



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO GEOMECÂNICO DA ANTIGA MINA SUBTERRÂNEA DE
OURO, MINA DU VELOSO, EM OURO PRETO - MG**

Rafael Magnabosco de Almeida Gomes

MONOGRAFIA nº 198

Ouro Preto, setembro de 2016

**ESTUDO GEOMECÂNICO DA ANTIGA MINA DE OURO
SUBTERRÂNEA, MINA DU VELOSO, EM OURO PRETO - MG**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitor

Marcone Jamilson Freitas Souza

Vice-Reitora

Célia Maria Fernandes Nunes

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação

Fábio Favarsi

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Issamu Endo

Vice-Diretor

José Geraldo Arantes de Azevedo Brito

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Antônio Luciano Gandini

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Nº 198

**ESTUDO GEOMECÂNICO DA ANTIGA MINA DE OURO SUBTERRÂNEA,
MINA DU VELOSO, EM OURO PRETO - MG**

Rafael Magnabosco de Almeida Gomes

Orientador

Frederico Garcia Sobreira

Monografia do Trabalho Final de Graduação apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial à obtenção do Título de Engenheiro Geólogo.

OURO PRETO

2016

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>

Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>

Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>

Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita

35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais

Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Os direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

CRÉDITOS DE AUTORIA

- 1- INTRODUÇÃO: Rafael Magnabosco de Almeida Gomes
- 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: Rafael Magnabosco de Almeida Gomes
- 3- METODOLOGIA: Rafael Magnabosco de Almeida Gomes
- 4- RESULTADOS: Rafael Magnabosco de Almeida Gomes
- 5- CONCLUSÕES: Rafael Magnabosco de Almeida Gomes

Revisão geral: Frederico Garcia Sobreira

Catalogação elaborada pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

<http://www.sisbin.ufop.br>

Ficha de Aprovação

(SERÁ ADICIONADA)

Agradecimentos

Agradeço a Sociedade Excursionista Espeleológica, em especial Dislalia, Tinganei, Criado Mudo e Flatulento, por me concederem material de apoio e colaborarem concomitantemente na realizações de estudos na área.

Ao Eduardo Evangelista Ferreira e todos os membros que trabalham na Mina Du Velos, por me darem a oportunidade e total apoio para que eu pudesse realizar esse estudo.

A Tatiana Noce, por me ajudar na realização dos testes de carga pontual e pelas dicas e material de estudo fornecidos para eu pudesse prosseguir com o trabalho.

Ao laboratório de preparação de amostras do DEGEO.

Ao laboratório de geotecnica do DEMIN, necessário para realizar os testes de carga pontual.

A República Casanova, Drama e amigos que me ajudaram e apoiaram nos momentos difíceis de tempo curto, me ajudando a combater o estresse.

Ao Frederico Garcia Sobreira pela oportunidade que me deu de realizar esse estudo e pela ajuda.

Sumário

AGRADECIMENTOS.....	xii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xv
RESUMO.....	xvii
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – APRESENTAÇÃO	1
1.2 – OBJETIVO.....	1
1.3 – JUSTIFICATIVAS	1
1.4 – LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO.....	2
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 – HISTÓRIA MINERÁRIA DE OURO PRETO	3
2.2 – GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL.....	6
2.2.1 – Quadrilátero Ferrífero	6
2.2.2 – Anticlinal de Mariana	6
2.2.3 – Estratigrafia.....	8
2.2.4 – Geologia Local.....	11
2.3 – ASPECTOS FISIOGRÁFICOS	14
2.3.1 – Geomorfologia	14
2.3.2 – Hidrografia e Clima	14
2.3.3 – Vegetação	15
2.3.4 – Pedologia	16
2.5 – SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO	20
2.5.1 – Rock Quality Designation (RQD)	20
2.5.2 – Rock Mass Rating (RMR)	21
2.5.3 – Rock Mass Quality (Q).....	23
3 – METODOLOGIA	27
3.1 – PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	27
3.2 – MONTAGEM DE BASES CARTOGRÁFICAS	27
3.3 – TRABALHOS DE CAMPO E LABORATÓRIO	27
3.4 – CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA	28
4 – RESULTADOS	31
4.1 – GEOLOGIA DA MINA	31
4.1.1 – Tipos de Rocha	31

4.1.2 – Geologia Estrutural	34
4.2 – SETORIZAÇÃO	39
4.3 – PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO MACIÇO	46
4.4 – CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA	48
4.5 – ANÁLISE DE RISCO E RECOMENDAÇÕES	50
5 – CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS.....	54
ANEXO I.....	57
ANEXO II.....	59
ANEXO III.....	61

Lista de Ilustrações

Figura 1.1: Localização e acesso da Mina Du Veloso.	2
Figura 2.1: Mapa com as principais áreas de mineração no flanco sul da Anticlinal de Mariana, região sudeste do Quadrilátero Ferrífero (Cavalcanti 1999).	5
Figura 2.2: Mapa simplificado da Anticlinal de Mariana com a localização das principais minas de ouro (compilado de Barbosa 1969 e Ladeira 1991 <i>in</i> Cavalcanti 2003).	7
Figura 2.3: Modelo evolutivo sugerido para o anticlinal.	8
Figura 2.4: Coluna estratigráfica referente ao mapa geológico da região de Ouro Preto.	9
Figura 2.5: Mapa topográfico da Mina Du Veloso sobreposto no mapa geológico de Ouro Preto (Compilado de Gomes 2012 e SEE).	12
Figura 2.6: Seção geológica na Serra de Ouro Preto entre Ouro Preto e Passagem de Mariana, cortando o bairro Taquaral (Fleisher e Routhier 1973 <i>in</i> Corgosinho 2012).	12
Figura 2.7: (A) Perfil esquemático mostrando as relações entre o nível de turmalinito, veios e encaixantes. (B) Seção transversal no salão principal da Mina Sciar.	13
Figura 2.8: Rede hidrográfica de Ouro Preto (Oliveira 2010).	15
Figura 2.9: Níveis de rugosidade de uma descontinuidade (ISRM 1981).	17
Figura 2.10: Sistema RMR de classificação de maciços rochosos Bieniawski (1989).	22
Figura 2.11: Efeito da orientação das descontinuidades (direção e mergulho) em cavidades.	23
Figura 2.12: Valores de J_n no sistema-Q.	24
Figura 2.13: Valores de J_r no sistema-Q.	24
Figura 2.14: Valores de J_a no sistema-Q.	25
Figura 2.15: Valores de J_w no sistema-Q.	25
Figura 2.16: Valores de SRF no sistema-Q.	26
Figura 2.17: Classificação do maciço no sistema-Q.	26
Figura 3.1: Sistema GTLS PLT-100 (Teste de Carga Pontual).	28
Figura 4.1: Amostra de "Itabirito Compacto" retirada da mina e serrada em laboratório.	32
Figura 4.2: Amostra de "Itabirito Xistoso" retirada da mina e serrada em laboratório.	32
Figura 4.3: Amostra de "Filito prateado" retirada da mina e serrada em laboratório.	33
Figura 4.4: Veios e camadas hidrotermais com diferentes mineralizações e texturas.	34
Figura 4.5: Medidas dos polos das foliações adquiridas em campo.	35
Figura 4.6: Diferentes tipos de veios na Mina Du Veloso.	36
Figura 4.7: Análise das atitudes dos planos de fraturas no estereograma (<i>OpenStereo 0.1.2</i>).	37
Figura 4.8: A) Falha 1 e percolação de água em rocha argilosa. B) Falha 2, brecha de falha. C) Falha 3, brecha de falha em zona de cisalhamento.	38

Figura 4.9: A) Dobra cerrada recumbente. B) Dobra em bainha. C) Lineação em itabirito. D) Fraturas preenchidas por material escuro amorfo.	39
Figura 4.10: Divisão dos setores da Mina Du Veloso.	40
Figura 4.11: Setor 1 da mina.	41
Figura 4.12: Setor 2 da mina.	42
Figura 4.13: Setor 3 da mina.	43
Figura 4.14: Setor 5 da mina.	44
Figura 4.15: Foto que exemplifica os veios e camadas argilosas do setor 5.	45
Figura 4.16: Sinais de deslocamento de lascas e gotejamento em fraturas ou falhas.	46
Figura 4.17: Perfil esquemático do setor 1.....	51

Lista de tabelas

Tabela 1: Graus de alteração (IPT 1984 <i>in</i> Serra e Ojima 1998).	17
Tabela 2: Graus de coerência (Guidicini <i>et al.</i> 1972 <i>in</i> Serra e Ojima 1998).	18
Tabela 3: Índice de carga pontual e resistência à compressão uniaxial estimados a partir de testes de campo com martelo do geólogo. (Modificado de ISRM 1981).	18
Tabela 4: Relação entre o índice RQD e a qualidade da rocha para a engenharia (Deere 1968 <i>in</i> Noce 2016).	20
Tabela 5: Parâmetros do sistema de classificação Q para cada setor da mina.	46
Tabela 6: Resultado dos ensaios de carga pontual nos quatros tipos de rocha da mina (Foram seguidas as normas apresentadas no capítulo 2.4).	47
Tabela 7: Parâmetros do sistema de classificação RMR para cada setor da mina.	48
Tabela 8: Resultado do sistema de classificação Q.	49
Tabela 9: Resultado do sistema de classificação RMR.	49

Resumo

O presente trabalho consistiu em um estudo geotécnico da galeria, antiga mina subterrânea de ouro, conhecida como Mina Du Veloso, localizada no bairro São Cristóvão de Ouro Preto, Minas Gerais. Hoje é utilizada apenas para fins turísticos e está sob o comando de Eduardo Evangelista Ferreira. Este tipo de estudo se torna cada vez mais importante em Ouro Preto e tem finalidade de tentar evitar possíveis acidentes já vistos anteriormente nessa região. A mina se localiza na Serra de Ouro Preto, região polideformada do Quadrilátero Ferrífero, no flanco sul da Anticlinal de Mariana. Foi aberta em rochas da Formação Cauê, Grupo Itabira, Supergrupo Minas, composta basicamente por itabiritos, mas também há filito, quartzito e veios de composição mineralógica variada. Este estudo foi feito através de campos *in situ*, analisando o comportamento estrutural, litologias, resistência e estado de alteração das rochas e presença de água. Também constou com o apoio do laboratório de geotecnia do DEMIN/UFOP, para realizar os testes de carga pontual em amostras obtidas em campo e serradas no DEGEO/UFOP, respeitando as normas da ISRM (2007). Assim conseguiu-se determinar os parâmetros geotécnicos dos sistemas de classificação RMR e Q. Na classificação geomecânica foi necessário dividir a mina em cinco setores, que proporcionou um resultado mais satisfatório, evitando equívocos e generalização. Com o resultado dos sistemas de classificação RMR e Q e análise visual de campo, foi possível estimar a qualidade do maciço em razoável a boa. Ao final foram gerados perfis esquemáticos representativos da estrutura e litologia, além de uma carta de risco de instabilidade que classifica áreas em baixo ou risco moderado.

