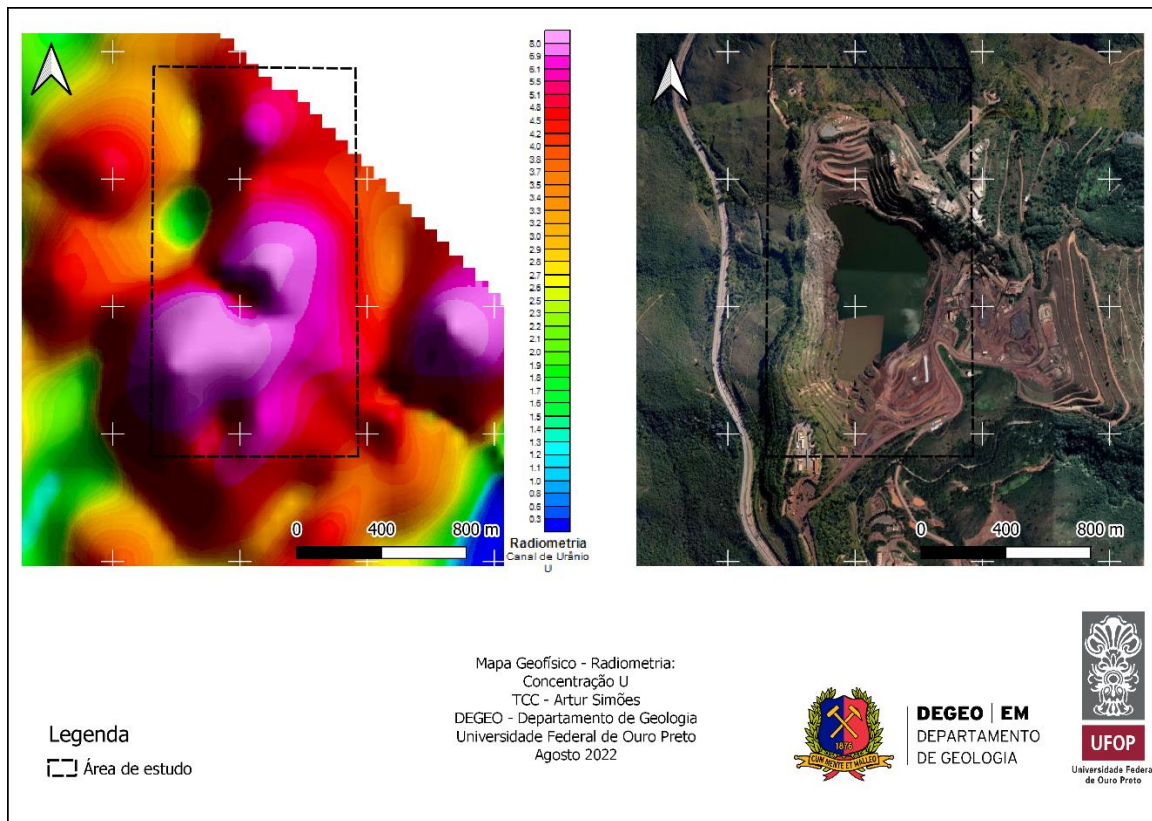


Figura 5-7 - Mapa radiométrico. Canal de U.