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – APRESENTAÇÃO

A numerosa presença de antigas galerias de exploração de ouro torna Ouro Preto uma cidade com história minerária muito marcante e distinta. A galeria estudada é uma antiga mina de ouro subterrânea do século XVIII, localizada no bairro São Cristóvão, Ouro Preto, na Serra de Ouro Preto. Seu conduto principal possui em torno de 192 m, porém há aberturas ramificadas e algumas ainda não foram mapeadas, devido seu difícil acesso, podendo até se conectar com outras minas ou cavidades adjacentes. Hoje é explorada apenas para fins turísticos, no qual há visitas diárias, principalmente por estudantes do ensino fundamental ou ensino médio da região, assim como turistas visitantes de Ouro Preto. A mina funciona todos os dias de 08:00 às 18:00 e é administrada por Eduardo Evangelista Ferreira, que comanda uma equipe técnica capacitada de guias turísticos com devidos equipamentos de segurança, igualmente de uso obrigatório para os visitantes. Consta também, na mina, iluminação adequada nos corredores, assim como sistema de drenagem e escoramento nas regiões necessárias.

1.2 – OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é realizar um estudo geomecânico do maciço rochoso da galeria, antiga mina subterrânea de ouro do século XVIII, Mina Du Veloso, por meio da caracterização geotécnica e aplicação de sistemas de classificação geomecânica, a partir dos parâmetros RMR e Q. Posteriormente, será feita uma avaliação da estabilidade das galerias subterrâneas com a elaboração de mapa de risco de colapso do interior da mina, assim como determinar possíveis soluções e prevenções de acidentes.

1.3 – JUSTIFICATIVAS

O fato de Ouro Preto ser uma cidade histórica, situada em uma região serrana, com aspectos geológicos e fisiográficos característicos, além de ter um registro de diversas ocorrências de deslizamento de terra no passado, traz a necessidade da realização de estudos geotécnicos, inclusive estudos geomecânicos dessas galerias, antigas minas subterrâneas de ouro. Até o momento, não foi feito nenhum mapeamento geológico de detalhe nem caracterização geotécnica das galerias da região. Como a Mina Du Veloso se localiza em uma área urbana, que foi ocupada sem qualquer planejamento, além de, hoje, estar sendo utilizada para fins turísticos, torna-se essencial a realização de uma avaliação de estabilidade da mina,

assim como a elaboração de um mapa das possíveis áreas de risco de desabamentos ou colapsos para, posteriormente, criar soluções para os locais mais problemáticos.

1.4 – LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A Mina Du Veloso localiza-se na cidade de Ouro Preto, Minas Gerais, no bairro São Cristóvão, popularmente conhecido como Veloso.

A entrada da mina tem coordenadas UTM 654889 N, 7746224 E, zona 23K, *Datum SAD 69* com altitude de 1195 metros. O acesso principal, partindo do centro da cidade de Ouro Preto, é pela rua Padre Rolim, passando pela rodoviária da cidade, até o Bairro São Cristóvão (Figura 1.1). Vira-se à esquerda na rua Professor Brito Machado, novamente à esquerda pela rua Levindo Inácio André até o final da rua, na esquina, na rua Platina, nº 34. A mina fica dentro de uma casa amarela, planejada para atender os turistas.

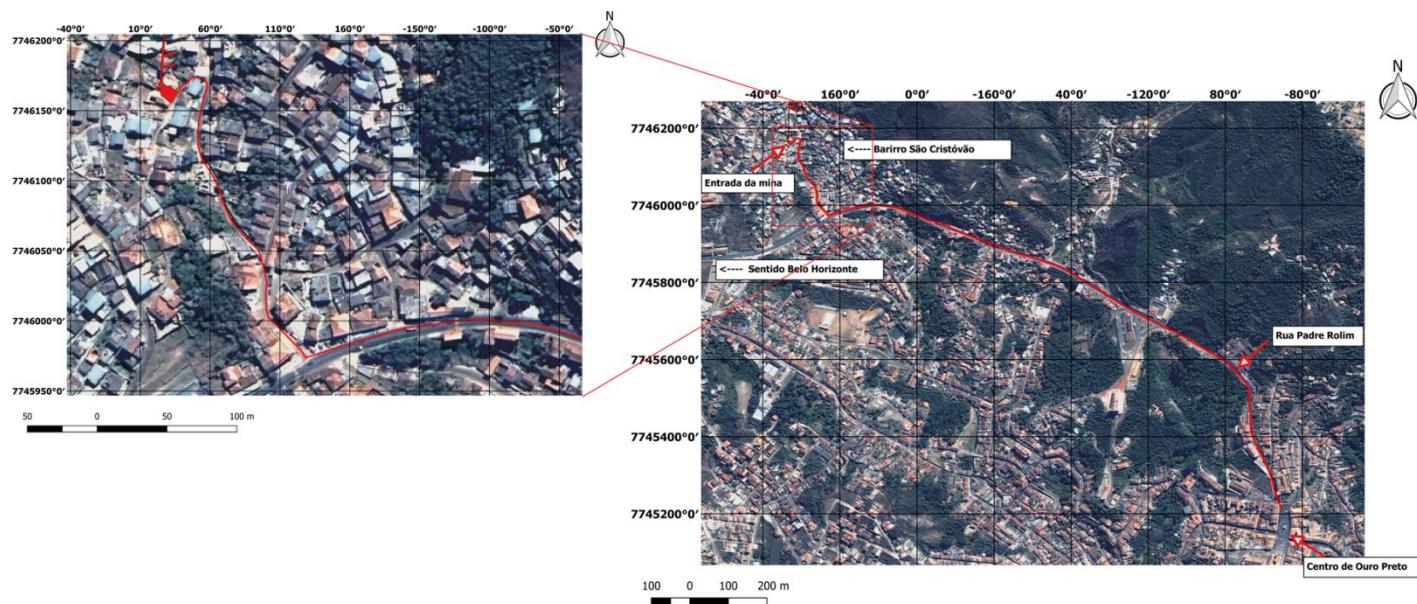


Figura 1.1: Localização e acesso da Mina Du Veloso.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – HISTÓRIA MINERÁRIA DE OURO PRETO

As descobertas de ouro na região do Quadrilátero Ferrífero foram posteriores às explorações no litoral e sul do país. Com as entradas paulistanas, cada vez mais frequentes e atentas aos cascalhos e areias dos ribeirões, experiência adquirida nas explorações anteriores, Ouro Preto foi descoberto por Manuel Garcia, seguido pelas descobertas de Antônio Dias e do Padre Faria, entre 1694 e 1698 (CPRM 2012).

Tais descobertas resultaram em uma intensa “corrida do ouro” em direção ao interior do país, que proporcionou um crescimento populacional e socioeconômico da região, principalmente de Minas Gerais. Durante mais de um século foram desenvolvidas atividades extrativistas no local onde hoje estão as cidades de Ouro Preto e Mariana (Sobreira *et al.* 2014).

Cavalcanti (2003) diz que, em 1995, o professor Hernani Motta Lima, com a ajuda da SEE (Sociedade Excursionista Espeleológica), constataram a existência de centenas de galerias, escavadas em busca do ouro, ao longo da Serra de Ouro Preto. Foram identificados nove sítios de mineração ao longo da serra, entre escavações superficiais e subterrâneas, partindo do Veloso até a Mina da Passagem. Estas áreas são conhecidas como: Lavra do Coronel Veloso, Lavras de Lages-Antonio Dias, Lavra do Morro da Queimada, Lavra Saragoça, Lavra de São João, Lavra Tassara e do Moreira, Lavra do Sumaré, Lavra do Taquaral, Lavra do Morro Redondo e da Passagem (Figura 2.1).

Os depósitos explorados que deixaram mais sinais na região foram as chamadas grupiaras, depósitos que ocorriam nos flancos das montanhas, e os veios auríferos. Nos primeiros era empregado o método que mais causou modificações na paisagem, o desmonte hidráulico. Já nos veios auríferos era necessária a abertura de minas para exploração subterrânea, por exemplo, a Mina Du Veloso (Sobreira *et al* 2014).

Ouro Preto e Mariana foram palco do “Ciclo do Ouro” no século XVIII até o início do século XIX e atualmente toda atividade de extração de ouro está paralisada. A região, posteriormente, tornou-se importante produtora de minério de ferro abrigando grandes empresas, tais como a Companhia Vale do Rio Doce, Samarco e Samitri. Já as minas de ouro permanecem paralisadas, sendo, atualmente, objetos de estudos realizados por empresas e universidades. Algumas minas também são utilizadas como atrativos turísticos (Cavalcanti 2003), no qual as mais conhecidas são as minas da Passagem e Chico Rei, mas também é o caso da Mina Du Veloso.

A partir meados Século XIX, a lavra aurífera, conhecida como “Veloso”, foi definitivamente abandonada, ficando assim preservados inúmeros renascentes desta atividade até a década de 1960, quando a criação do novo acesso à Ouro Preto cortou a área e fomentou a gradativa ocupação urbana não planejada e, consequentemente, predatória do local. Desta forma os resquícios da mineração aurífera foram sendo descaracterizados ou simplesmente destruídos por negligência e das autoridades competentes, na maioria dos casos, e pelo desconhecimento sobre tais estruturas por parte dos novos moradores que ali passaram a se estabelecer (Sobreira *et al.* 2014).

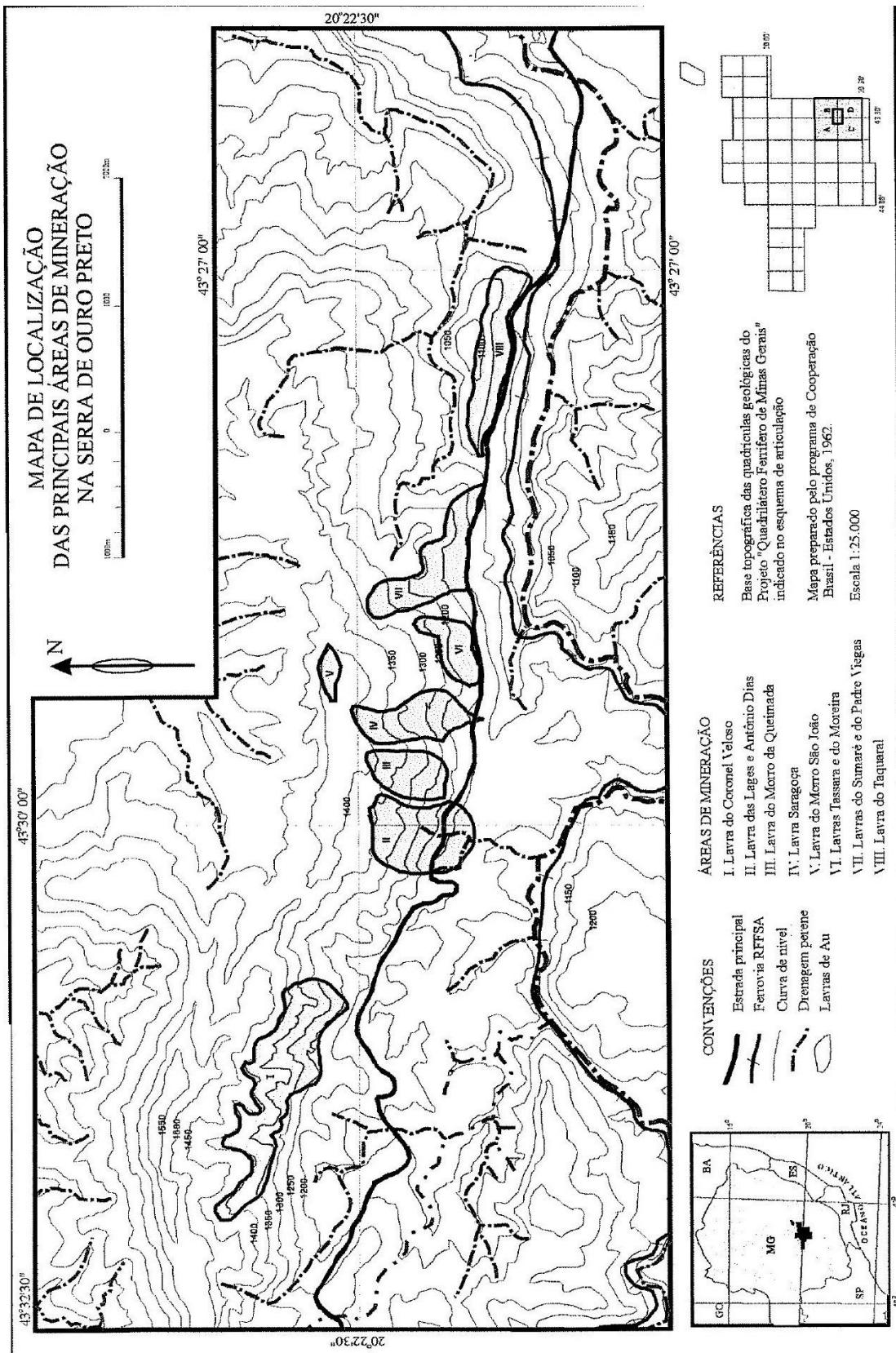


Figura 2.1: Mapa com as principais áreas de mineração no flanco sul da Anticlinal de Mariana, região sudeste do Quadrilátero Ferrfiero (Cavalcanti 1999).

2.2 – GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

2.2.1 – Quadrilátero Ferrífero

A Mina Du Veloso se encontra na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, que é uma importante província mineral de Fe, Au e Mn, em uma das grandes estruturas regionais, denominada de Anticlinal de Mariana. O Quadrilátero Ferrífero (QF) é uma região polideformada, afetada pelos eventos transamazônico e brasiliano e compreende quatro grandes unidades: os Complexos Metamórficos, arqueanos, o Supergrupo Rio das Velhas (SGRV), o Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi. Na região de Ouro Preto, ocorrem as três últimas unidades. O SGRV é representado pelo Grupo Nova Lima, com ampla distribuição a norte da Serra de Ouro Preto, já na bacia hidrográfica do Rio das Velhas. O Supergrupo Minas é representado na cidade pelos grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará, distribuídos ao longo de toda estrutura antiformal. O Grupo Itacolomi é presente no sul da área urbana de Ouro Preto, junto a Serra do Itacolomi (CPRM 2004 *in* Oliveira 2010).

2.2.2 – Anticlinal de Mariana

Dentre as estruturas maiores do QF, o Anticlinal de Mariana (Figura 2.2), situa-se na sua porção sudeste. Seu eixo possui atitude 125/15 no trecho entre São Bartolomeu e Passagem e 150/20 para além de Passagem no sentido SE. O seu flanco NE corresponde à Serra de Antonio Pereira e o sul é contíguo a outra grande estrutura da região, o Sinclinal de Dom Bosco, à Serra de Ouro Preto (Gomes 2012).

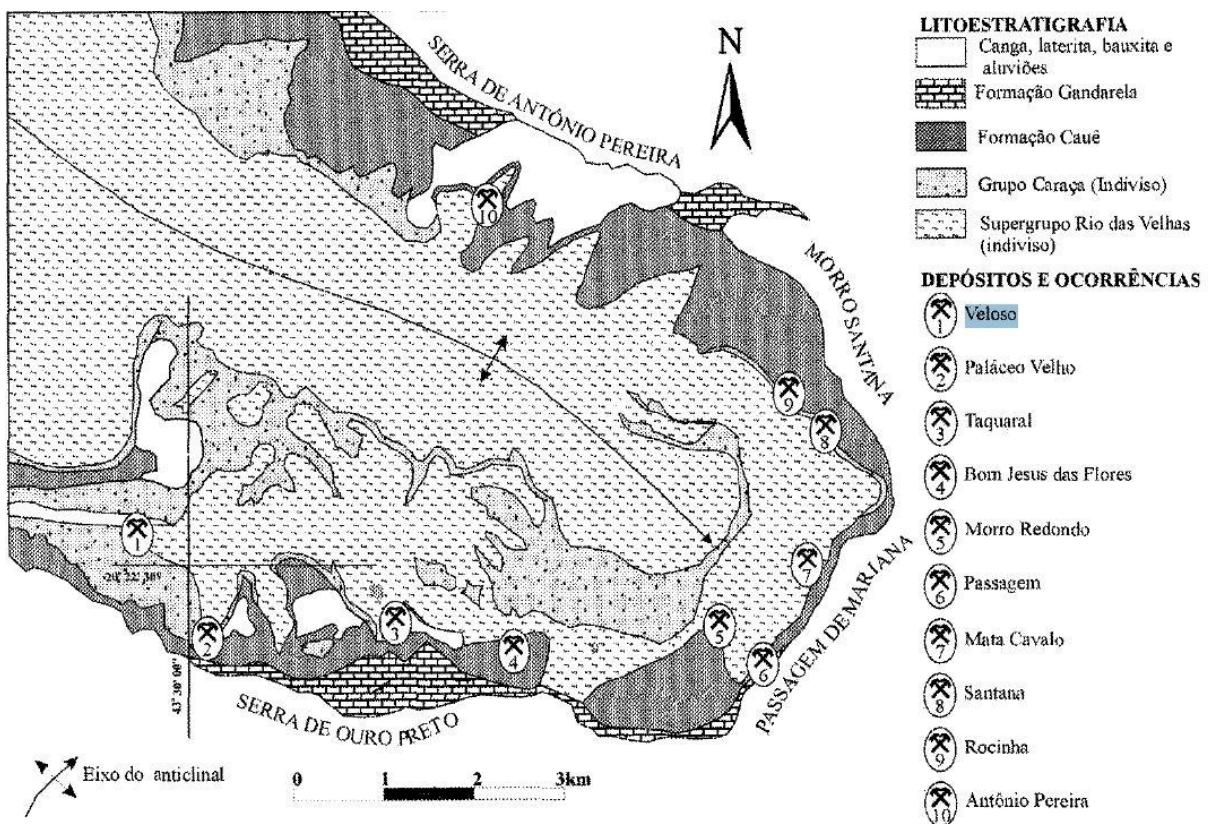


Figura 2.2: Mapa simplificado da Anticinal de Mariana com a localização das principais minas de ouro (compilado de Barbosa 1969 e Ladeira 1991 *in* Cavalcanti 2003).

Fleisher e Routhier (1973) *in* Corgosinho (2012), sugerem um modelo com duas fases de dobramentos dúcteis para o Anticinal de Mariana, sendo a primeira responsável por transporte tectônico de SW para NE e a segunda indica sentido de transporte de SE para NW.

Nalini (1993) *in* Corgosinho (2012) diz que existem dois eventos tectônicos subsequentes, um de natureza extensional e outro compressional. O evento extensional daria origem a dobramentos regionais como o Anticinal de Mariana e o Sinclinal Dom Bosco (Figura 2.3). O evento compressional é responsável pelo transporte tectônico de leste para oeste, representado por três fases deformacionais. A fase D1 caracteriza-se por dobramentos e cavalgamentos com geração de estruturas lineares, como lineamento mineral, e planares, que são as falhas de empurrao relacionadas às falhas Água Quente e do Fundão. A fase D2 teria sido responsável pela geração de clivagem espaçada E-W, lineação de interseção ou de crenulação, por dobras abertas com eixo E-W e por falhas direcionais aproximadamente E-W. Na fase D3 ocorrem clivagem de crenulação N-S, lineação de crenulação, dobras abertas ortorrômbicas ou monoclinicas vergentes para E. A atuação alternada de falhas de empurrao e do tipo *wrench* seriam os condicionantes principais do arcabouço estrutural da região. Isto teria ocorrido pela obstrução da extensão horizontal através da resistência friccional lateral a

blocos do embasamento, fazendo com que houvesse uma compensação do encurtamento lateral na vertical (Corgosinho 2012).