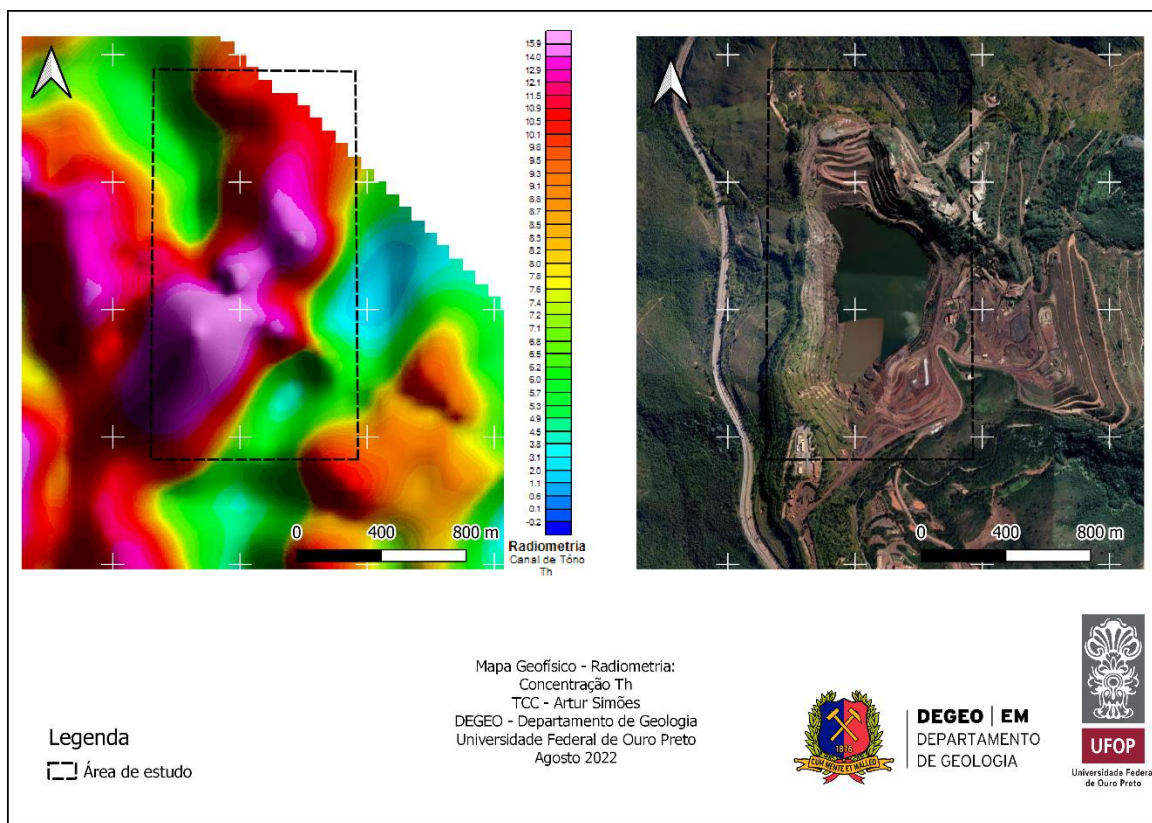


Figura 5-8 - Mapa radiométrico. Canal de Th.

5.5 ANÁLISE MORFOESTRUTURAL

A partir da imagem de satélite (*google Earth* datada em 27/06/2022) e do modelo digital de elevação (MDE) obtido a partir dos dados do satélite “Alos Palsar” datado em 2014, foram traçados os lineamentos morfoestruturais que compreendem feições lineares superficiais, compostos por cristas, vales, drenagens e outras feições lineares que compõem o relevo e a geomorfologia local. Nessa avaliação foram traçados 1115 lineamentos em um total de $1,04 \times 10^{17}$ m.

Os resultados obtidos indicam coerência com aqueles obtidos a partir da avaliação dos lineamentos traçados a partir dos mapas radiométricos. A direção média obtida foi SE-NW com valor de 117° (ou 297°), apresentando a mesma direção da avaliação realizada a partir dos dados radiométricos com uma diferença de 36° entre as médias realizadas. A Figura 5-9 e Figura 5-10 apresentam o mapa e o diagrama de roseta com os lineamentos traçados respectivamente.

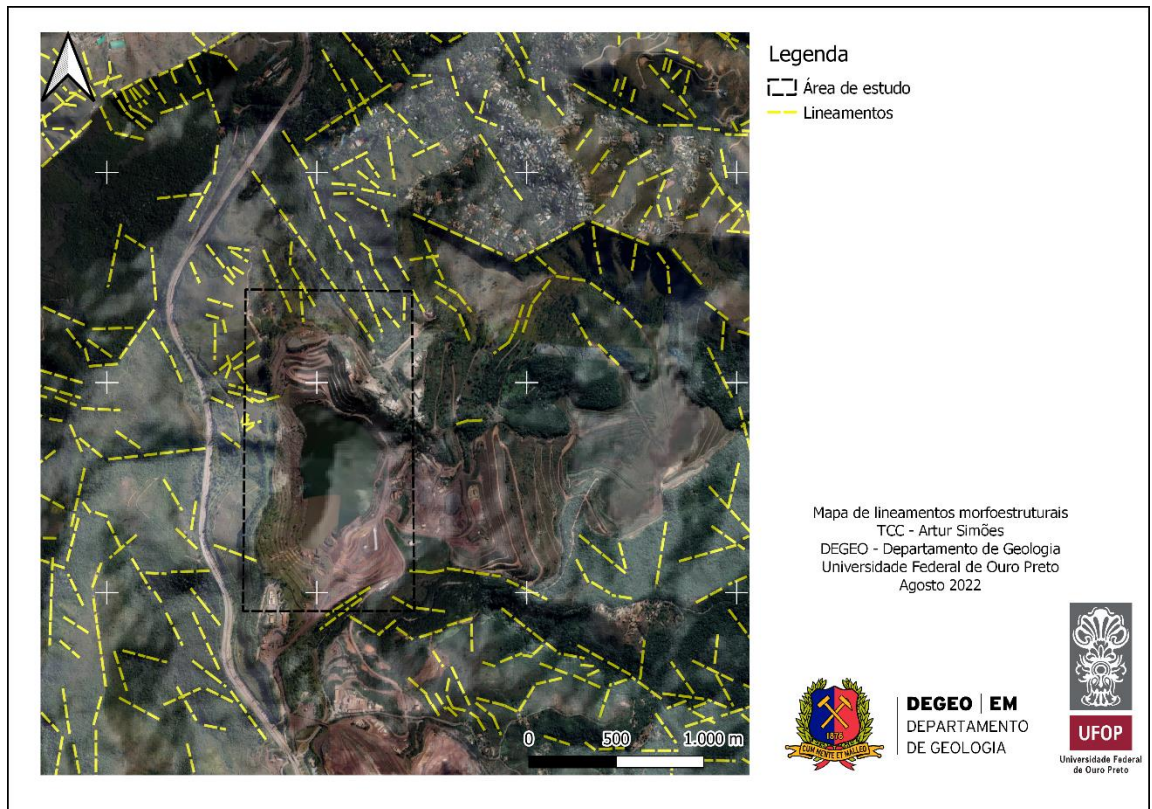


Figura 5-9 - Lineamentos morfoestruturais traçados a partir de MDE e imagem de satélite.

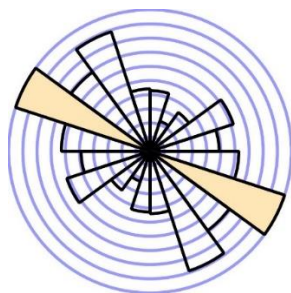


Figura 5-10 - Diagrama de roseta dos lineamentos morfoestruturais traçados. Direção média observada: 117° – equivalente a 297°.

5.6 INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA-GEOFÍSICA

Conforme descrito nos itens 5.3 e 5.4, o mapa ASA (Figura 5-2), em conjunto com as fácies radiométricas definidas (Figura 5-4) e os mapas com canais de Urânio e Tório (Figura 5-7 e Figura 5-8 respectivamente) apresentaram contatos e definição de anomalias coerentes com o esperado a partir do levantamento geológico-geomecânico de campo. Dessa forma, os resultados destes levantamentos foram agregados aos mapas anteriormente apresentados na Figura 4-36 - Mapa Geológico da área de estudo. De forma geral, onde havia conflito entre a interpretação geofísica e a de campo, foi mantida a interpretação de campo uma vez que apresenta resultados diretos. Além disso, ressalta-se que, por se tratar de uma cava, parte do material anteriormente disponível em superfície pode ter sido escavado. Dessa forma, a interpretação da geofísica foi aplicada como um complemento para um melhor entendimento da região buscando-se, também, entender possíveis relações entre os resultados da geofísica e as propriedades e classificações geomecânicas descritas e utilizadas.

Dessa forma, a anomalia magnética observada no mapa ASA foi interpretada como consequência da presença da formação cauê ao fundo da cava e sobre a região da pilha de estéril ao norte. Pela geometria das camadas que a circundam, é provável que a formação cauê se estenda até a região sul da cava (conforme apresentado pela literatura na geologia regional e local – item 3 -, diferente do apresentado. No entanto, a interpretação realizada neste trabalho se limitou ao observado a partir da resposta magnética e, por isso, a região sul da cava foi interpretada como uma continuidade da formação batatal – será melhor detalhado nos parágrafos a seguir. A Figura 5-11 apresenta a síntese dessa avaliação.

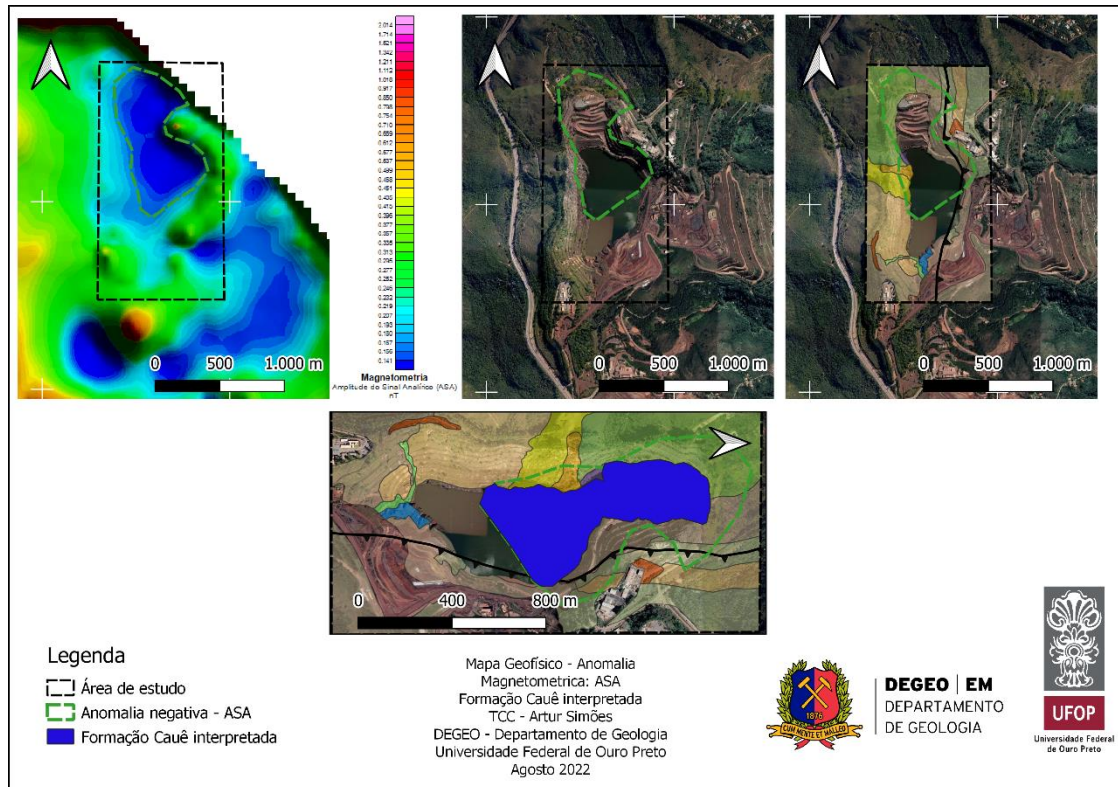


Figura 5-11 - Anomalia magnética: ASA. Formação Cauê interpretada.

Na sequência foram avaliadas as anomalias observadas nos mapas radiométricos de canais de U e Th. As anomalias observadas foram demarcadas e comparadas, de forma análogo ao feito com o ASA, para reinterpretação das camadas e litotipos metassedimentares aflorantes na região. A resposta radiométrica nas regiões mapeadas foram extrapoladas para aquelas cujo acesso havia sido comprometido na etapa de mapeamento, seja por questões de inacessibilidade dos taludes, por conta do lago na cava (região sul da estrutura) ou pela disposição de material antrópico na região (região suldeste, recoberta por uma pilha de estéril conforme anteriormente descrito e demonstrado na Figura 4-1).