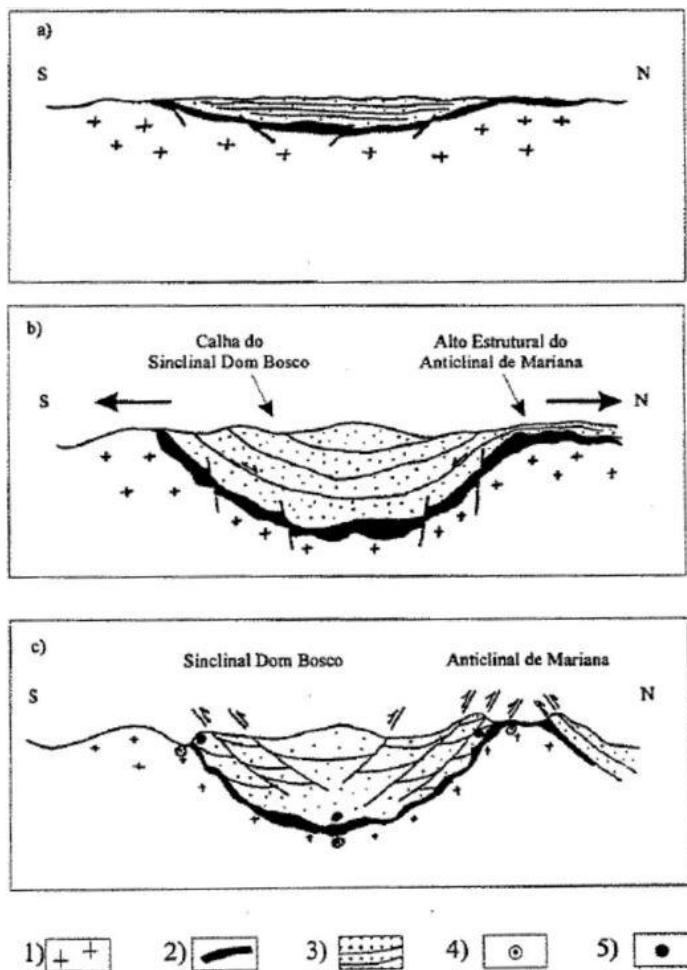


Figura 2.3: Modelo evolutivo sugerido para o anticinal. 1) embasamento, 2) Super Grupo Rio das Velhas, 3) Super Grupo Minas, 4) movimento relativo de oeste para leste e 5) movimento relativo de leste para oeste (Nalini 1993 *in* Corgosinho 2012).

2.2.3 – Estratigrafia

A coluna estratigráfica da região de Ouro Preto, inserida entre a Anticinal de Mariana e o Sinclinal Dom Bosco, pode ser observada na Figura 2.4.

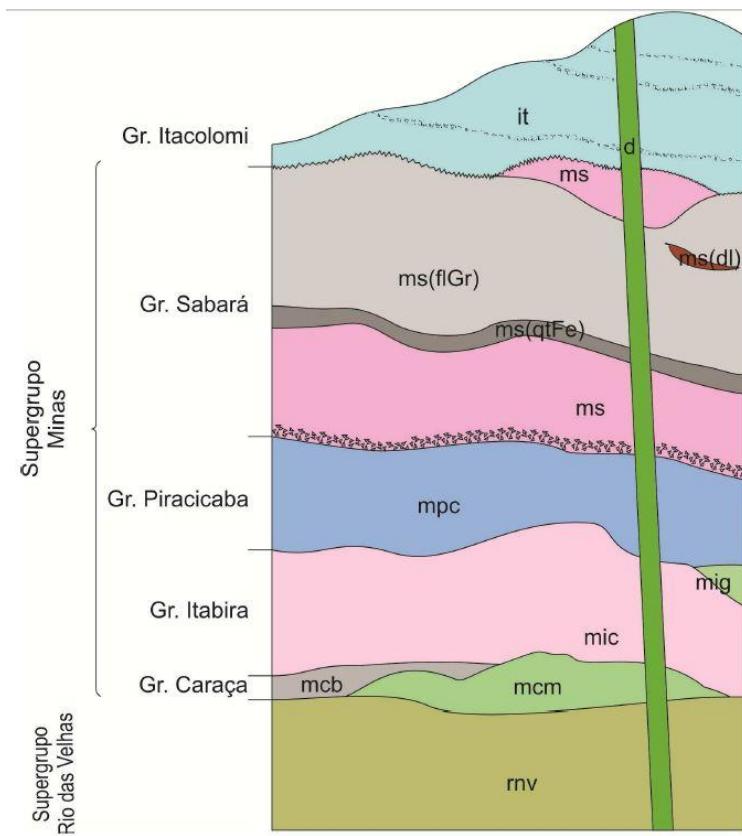


Figura 2.4: Coluna estratigráfica referente ao mapa geológico da região de Ouro Preto (Gomes 2012).

Supergrupo Rio das Velhas

Grupo Nova Lima

De acordo com Gomes (2012), representa a unidade mais antiga aflorante na área cartografada, sendo composta por clorita-filito, clorita-xisto, clorita-quartzo filito e quartzo-clorita-sericita-filito. De coloração avermelhada e esverdeada de acordo com o nível de alteração e de composição mineralógica.

Supergrupo Minas

Grupo Caraça

Formação Moeda

É constituída por quartzitos finos, coesos, às vezes alterados, de coloração clara, que em alguns pontos, possuem intercalações de filitos. Observam-se também níveis conglomeráticos com seixos de quartzo e quartzito, pouco espesso (Naline Jr. 1993 *in* Oliveira 2010). Limita-

se inferiormente com rochas do Grupo Nova Lima de forma discordante, no qual o Grupo Maquiné não está presente na área (Gomes 2012).

Formação Batatal

A Fm. Batatal é constituída de níveis decimétricos a métricos de filito cinza escuro e prateado. O mineral mais abundante é a sericita (muscovita), seguido de quartzo, zircão, rutilo e opacos. Algumas vezes pode-se identificar finas lentes quartzíticas intercaladas. O contato da Fm. Batatal com a Fm. Cauê é tectônico, ocorrendo grande quantidade de veios de quartzo mineralizado em ouro em toda a extensão do contato (Naline Jr. 1993 *in Oliveira* 2010).

Grupo Itabira

Formação Cauê

A Fm. Cauê é constituída de itabiritos com intensidade variável de intemperização, sendo que, em casos extremos ocorre a formação de crosta ferruginosa. A estrutura mais marcante nos itabiritos é a alternância de lâminas milimétricas a centimétricas de quartzo e óxidos de ferro (hematita, magnetita, martita, limonita, etc) (Naline Jr. 1993 *in Oliveira* 2010). Por vezes apresenta níveis delgados de filito e veios métricos de quartzo. As rochas apresentam-se sob diferentes graus de alteração, desde rochas frescas até afloramentos totalmente alterados e dobrados (Gomes 2012).

Formação Gandarela

O contato da Fm. Cauê com a Fm. Gandarela é gradacional. É constituída, predominantemente, por dolomitos e mármores dolomíticos de cor creme a cinza escuro, muitas vezes bandados e localmente intercalados com níveis de óxidos de ferro (Naline Jr. 1993 *in Oliveira* 2010).

Grupo Piracicaba

O Grupo Piracicaba é representado por quatro formações: Fm. Cercadinho, Fm. Fecho do Funil, Fm. Taboões e Fm. Barreiro. A Fm. Cercadinho, unidade basal, é caracterizada pela presença de quartzito ferruginoso de cor cinza esbranquiçado intercalado com níveis de filito prateado hematítico. A Fm. Fecho do Funil, unidade que está acima da Fm. Cercadinho, é identificada por filitos, filitos dolomíticos e clorita xistos em contato gradacional (Naline Jr. 1993 *in Oliveira* 2010). Seu contato superior se faz com rochas do Grupo Sabará, de forma

também discordante devido a ausência de rochas das formações sobrejacentes, pertencentes ao Grupo Piracicaba (Gomes 2012).

Grupo Sabará

As rochas do Grupo Sabará constituem-se de xistos granatíferos amarelos a castanhos avermelhado tendo como minerais mais comuns: quartzo, clorita, muscovita, biotita e granada. Lentes quartzíticas e grauvacas também são identificadas. O contato com o Grupo Itacolomi é tectônico (Oliveira 2010). Na porção basal, apresenta metadiamictitos e fragmentos de granitoides alterados. Em determinadas áreas, o Grupo Sabará encontra-se recoberto por uma capa laterítica (Gomes 2012).

Grupo Itacolomi

Junto a Serra do Itacolomi, é caracterizado por quartzitos e metaconglomerados. Pode apresentar estratificação cruzada tabular e acanalada de pequeno e médio porte (Oliveira 2010).

Formações Superficiais

São representadas pelas cangas e ocorrem principalmente sobre itabiritos, mas também sobre quartzitos. Formada por uma crosta ferruginosa estruturada sobre os itabiritos e com textura fragmentária sobre os quartzitos (Oliveira 2010).

2.2.4 – Geologia Local

Na Figura 2.5 pode ser observado o mapa geológico da região de Ouro Preto, inserida entre a Anticlinal de Mariana e o Sinclinal Dom Bosco.