Destaca-se que os contornos anômalos traçados se apresentaram coerentes com as direções das estruturas obtidas em campo. Isso é, os contornos se apresentam aproximadamente paralelos às medidas de Sn obtidas em campo que, por sua vez, apresentam-se subparalelas às poucas medidas de S_0 realizadas. Dessa forma, entende-se que a reinterpretação dos contatos realizada a partir dos mapas radiométricos se apresenta coerente com os dados estruturais obtidos em campo.

A reinterpretação da formação batatal foi realizada a partir da observação em conjunto das anomalias radiométricas observadas para os canais de Th e U. O contorno no canal de Th se apresentou melhor definido e bastante coerente à interpretação realizada a partir do mapeamento. No geral, foram apenas confirmadas a continuidade das camadas conforme geometria anteriormente definida. No entanto, na região a SE da cava, o material anteriormente interpretado como filito

sericítico foi reinterpretado como xisto devido aos resultados da geofísica. Apesar de terem sido realizados pontos nessa região, ressalta-se que existe uma estrutura antrópica (pilha de estéril mencionada) recobrando o material *in situ*. Dessa forma, a resposta geofísica dessa região – muito similar à da região NW da cava onde foi mapeado o xisto batatal – foi fator determinante para a reinterpretação. A Figura 5-12 e Figura 5-13 apresentam a síntese dessa avaliação.

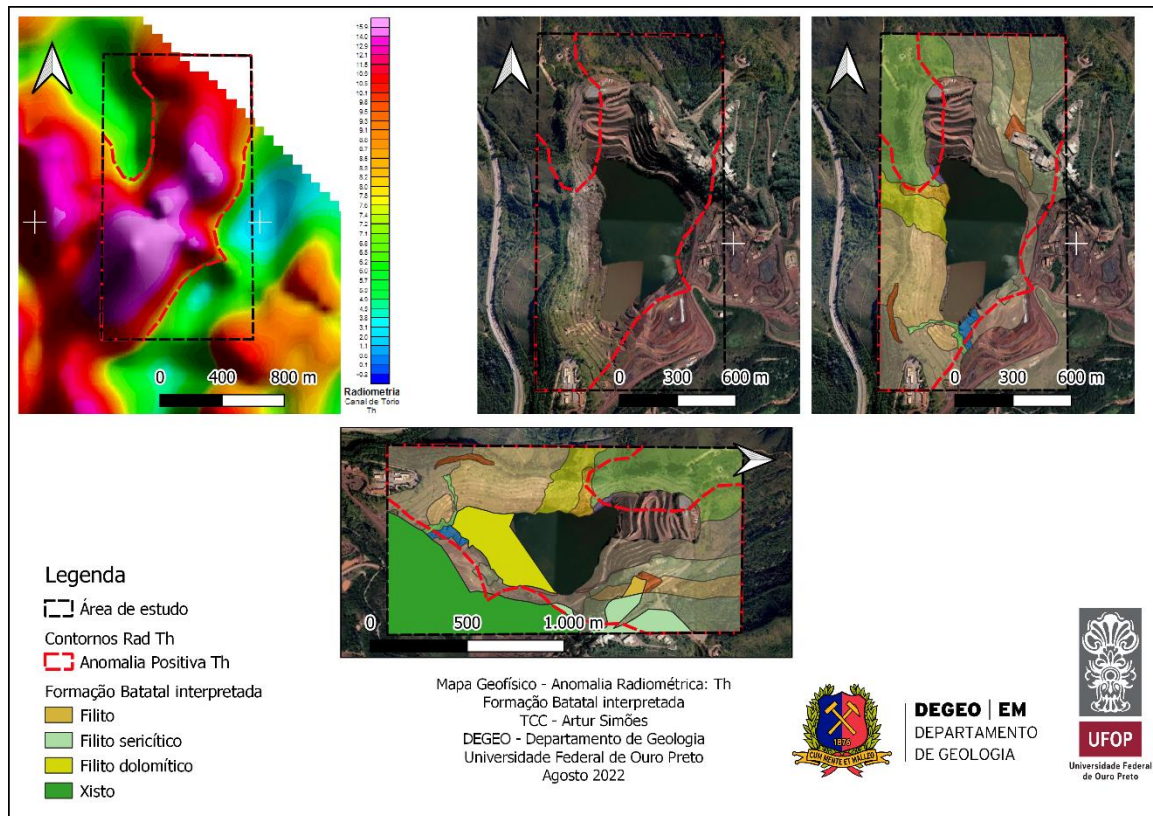


Figura 5-12 - Anomalia radiométrica: Canal de Th. Formação Batatal interpretada.

Este xisto é apresentado por parte dos autores mencionados no contexto geológico regional como pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas, diferente do apresentado neste trabalho. No entanto, o material observado na região sudeste da cava (entendido como equivalente ao da região noroeste) é apresentado pela literatura (Cavalcanti *et al.* 2020) como pertencente à formação Batatal, o que embasa a interpretação apresentada. Entende-se que este material deve ser melhor detalhado e estudado em trabalhos futuros, de forma a confirmar e delimitar com maior precisão seus contatos e posição estratigráfica no contexto das unidades do Quadrilátero Ferrífero.

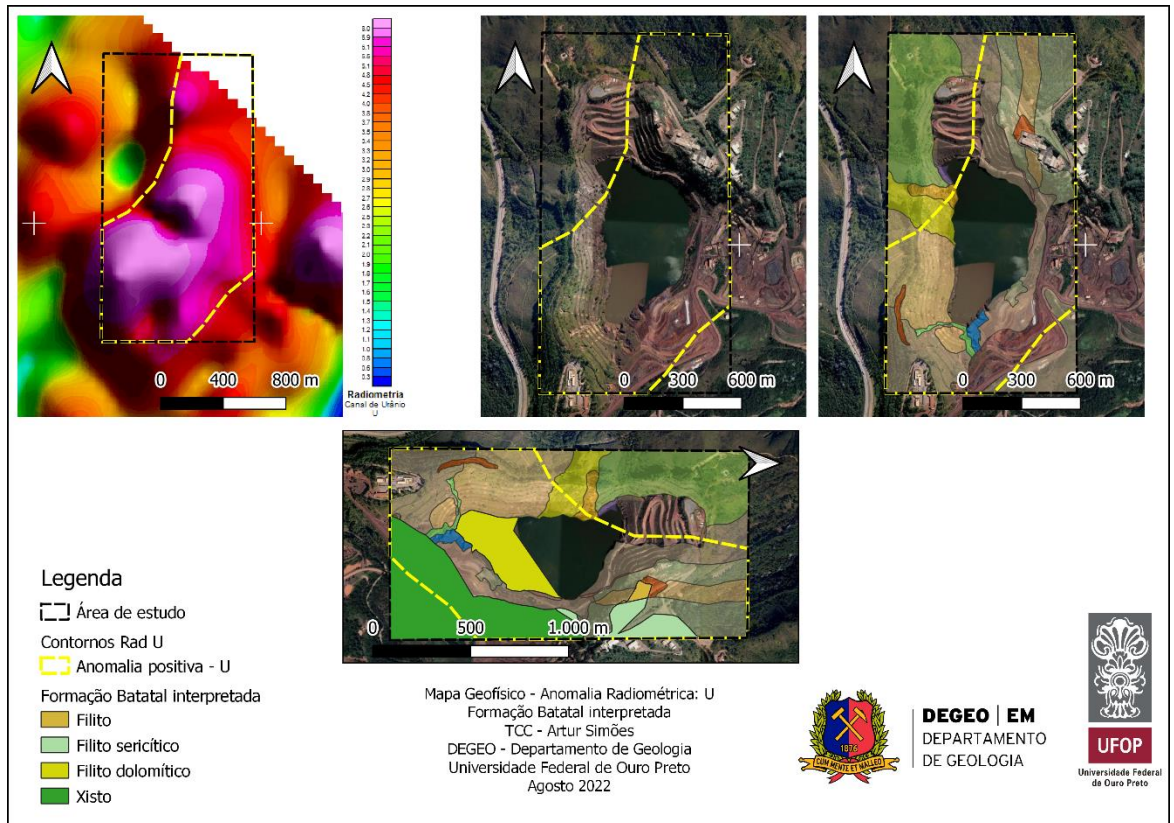


Figura 5-13 - Anomalia radiométrica: U. Formação Batatal interpretada.

A partir das reinterpretações realizadas, foi elaborado um novo mapa geológico. O afloramento lateral das formações cauê e batatal é explicado pela ocorrência de uma dobra sinforme, cujas camadas laterais são mais velhas que a central – caracterizando, dessa forma, um sinclinal. O eixo do sinclinal inferido encontra-se expresso no mapa na forma da linha pontilhada na direção aproximada SW-NE com duas inflexões na região central da cava. Essa interpretação se mostra coerente com o apresentado por Endo et al. (2019) e Cavalcanti et al. (2020) que posicionam as formações batatal e moeda (do Grupo Caraça e Supergrupo Minas) na região oeste da área de estudo.

A falta de continuidade da formação cauê do norte para o sul da cava foi interpretado como devido a ocorrência de uma falha de empurrão (inferida, uma vez que não foi observada em campo) que fez com que as unidades da formação batatal cavalgassem sobre a formação cauê.

De forma análoga, o quartzito observado no talude centro-W, interpretado como pertencente à formação Moeda, é também explicado como resultante de uma falha paralela à anterior que resultou no cavalgamento do quartzito moeda sobre o xisto batatal. As deformações envolvidas nesse processo seriam responsáveis pela milonitização observada no trecho mais a norte do quartzito.

Essa interpretação também se apresenta coerente com o descrito na literatura conforme Figura 3-5 de Alkmim & Marshak (1998). Por fim, ressalta-se que os lineamentos geofísicos observados nos

mapas radiométricos e morfoestruturais são, também, coerentes com as direções observadas no mapa. Isso é, no geral as estruturas lineares se apresentam próximo a direção N-S ou E-W, de forma que a média dos lineamentos se apresentou NW-SE em ambas as avaliações: geofísica e morfoestrutural. A Figura 5-14 apresenta o mapa geológico reinterpretado da área de estudo.