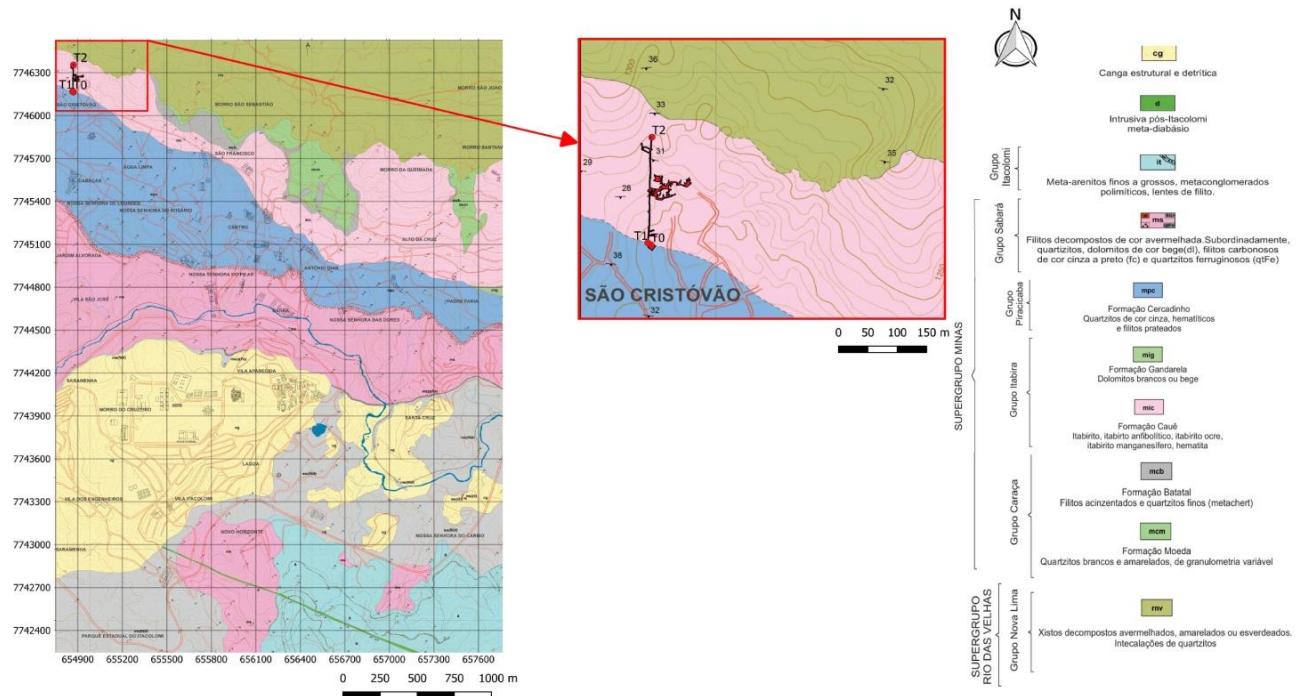


Figura 2.5: Mapa topográfico da Mina Du Veloso sobreposto no mapa geológico de Ouro Preto (Compilado de Gomes 2012 e SEE).

A galeria da mina foi aberta em forma de arco em rochas da Formação Cauê, composta, principalmente, por itabiritos. Encontra-se na Serra de Ouro Preto, flanco sul da Anticinal de Mariana. Na Figura 2.6 pode ser observada uma seção geológica feita na Serra de Ouro Preto.

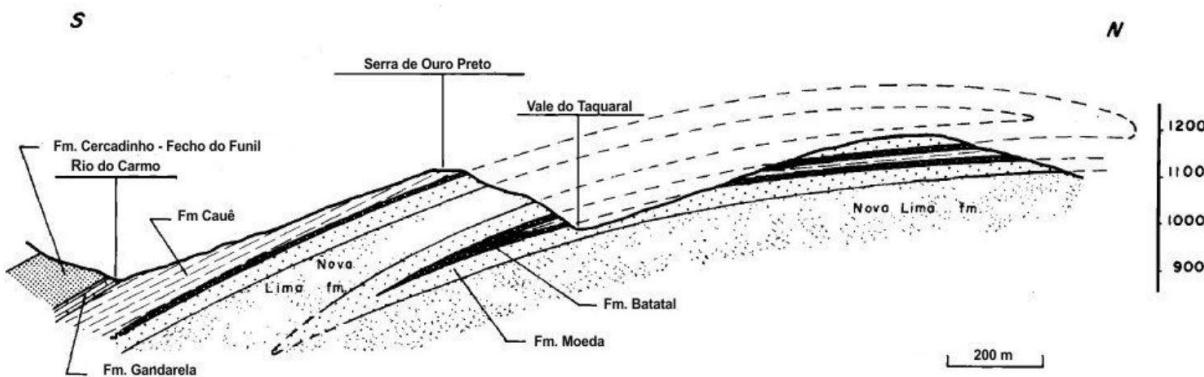


Figura 2.6: Seção geológica na Serra de Ouro Preto entre Ouro Preto e Passagem de Mariana, cortando o bairro Taquaral (Fleisher e Routhier 1973 *in* Corgosinho 2012).

Sabe-se que a região onde a mina está inserida sofreu vários esforços tectônicos, derivados desde eventos transamazônicos até brasilianos (Nalini 1993). Isso resultou em um complexo padrão estrutural, com diversos tipos de dobramentos, fraturamentos e lineamentos. Na Serra de Ouro Preto, ocorrem também veios paralelos à foliação principal (S_1); veios verticais N-S associados à boudinage da foliação principal, formados por quartzo, mica,

cianita e turmalina; e também veios de quartzo-turmalina-sulfeto, subverticais E-W (Cavalcanti 2003).

Os principais níveis mineralizados descritos na Serra de Ouro Preto ocorrem distribuídos por mais de 7 km de extensão, de forma descontínua, com trabalhos desenvolvidos em mais de 350 galerias, com extensão variando de 50 a 500 metros e também lavras a céu aberto com mais de 80.000 m² (Lacourt 1937a, b *in* Cavalcanti 2003).

No estudo de Cavalcanti (2003), a região minerária mais próxima da Lavra do Coronel Veloso é Lages-Antonio Dias, na qual a mineralização hospeda-se na sequência de rochas dos grupos Caraça e Itabira e é formada por veios de quartzo-turmalina-sulfeto e turmalinito. A mina conhecida como Sciliar (Figura 2.7) é a que mais se assemelha com o padrão de mineralização da Mina Du Veloso. Cavalcanti (1999) diz que a mina Sciliar tem seu desenvolvimento principal no nível estratigráfico da Formação Cauê e uma das peculiaridades desta mina é que a formação ferrífera pode ser individualizada em três unidades: carbonática, pirrotítica e itabirítica. A mineralização aurífera da mina Sciliar está associada a veios de quartzo-turmalina-sulfeto, turmalinito e Formação ferrífera bandada pirrotítica, sendo o corpo de minério principal um nível de turmalinito estratiforme. Por se encontrarem muito próximos a superfície, onde o intemperismo atuou severamente, os sulfetos foram praticamente destruídos, restando apenas vazios com a forma losangular, típica da arsenopirita (stockwork) (Cavalcanti 2003).

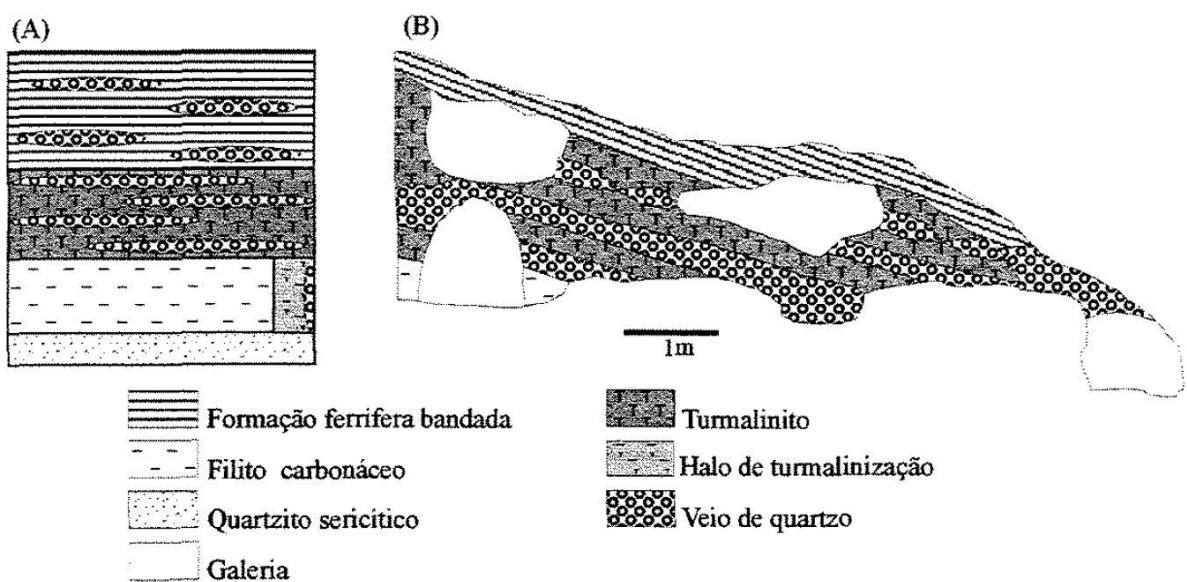


Figura 2.7: (A) Perfil esquemático mostrando as relações entre o nível de turmalinito, veios e encaixantes. (B) Seção transversal no salão principal da Mina Sciliar mostrando o padrão fitado do turmalinito estratiforme devido à colocação de veios de quartzo paralelos (Cavalcanti 2003).

2.3 – ASPECTOS FISIOGRÁFICOS

Os aspectos fisiográficos do Quadrilátero Ferrífero são de extrema importância para entender todo o desenvolvimento das feições geomorfológicas e a pedogênese do local. Através da análise da hidrogeologia, clima e vegetação é possível, também, interpretar processos geológicos, identificar áreas com potencial econômico para exploração mineral e abastecimento de água, além de entender como o clima e vegetação influenciam na paisagem.

2.3.1 – Geomorfologia

O Quadrilátero Ferrífero é uma típica província de terrenos do tipo domos e quilhas no qual o desenvolvimento fisiográfico do Quadrilátero Ferrífero está condicionado não só pela litologia e estrutura de suas rochas, mas também por uma história complexa de elevação epirogenética. É marcado por picos altos e robustos, longas cadeias de montanhas tipo hogbacks, altos planaltos, alguns profundos cânions e vales abertos. O Anticinal de Mariana, uma das estruturas que compõe o Quadrilátero Ferrífero, constitui a terminação do Arqueamento Rio das Velhas (Gair 1962 *in* Cavalcanti 2003) e sua conformação geométrica é materializada pela Serra de Ouro Preto, aba sul, e pela Serra de Antônio Pereira, aba nordeste.

Observadores desde Harder e Chamberlin (1915) têm comentado sobre os vários níveis distintos de erosão preservados na região. Para eles o relevo da região é fruto de sua estrutura e da erosão diferencial, onde os quartzitos e itabiritos constituem o substrato das terras altas, os xistos e filitos compreendem o substrato das terras de altitude mediana e as terras baixas estão moldadas sobre granito-gnaisses. Espacialmente, as terras altas constituem um conjunto de cristas e superfícies erosivas soerguidas que possuem uma forma grosseiramente quadrangular (Quadrilátero Ferrífero), formando o entorno das terras baixas, por onde corre o Rio das Velhas, nível de base da região central do Quadrilátero Ferrífero.

2.3.2 – Hidrografia e Clima

A serra de Ouro Preto é o divisor de águas de duas grandes bacias hidrográficas brasileiras: a do rio São Francisco e a do rio Doce. O Ribeirão do Carmo, também chamado de Ribeirão do Funil (Figura 2.8), um dos afluentes do Doce, tem um padrão de drenagem, predominantemente, dentrítico e é a principal bacia hidrográfica onde se insere a cidade de Ouro Preto, possui 134 km de extensão e uma área de 2.279 km², que equivale a 2,73% da bacia do rio Doce (Tavares 2006 *in* Oliveira 2010).

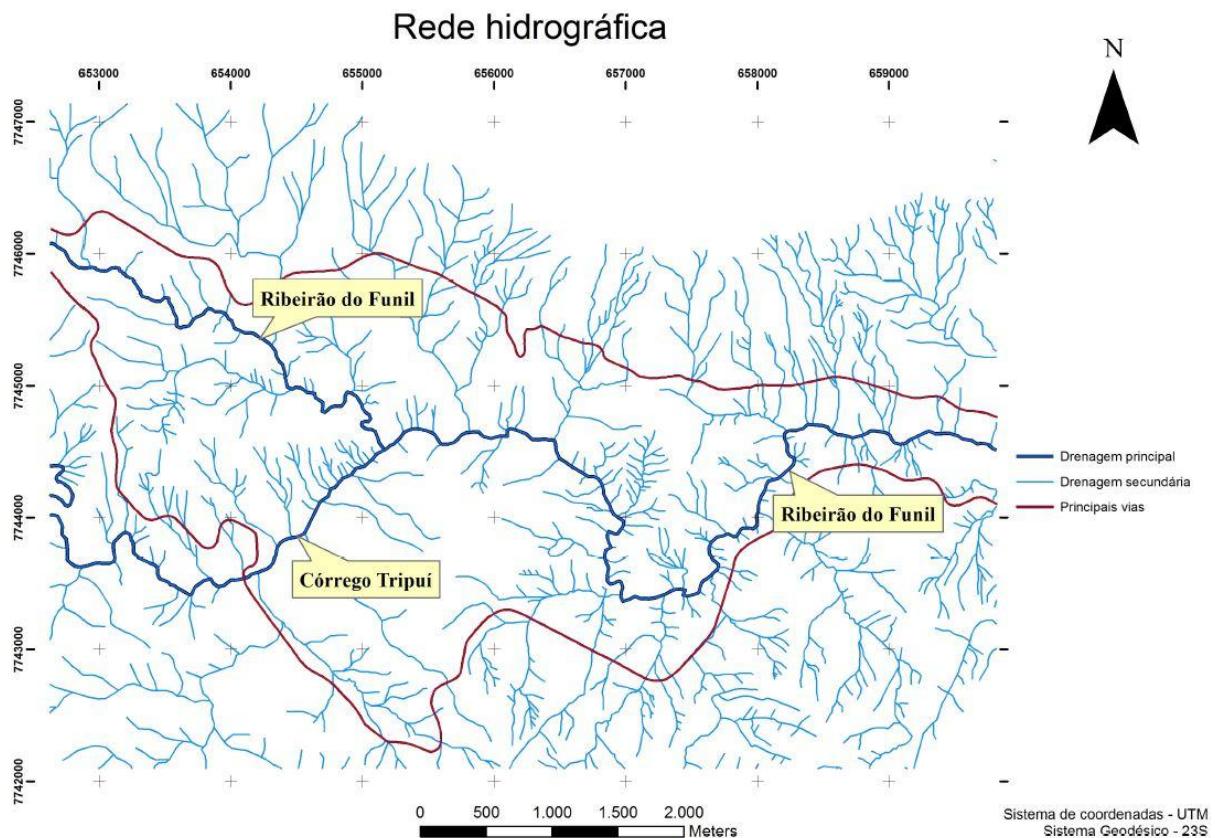


Figura 2.8: Rede hidrográfica de Ouro Preto (Oliveira 2010).

O clima de Ouro Preto possui características básicas de clima tropical de montanha, em que a baixa latitude é compensada pela altitude e conformação orográfica regional. Os verões são suaves e os invernos são brandos com baixas temperaturas e elevada umidade atmosférica. Segundo a classificação estabelecida por Köeppen o clima de Ouro Preto, corresponde ao tipo Cwb, clima úmido (mesotérmico), com inverno seco e verão chuvoso.

A média anual da temperatura em Ouro Preto é de 18,5°C, sendo o mês de janeiro o mais quente e o mês de julho o mais frio. As temperaturas mais elevadas coincidem com o período chuvoso enquanto as temperaturas mais baixas ocorrem no período seco. A região possui alta pluviosidade, concentrada principalmente entre os meses de outubro e março (Castro 2006 *in* Oliveira 2010).

2.3.3 – Vegetação

Na região podem ser observados os seguintes tipos de cobertura vegetal: Floresta Estacional Semidecidual Submontana, que incluem as áreas como a mata de Candeias, Savana Gramíneo Lenhosa (campo cerrado) e o refúgio Ecológico Altimontano (Campo rupestre) ambas podendo ser consideradas formações abertas. Em posição mais elevada, a

vegetação é de campos naturais, compostas essencialmente de gramíneas, com subarbustos disseminados (IGA 1995b).

2.3.4 – Pedologia

Há um grande domínio de solos pouco evoluídos (Cambissolos e Neossolos Litólicos) e algumas áreas com expressiva ocorrência de afloramentos rochosos. Desse modo, é forte a influência do material de origem nas características dos solos, em que se destaca o conjunto de solos de constituição ferrífera, distinguidos pelos teores de óxido de ferro muito elevados e intensa cor vermelha, em alguns casos de notável escurecimento, condicionado à alta concentração de compostos de manganês, e pela constituição mineralógica oxídica, independente do grau pedogenético. A ocorrência de concreções ferruginosas é outra característica muito frequente. Predominam Cambissolos Háplicos Perférreiros, com ocorrência menor de latossolos Vermelhos Perférreiros, que tendem a localizar-se de forma preferencial em rampas coluvionares de sopé, constituindo uma área de transição nos limites daquelas serras (Carvalho Filho *et al.* 2010). Segundo Sobreira *et al.* (2011) é comum a ocorrência de coberturas superficiais de crosta laterítica nos topos e nas vertentes dos morros, localmente denominadas de “canga”. Os solos, quando ocorrem, são muito pouco espessos, na ordem dos centímetros, exceto por algumas manchas maiores de material coluvial.

2.4 – CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS

Maciço rochoso é o conjunto de blocos de rochas justapostos e articulados, separados por vários tipos de descontinuidades, tais como juntas, falhas, fraturas, planos de estratificação. Um maciço pode ser homogêneo ou altamente heterogêneo, com uma grande variedade de condicionantes e propriedades geológico-geotécnicas que interferem diretamente no seu comportamento. Para caracterizar geoteticamente um maciço rochoso, vários parâmetros são analisados, como: comportamento das descontinuidades, estado de alteração e coerência da rocha, resistência, etc.

Para as descontinuidades foram analisados diversos aspectos, tais como espaçamento, orientação, persistência, abertura, preenchimento, resistência das paredes, rugosidade e percolação de água. Segundo a ISRM (1981), espaçamento corresponde à distância entre duas descontinuidades da mesma família. Persistência é a extensão ou comprimento dessa descontinuidade. A abertura é a medida perpendicular entre as paredes, e nesse caso deve ser analisado se há ou não preenchimento, e constituição ou textura. A rugosidade é definida a partir da Figura 2.9, sendo a mais rugosa a mais resistente contra movimentos de

cisalhamento. A resistência das paredes é usada para classificar o quanto alterada estão as paredes das descontinuidades.

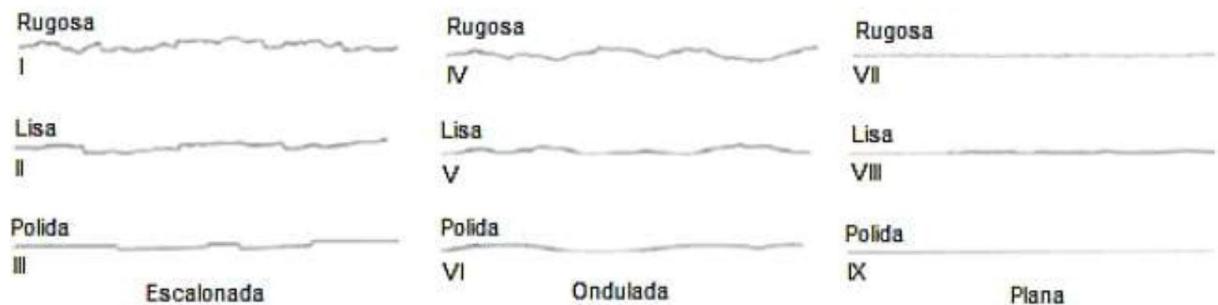


Figura 2.9: Níveis de rugosidade de uma descontinuidade (ISRM 1981).

O estudo do estado de alteração das rochas leva em consideração uma análise visual do brilho e cor dos minerais e da rocha, além de uma análise tátil das condições de friabilidade. Quanto maior o grau de alteração, menos resistente é a rocha. Essa classificação é baseada na proposição IPT (1984) *in* Serra & Ojima (1998) (Tabela 1).

Tabela 1: Graus de alteração (IPT 1984 *in* Serra e Ojima 1998).

Siglas	Denominações	Características da rocha
A1 W1 RS	Rocha sã ou praticamente sã	Apresenta minerais primários sem vestígios de alteração ou com alterações físicas e químicas incipientes. Neste caso, a rocha é ligeiramente descolorida.
A2 W2 RAD	Rocha medianamente alterada	Apresenta minerais medianamente alterados e a rocha é bastante descolorida.
A3 W3 RAM	Rocha muito alterada	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
A4 W4 REA	Rocha extremamente alterada	Apresenta minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo.