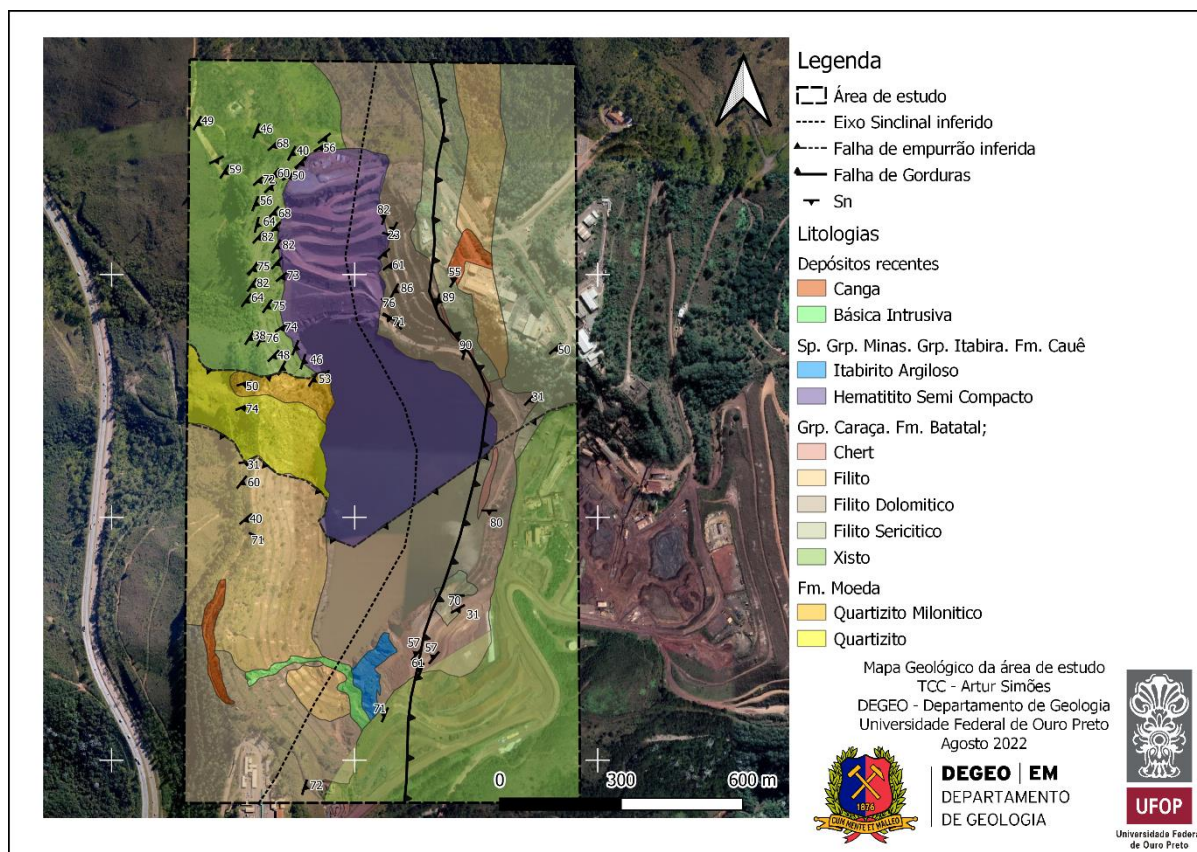


Figura 5-14 - Mapa Geológico final da área de estudo corrigido a partir da interpretação da aerogeofísica. Este mapa pode ser observado na escala correta no Apêndice A.

CAPÍTULO 6

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES DO TRABALHO

O mapeamento geológico-geomecânico foi de fundamental importância para o entendimento do contexto em que a cava está inserida, além de contribuir para a caracterização geomecânica dos maciços rochosos. Os trabalhos sofreram forte limitação devido à impossibilidade de acesso à grande parte dos taludes e bancos da cava. Neste levantamento a quantificação das áreas inacessíveis e com coberturas antrópicas representaram cerca de 40% (55% se considerada a área do lago) do total inicialmente estimado, fato que ressalta a importância e relevância da avaliação geofísica neste cenário – que auxiliou a contornar, de forma satisfatória, essa dificuldade.

Do ponto de vista estrutural, a foliação é a feição estrutural mais relevante nessa área, visto suas características de penetrabilidade e persistência, impondo forte condicionamento estrutural aos maciços mapeados. Na avaliação das estruturas regionais identificadas nos mapas elaborados por Pires (1979) e Alkmim & Marshak, (1998) foi possível notar duas grandes falhas em escala regional na área da cava: Falha de Gorduras e Falha de Mutuca. Somente a primeira pôde ser reconhecida em campo, enquanto a segunda foi inferida com base nos trabalhos citados. Acredita-se que investigações complementares, tais como sondagens rotativas, assim como levantamento geofísico local, possam ser executadas para melhor compreensão destas estruturas regionais e suas consequências no comportamento geomecânico em superfície e em profundidade.

A avaliação dos lineamentos geofísicos se mostrou coerente com os lineamentos morfoestruturais traçados a partir da imagem de satélite, demonstrando boa assertividade das avaliações geofísicas e o reflexo em superfície (geomorfologia das feições lineares) das condições estruturais dos maciços rochosos. Além disso, foram observados vários lineamentos com direção aproximada N-S, coerente com as estruturas regionais apresentadas na literatura. No entanto, nenhum dos lineamentos traçados coincidiu exatamente com a posição das falhas representadas pelos autores. Nos trechos em que foram identificadas feições superficiais associadas à Falha de Gorduras, notou-se claramente o desenvolvimento de um plano de fraqueza, com características mais intensas de alteração e erodibilidade, por onde desenvolvem-se naturalmente fluxos de drenagem superficial e consequentes ravinamentos que podem levar a cenários indesejados de instabilidade nos bancos e taludes.