É necessário, também, classificar a rocha quanto ao seu grau de coerência, que é medida em ensaios *in situ* com objetivo de analisar a resistência que a rocha oferece quando submetida a um impacto ou risco. Utiliza-se um martelo de geólogo e um canivete ou estilete. Os graus de coerência e os critérios para sua utilização são definidos com base em Guidicini *et al.* (1972) *in* Serra e Ojima (1998) (Tabela 2).

Tabela 2: Graus de coerência (Guidicini *et al.* 1972 *in* Serra e Ojima 1998).

Siglas	Denominações	Características da rocha
C1	Rocha coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo produzindo fragmentos de bordas cortantes. Superfície dificilmente riscável por lâmina de aço. Somente escavável a fogo.
C2	Rochamediamente coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo. Superfície riscável com lâmina de aço. Escavável a fogo.
C3	Rocha pouco coerente	Quebra com facilidade ao golpe do martelo produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. Superfície facilmente riscável com lâmina de aço. Escarificável.
C4	Rocha incoerente	Quebra com pressão dos dedos desagregando-se. Pode ser cortada com lâmina de aço. Friável e escavável com lâmina.

Pode-se, ainda, classificar a resistência da rocha, que é outro parâmetro de extrema importância na caracterização de maciços. Existem várias técnicas para isso, por exemplo, ensaio de resistência à compressão puntiforme, o ensaio com o Martelo de Schmidt ou a faixa de valores de resistência das rochas estimada pela ISRM (1981) a partir de testes de campo com o martelo do geólogo (Tabela 3).

Tabela 3: Índice de carga pontual e resistência à compressão uniaxial estimados a partir de testes de campo com martelo do geólogo. (Modificado de ISRM 1981).

Grau	Característica	Resistência Compressão Uniaxial (MPa)	Índice de carga Pontual (MPa)	Campo estimado de Força
R6	Extremamente resistente	> 250	> 10	Material rochoso é somente lascado com repetidos golpes de martelo.
R5	Muito resistente	100 - 250	4 - 10	Requer várias batidas de martelo para quebrar a rocha intacta gerando fragmentos com bordas cortantes; Não é riscável pelo canivete;
R4	Rochas resistentes	50 - 100	2 - 4	Espécies quebradas por alguns golpes de martelo; superfície dificilmente riscável pelo canivete; Escavável a fogo.
R3	Rochas mediamente resistentes	25 - 50	1 - 2	Golpe firme com o martelo de geólogo quebra a rocha; o canivete apenas risca a superfície. Escavável a fogo.

Grau	Característica	Resistência Compressão Uniaxial (MPa)	Índice de carga Pontual (MPa)	Campo estimado de Força
R2	Rochas brandas	5 - 25	**	Quebra-se com um único golpe de martelo; As bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos. O canivete corta o material. Escavação mecanizada.
R1	Rochas muito brandas	1 - 5	**	Esfareamento sobre um golpe firme com o martelo de geólogo. Pode ser conformado pelo canivete; Deslocamentos ao longo da foliação sob pressão dos dedos; Escavação mecanizada.
R0	Solos Estruturados á rochas muito brandas	0.25 - 1	**	Penetrada pela ponta do dedo polegar; moldada pelas mãos; facilmente penetrada pelo canivete e martelo de geólogo; Escavada por equipamento manual.

Porém, nesse trabalho foi utilizado o ensaio de resistência à compressão puntiforme. Este ensaio foi desenvolvido por Franklin (1985), pode ser facilmente reproduzido em laboratório. É um método que provoca o fraturamento da rocha, que é submetida entre dois cones de aço endurecido, gerando fraturas paralelas ao eixo de carga. De acordo com a ISRM (2007), a resistência de carga pontual pode ser medida através da Equação 1, em que ($I_{S(50)}$) é a resistência de carga pontual em uma amostra de 50mm de diâmetro, (P) a carga de ruptura e (D_e) o diâmetro equivalente da amostra.

$$I_{S(50)} = P/D_e^2 \quad \text{Equação 1}$$

(D_e) pode ser calculado através da Equação 2, no qual (D) é a distância entre as duas pontas dos cones de aço e (W) é a menor largura da amostra, no caso dela ter formato de paralelepípedo.

$$D_e^2 = D^2 = 4 * (W * D) / \pi \quad \text{Equação 2}$$

No caso de ensaios realizados em amostras com diâmetros diferentes, o valor de ($I_{S(50)}$) é multiplicado por um fator corretivo (F), dado pela Equação 3.

$$F = (D_e / 50)^{0,45} \quad \text{Equação 3}$$

O valor de ($I_{S(50)}$) é calculado a partir de amostras isotrópicas, mas no caso de anisotropia, o índice anisotrópico de carga pontual (I_a), é dado pela proporção entre os índices nas direções de maior e menor fraqueza da rocha amostrada.

Segundo Kahraman (2001), a relação entre a resistência à compressão uniaxial (σ_c) e o índice de carga pontual varia de acordo com os diferentes tipos de rochas, podendo gerar resultados com erros superiores a 100%. Através de vários ensaios, o autor chegou na Equação 4.

$$\sigma_c = 8,41 Is_{(50)} + 9,51 \quad \text{Equação 4}$$

2.5 – SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO

Existem várias classificações geomecânicas para maciços rochosos, sendo que cada uma delas foi baseada em características diferentes e tem por objetivo definir zonas, quantificá-las e qualificá-las quanto ao seu grau de fragilidade ou estabilidade. Para isso, segundo Bieniawski (1989), é necessário identificar os principais parâmetros que influenciam no comportamento do maciço rochoso.

Dentre os sistemas de classificação, como: Rock Quality Designation (RQD), Rock Structure Rating (RSR), Rock Mass Rating (RMR), Rock Mass Quality (Q), Rock Mass Index (RMI), Geological Strength Index (GSI), foram utilizados, nesse estudo, apenas os sistemas, RQD, RMR e Q.

2.5.1 – Rock Quality Designation (RQD)

Esse sistema foi desenvolvido por Deere (1968) e faz uma estimativa do fraturamento da rocha em profundidade através da análise de furos de sondagem. Essa estimativa é baseada na porcentagem de pedaços intactos com mais de 10 cm de comprimento, em furos com no mínimo 54,7 mm de diâmetro (Equação 5) e o RQD é classificado de acordo com a Tabela 4.

$$RQD = \frac{\text{Soma dos comprimentos dos pedaços intactos} > 10\text{cm}}{\text{Comprimento do testemunho}} \quad \text{Equação 5}$$

Tabela 4: Relação entre o índice RQD e a qualidade da rocha para a engenharia (Deere 1968 *in* Noce 2016).

RQD (%)	Qualidade da Rocha
< 25	A – Muito ruim
25 - 50	B – Ruim
50 - 75	C - Razoável
75 - 90	D - Bom

RQD (%)	Qualidade da Rocha
90 - 100	E - Excelente

Porém nem sempre é possível obter testemunhos de furos de sondagem, por isso Palmstrom (1982) propôs uma alternativa para estimar o RQD, a partir índice J_v , definido pela somatória do número de descontinuidades por unidade de comprimento (Equação 6).

$$RQD = 115 - 3,3 J_v \quad \text{Equação 6}$$

* para $J_v < 4,4$; RQD = 100%

* para $J_v > 35$; RQD = 0

O RQD foi um sistema bem assimilado pelo mundo e importante para classificação de maciços, por isso se tornou um parâmetro para outros sistemas importantes, como o RMR e Q.

2.5.2 – Rock Mass Rating (RMR)

Desenvolvido por Bieniawski em 1973 e revisado em 1989, esse sistema abrange seis parâmetros geológico-geotécnicos:

- 1- Resistência à compressão uniaxial da rocha
- 2- Designação da Qualidade da Rocha (RQD)
- 3- Espaçamento entre as descontinuidades
- 4- Condição das descontinuidades
- 5- Condições da água subterrânea
- 6- Orientação das descontinuidades em relação à escavação

São atribuídos pesos relativos para cada parâmetro, que variam com suas características de acordo com a Figura 2.10. Quando somados, é obtido o índice RMR, que pode variar de 0 a 100, sendo que quanto maior o valor, mais estável é a região classificada. Para aplicar esse sistema, o maciço é dividido em setores estruturais semelhantes e cada um é classificado separadamente. Os limites das regiões estruturais geralmente coincidem com uma característica estrutural ou geológica principal, tais como falhas, diques, zonas de cisalhamento ou com uma mudança no tipo de rocha.

CLASSIFICAÇÃO – PARÂMETROS E SEUS VALORES								
Parâmetro			Intervalo de valores					
1	Resistência da rocha intacta (MPa)	Índice de carga pontual (PLT)	> 10	4 – 10	2 – 4	1 -2	Para estes valores menores – recomenda-se teste de compressão uniaxial	
		Resistência à comp. uniaxial	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5 – 25 1 – 5 < 1	
	Valor		15	12	7	4	2 1 0	
2	Designação da qualidade da rocha (RQD %)		90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 25	
	Valor		20	17	13	8	3	
3	Espaçamento das descontinuidades (cm)		> 200	200 – 60	60 – 20	20 – 6	< 6	
	Valor		20	15	10	8	5	
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosa , não-contínua e sem separação , parede da rocha não-alterada	Superfícies pouco rugosa, separação < 1 mm , paredes da rocha pouco intemperizadas	Superfícies pouco rugosa, separação < 1 mm , paredes da rocha muito intemperizadas	Superfícies estriada ou gouge < 5 mm (espessura) ou separação 1 – 5mm (contínua)	Gouge mole > 5mm (espessura) ou separação > 5mm (contínua)	
	Valor		30	25	20	10	0	
5	Água subterrânea	Influxo por 10 m no comprimento do túnel (l/m)	Sem valor	< 10	10 -25	25 – 125	> 125	
		(pressão de água na junta)/(σ principal maior)	0	< 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	> 0,5	
		Condições gerais	Completamente seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Com fluxo	
	Valor		15	10	7	4	0	
6	Orientações da direção e mergulho		Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	
	Valor	Túneis & Minas	0	-2	-5	-10	-12	
		Fundações	0	-2	-7	-15	-25	
		Taludes	0	-5	-25	-50		
Classificação do maciço rochoso determinada a partir dos valores totais								
Valor		100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	< 21		
Classe número		I	II	III	IV	V		
Descrição da rocha		Muito boa	Boa	Razoável	Pobre	Muito pobre		

Figura 2.10: Sistema RMR de classificação de maciços rochosos Bieniawski (1989).