O mapa geológico elaborado (apresentado na Figura 5-14 e no Apêndice A deste trabalho) apresenta uma síntese da distribuição em superfície dos materiais observados durante o mapeamento geológico-geomecânico. As unidades observadas foram associadas à estratigrafia do Quadrilátero

Ferrífero conforme discutido no item 3 - CONTEXTO GEOLÓGICO. A interpretação realizada neste trabalho, no entanto, difere-se da apresentada na literatura em dois principais pontos: a continuidade da formação Cauê para a região sul e a posição do xisto observado no trecho noroeste da área de estudo no contexto estratigráfico do quadrilátero ferrífero.

Com relação à formação Cauê, entende-se que seja mais provável a sua continuidade para sul conforme apresentado pela Geologia Regional. Este trabalho, no entanto, se limitou a interpretar diretamente os resultados da geofísica que levaram à essa interpretação da geometria da Formação Cauê, conforme discutido no item 5.6 (INTEGRAÇÃO GEOLÓGICA-GEOFÍSICA) anteriormente. De forma análoga, o xisto observado na região noroeste da cava, interpretado como equivalente ao da região suldeste a partir dos resultados da aeroradiometria, também pode ser pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas conforme apresentado pela literatura. Os resultados da geofísica, no entanto, associados à interpretação de Cavalcanti et al. (2020) – trabalho mais recente e com escala de maior detalhamento – favoreceram essa interpretação.

Com base na caracterização geomecânica realizada a partir do mapeamento geológico-geomecânico, foi possível classificar os maciços rochosos a partir do sistema de classificação RMR (Bieniawski, 2011), assim como nas classificações Weak Rock e GSI. Para o universo RMR, a classe III (maciço Regular) ocorre de maneira localizada na porção norte do talude Oeste, condicionada aos Xistos e Quartzitos e Quartzitos Miloníticos, enquanto a classe II (maciço Bom) está limitada à litologia do metachert a partir de um único afloramento. As classes Weak Rock predominam em toda a superfície da cava, sendo a principal categoria geomecânica observada, ocorrendo em todos os litotipos friáveis, de baixa coesão, com as faixas de resistência variando de extremamente branda a branda (Extremely Weak, Very Weak e Weak).

Para a classificação GSI, a maior parte dos dados coletados em campo se enquadra no intervalo Very Blocky + Fair, representado, sobretudo, pelo litotipo xisto, mas também abrangem quartzito, quartzito milonítico e hematítico; O intervalo GSI de maior abrangência na área da cava corresponde ao Seamy + Fair, que é composto basicamente pelo xisto. Os intervalos Very Blocky + Good e Intact/Massive + Good também aparecem em porções pontuais da cava, nos domínios estruturais W e NE respectivamente.

Os mapas geofísicos foram de grande valia para avaliação geológica-estrutural da cava. No entanto, em relação a avaliação das propriedades geomecânicas, a utilização de dados aeromagnetométricos e aeroradiométricos não apresentaram uma resposta satisfatória com a metodologia empregada neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim F. F. 2004. O que faz de um Cráton um Cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações Almeidianas ao delimitá-lo. In: Pinto C.P., Matesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito-Neves B.B. (eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p.17-35.
- Alkmim F. F. & Marshak S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**: 29-58.
- Almeida F. F. M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **7(4)**:349-364.
- Babinski M., Chemale Jr F., Schumus W. R. 1991. Geocronologia Pb/Pb em rochas carbonáticas do Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: *Congresso Brasileiro de Geoquímica*, 3. São Paulo: Anais. SBGq, 2, p.628-630.
- Baltazar O. F. & Zucchetti M. 2007. Lithofacies associations e structural evolution of the Archean Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, **32**: 471–499.
- Barbosa M. S. C. & Oliveira L. A. S. 2020. Geofísica do Quadrilátero Ferrífero. *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte, 3i Editora, p. 114-141.
- Barton N., Lien R., Lunde J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*. Springer-Verlag, p. 189-236.
- Bieniawski Z.T. 1989. *Engineering rock mass classification: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering*. New York, USA, p. 251.
- Bieniawski Z.T. 2011. Misconceptions in the applications of rock mass classifications and their corrections. In: *ADIF Seminar on Advanced Geotechnical Characterization for Tunnel Design*. Madrid, p. 1-32.
- Braga S. C. M. 2006. *Modelagem estrutural e geofísica da porção centro-norte do Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG*. MS Dissertation, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 113 p.
- Cavalcanti J. A. D., Ribeiro J. H., Tuller M. P., Signorelli N. 2020. Carta geológica e de recursos minerais da folha São Sebastião das Águas Claras (SF. 23-XA-III-1-NO): Quadrilátero Ferrífero. Belo Horizonte: CPRM. Carta geológica e de recursos minerais. Escala 1:25.000. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/20492>. Acessado em 02 de Fevereiro de 2022.

Simões, R. A. 2022, Análise geológica-geomecânica-geofísica em mina do quadrilátero ferrífero.

Cooper G. R. J. & Cowan D. R. 2008. Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics. *Geophysics*, **73**: H1-H4.

Dentith, M., Mudge, S. 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*. Cambridge University Press, 2014.

DO BRASIL, CPRM-Serviço Geológico. Mapa geológico do estado de Minas Gerais. 2003.

Dorr J. V. N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *U.S. Government Printing Office (USGS/ DNPM)*, **641(A)**:110.

Dorr J. V. N. *et al.* 1957. Revisão estratigráfica pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero. *In: Brasil, DNPM*. Rio de Janeiro, **81**:31.

Endo I., Oliveira A. H., Peres G. G., Guimarães M. L. V., Lagoeiro L. E., Machado R., Zavaglia G. Rosas C. F., Melo R. J. 2005. Nappe Curral: Uma megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização. *In: X Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos / IV International Symposium on Tectonics*. Curitiba, p.279-282.

Endo I., Galbiatti H. F., Delgado C. E. R., Oliveira M. M. F. de, Zapparoli A. C., Moura L. G. B de, Peres, G. G., Oliverira A. H. de, Zavaglia G., Dandever F. A., Gomes C. J. S., Carneiro M. A., Nalini JR. H. A., Castro P. T. A., Suíta M. T. F., Seixas L. A. R., Tazava E., Lana C. C., Martins-Neto M. A., Martins M. S., Ferreira F. F. A., Franco A. P., Almeida L. G., Rossi D. Q., Angeli G., Madeira T. J. A., Piassa L. R. A., Mariano D. F., Carlos D. U. 2019. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Ouro Preto, Departamento de Geologia, Escola de Minas – UFOP – Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero. Disponível em www.qfe2050.ufop.br. Acessado em 10 de maio de 2022.

Endo, I., Castro, P. T. A., Gandini, A. L. 2020. *Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos*. Belo Horizonte, Universidade Federal de Ouro Preto, 480p.

França A.V. de M. 2017. Citação de referências e documentos eletrônicos. Aerogeofísica no estado de Minas Gerais. Disponível em: <https://docplayer.com.br/47827175-Aerogeofisica-no-estado-de-minas-gerais-andrea-vaz-de-melo-franca-geologa-da-codemig.html>. Acessado em 5 set 2022.

Franca P., Costa T., Stacey P. 2018. *Soft Iron Ores and Other Leached Rocks. Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks*, CSIRO Publishing, Melbourne, Australia, 269-308.

Hatheway Allen W. 2009. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring; 1974–2006. *Environmental & Engineering Geoscience* **15**: 47-48.

Kearey P., Brooks M., Hill I. 2009. Geofísica de Exploração. Oficina de Textos, 438 p.

Lana C., Alkimim, F. F., Armstrong R., Scholz R., Romano R., Nalini H. A. 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero Province, southeast Brazil. *Precambrian Research*, **231**: 157-173.

Lowson A. R., Bieniawski Z. T. 2013. Critical assessment of RMR based tunnel design practices: a practical engineer's approach. In: *Proceedings of the SME, Rapid excavation and tunnelling conference, Washington, DC, USA*. p.23-26.

Luiz J. G., Silva L.M.C. 1995. *Geofísica de Prospecção*. Belém, Cejup, 311 p.

Machado M. C. 2022. *Desenvolvimento de aplicativo computacional para classificação de maciços rochosos pelo método Geological Strength Index-GSI*. Monografia, Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 41p.

Machado N., Noce C. M., Oliveira O. A. B., Ladeira E. A. 1989. Evolução geológica do Quadrilátero Ferrífero no Arqueano e Proterozoico Inferior, com base em geocronologia U-Pb. In: *Simpósio Geologia Minas Gerais e Simpósio Geologia Brasília*. Belo Horizonte, p.1-5.

Madeira M. R. 2018. *Evolução sedimentar e história deformacional da Formação Moeda ao longo da junção entre o Sinclinal da Moeda e o Homoclinal da Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, MG*. MS Dissertation, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 172p.

Marinos P., Hoek E. 2000. GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. In: *ISRM international symposium*. Melbourne, Australia.

Martin D., Stacey P. (Ed.). 2018. *Guidelines for open pit slope design in weak rocks*. CSIRO PUBLISHING, 383 p.

Miller H.G., Singh V. 1994. Potential field tilt—a new concept for location of potential field sources. *Journal of applied Geophysics*, **32**: 213-217.

Mussett A.E., Khan M. A. 2000. *Looking into the earth: an introduction to geological geophysics*. Cambridge University Press, 492 p.

Oliveira E. F. 2020. *Caracterização geofísica do lineamento Córrego do Sítio, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Monografia, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 97 p.

Palmstrom A. 2005. Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, **20**: 362-377.

Pires F. R. M. 1979. *Structural Geology and Stratigraphy at the Junction of the Curral Anticline and the Moeda Syncline, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. PhD Thesis. Michigan Technological University, Michigan, 220p.

Simões, R. A. 2022, Análise geológica-geomecânica-geofísica em mina do quadrilátero ferrífero.

Renger F. E., Noce C. M., Romano A. W., Machado N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, **2**:1-11.

Teixeira W., Sabaté P., Barbosa J., Noce C. M., Carneiro M. A. 2000. Archean and Paleoproterozoic evolution of the São Francisco Craton. *In: XXXI International Geological Congress*, Rio de Janeiro, Brazil, p. 101-137.

Thompson D. T. 1982. EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, **47**:31-37.

Wyllie D.C., Mah C. 2004. *Rock slope engineering*. Spon Press, New York, USA, 431p.

Zavaglia G. 1995. *Condicionantes geológicos do comportamento dos minérios de ferro do depósito de Tamanduá (MG) no processo metalúrgico de redução direta*. MS Dissertation, Departamento de Geologia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro preto, 184 p.

Apêndice A – Mapa Geológico da Área de estudo na escala proposta (1:10.000 em A4)