As classificações referentes ao parâmetro 6 são baseadas nos estudos feitos por Wickham (1972) (Figura 2.11).

Direção (strike) Perpendicular ao Eixo do Túnel			
Na direção do Mergulho (dip)		Contra o Mergulho (dip)	
45 – 90º	20 – 45º	45 – 90º	20 – 45º
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável
Direção (strike) Paralelo ao Eixo do Túnel		Independentemente da Direção (strike)	
20 – 45º	45 – 90º	0 – 20º	
Razoável	Muito desfavorável	Razoável	

Figura 2.11: Efeito da orientação das descontinuidades (direção e mergulho) em cavidades (Wickham 1972).

2.5.3 – Rock Mass Quality (Q)

Com a intenção de determinar as características do maciço rochoso e os requisitos de suporte para túneis, Barton et al. (1974) se basearam no grande número de relatos de casos de escavações e propuseram um Índice de Qualidade de Túneis (sistema Q). Esse sistema leva em consideração seis parâmetros:

- 1- Número de famílias de descontinuidades (*Jn*)
- 2- Designação da Qualidade da Rocha (RQD)
- 3- Índice de rugosidade das famílias de descontinuidades mais desfavoráveis (*Jr*)
- 4- Grau de alteração ou preenchimento da descontinuidade menos resistente (*Ja*)
- 5- Fluxo de água (*Jw*)
- 6- Estado de tensão do maciço (SRF)

O valor numérico do índice Q varia em uma escala logarítmica de 0,001 a um máximo de 1000, e é definido pela Equação 7:

$$Q = \frac{RQD}{Jn} * \frac{Jr}{Ja} * \frac{Jw}{SRF} \quad \text{Equação 7}$$

A Equação 7, relaciona três parâmetros. **RQD/Jn** com a média do tamanho dos blocos, **Jr/Ja** com resistência ao cisalhamento entre os blocos e **Jw/SRF** com a condição de tensão do maciço (Bieniawski, 1989). Quanto mais alto for o valor de Q, melhores serão as condições de escavabilidade do maciço rochoso.

- **Número de famílias de descontinuidades (J_n)**

Qualquer descontinuidade fortemente desenvolvida deve ser considerada uma família, por exemplo, foliação, xistosidade, clivagens, acamamento, fratura, etc. O valor de J_n pode ser expresso pelo número médio de juntas de cada família por unidade de área do maciço.

Os valores de J_n são classificados de acordo com a Figura 2.12.

Condições de compartimentação do maciço	Valores de J_n
A – Fraturas esparsas ou ausentes	0,5 – 1,0
B – Uma família de fraturas	2
C – Uma família, mais fraturas esparsas	3
D – Duas famílias de fraturas	4
E – Duas famílias, mais fraturas esparsas	6
F – Três famílias de fraturas	9
G – Três famílias, mais fraturas esparsas	12
H – Quatro ou mais famílias de fraturas	15
I – Rocha triturada (completamente fragmentada)	20

Figura 2.12: Valores de J_n no sistema-Q

- **Índice de rugosidade das famílias de descontinuidades mais desfavoráveis (J_r)**

Os parâmetros J_r e Ja , representando a resistência ao cisalhamento, devem ser relativos à família de juntas menos resistente, portanto, o valor de (J_r/Ja) deve ser relativo à descontinuidade mais favorável à ruptura (Figura 2.13).

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

Figura 2.13: Valores de J_r no sistema-Q.

- **Grau de alteração ou preenchimento da descontinuidade menos resistente (Ja)**

O índice Ja é estabelecido de acordo com a Figura 2.14.

a- Fraturas sem deslocamento relativo. Há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
Condição de alteração das paredes	Valores de J_a
A – Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epidoto)	0,75
B – Paredes sem alteração, somente leve descoloração ($\phi_r = 25 - 35^\circ$)	1
C – Paredes levemente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não-argilosas ($\phi_r = 25 - 35^\circ$)	2
D – Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas ($\phi_r = 20 - 25^\circ$)	3
E – Paredes com películas de materiais moles ou com baixo ângulo de atrito (caolinita, clorita, talco, grafita, etc.) e pequena quantidade de minerais expansivos ($\phi_r = 8 - 16^\circ$)	4
b- Fraturas com deslocamento relativo (menos de 10cm). Há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
F – Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, sem argila ($\phi_r = 25 - 35^\circ$)	4
G – Fraturas com preenchimento argiloso sobreconsolidado (espessura < 5mm) ($\phi_r = 16 - 24^\circ$)	6
H – Fraturas com preenchimento argiloso subconsolidado (espessura < 5mm) ($\phi_r = 12 - 16^\circ$)	8
I – Fraturas com preenchimento argiloso expansivo, como por exemplo a montmorilonita (espessura < 5mm) ($\phi_r = 12 - 16^\circ$)	8 – 12
c- Fraturas com deslocamento relativo. Não há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
J, K, L – Zonas com rochas trituradas ou esmagadas, com argila (ver G, H e I para condições do material argiloso) ($\phi_r = 6 - 24^\circ$)	6 – 8 ou 8 – 12
M – Zonas siltosas ou areno-argilosas com pequena quantidade de argila	5
N, O, P – Zonas ou bandas contínuas de argila (ver G, H e I para condições de material argiloso) ($\phi_r = 6 - 24^\circ$)	10 – 13 ou 13 - 20

Figura 2.14: Valores de J_a no sistema-Q.

- Fluxo de água (J_w)**

O índice J_w é estabelecido de acordo com a Figura 2.15.

Condições de afluência de água	Valores de J_w	Pressão de água (Kg/cm²)
A – Escavação a seco ou com pequena afluência de água (< 5 l/m)	1,0	< 1
B – Afluência média da água com lavagem ocasional do preenchimento das fraturas	0,66	1,0 – 2,5
C – Afluência elevada em rochas competentes, sem preenchimento das juntas	0,5	2,5 – 10
D – Afluência elevada com considerável lavagem do preenchimento das fraturas	0,33	2,5 – 10
E – Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), decaindo com o tempo	0,2 – 0,1	> 10
F – Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), sem decaimento com o tempo	0,1 – 0,05	> 10

Figura 2.15: Valores de J_w no sistema-Q.

- **Estado de tensão do maciço (SRF)**

O índice SRF é estabelecido de acordo com a Figura 2.16.

a- Zonas alteradas	
Condições das tensões dos maciços	SRF
A – Ocorrência de múltiplas zonas alteradas contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade qualquer)	10
B – Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade de escavação \leq 50m)	5
C – Zona alterada contendo argila ou rocha quimicamente desintegrada (profundidade de escavação $>$ 50m)	2,5
D – Múltiplas zonas esmagadas em rocha competente, sem argila (profundidade qualquer)	7,5
E – Zona esmagada em rocha competente, sem argila (profundidade de escavação \leq 50m)	5
F – Zona esmagada em rocha competente, sem argila (profundidade de escavação $>$ 50m)	2,5
G – Fraturas abertas, fraturamento muito intenso (profundidade qualquer)	5
b- Rocha competente, problemas de tensões de rochas	
H – Tensões baixas, próximo à superfície ($\sigma_c / \sigma_1 > 200$)	2,5
I – Tensões médias ($\sigma_c / \sigma_1 = 200$ a 10)	1
J – Tensões altas ($\sigma_c / \sigma_1 = 10$ a 5)	0,5 – 2,0
K – Explosões moderadas de rocha ($\sigma_c / \sigma_1 = 5$ a 2,5)	5 – 10
L – Explosões intensas de rocha ($\sigma_c / \sigma_1 < 2,5$)	10 – 20
c- Rochas incompetentes (comportamento plástico devido ao tipo das deformações)	
M – Tensões moderadas	5 – 10
N – Tensões elevadas	10 – 20
d- Rochas expansivas (atividade expansiva com a presença de água)	
O – Pressão de expansão moderada	5 – 10
P – Pressão de expansão elevada	10 – 15

Figura 2.16: Valores de SRF no sistema-Q.

Após calcular todos os parâmetros e calcular o valor de Q, utilizando a Equação 7, obtém-se a classificação do maciço de acordo com a Figura 2.17.

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

Figura 2.17: Classificação do maciço no sistema-Q.

3 – METODOLOGIA

Este trabalho foi dividido em cinco etapas, desenvolvidas de novembro de 2015 a julho de 2016.

3.1 – PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Essa etapa consiste na aquisição de material sobre o assunto, para estudo da região e da mina, como trabalhos de conclusão de curso (TCC), dissertações de mestrado e doutorado, artigos, mapas topográficos e geológicos, cartas geotécnicas, fotos aéreas etc. Este material de apoio foi sendo atualizado com o progresso do trabalho, necessidade ou oportunidade para melhorar os resultados.

3.2 – MONTAGEM DE BASES CARTOGRÁFICAS

Essa foi a segunda fase do trabalho, muito importante, pois todo o restante dependeria das bases desenvolvidas nessa etapa.

Primeiramente, foi adquirido o mapa topográfico da mina, onde todo o restante seria desenvolvido com base nesse mapa. Foi feito pela Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE), na escala 1:200, no *Datum SAD 1969*, Zona 23K. Utilizou-se o método de levantamento com grau de precisão BCRA-4C, na projeção horizontal de 400 m.

O mapa topográfico foi modificado por Gomes, 2016, de acordo com as necessidades do estudo. Removeram-se todas as *shapes* de classificação de cavidades, como os espeleotemas, restando apenas o contorno da mina, perfis longitudinais e transversais. O mapa foi digitalizado com o software *Qgis 2.12* e georreferenciado, no *Datum SAD 1969*, Zona 23K.

Depois de georreferenciado, o mapa topográfico foi sobreposto com outros mapas, como a Carta Geológica de Ouro Preto (Gomes, 2012) e imagem aérea de Ouro Preto adquirida com o software *Google Earth*.

3.3 – TRABALHOS DE CAMPO E LABORATÓRIO

A etapa de campo começou em fevereiro de 2016 com um reconhecimento regional ao redor da mina, na Serra de Ouro Preto, com o proprietário do local da mina, Eduardo Evangelista, membros da SEE e outros colaboradores. Em março começou-se os trabalhos de mapeamento geológico-estrutural de detalhe da mina, na escala 1:200, que consistiu em onze etapas de campos até junho. Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Martelo de geólogo
- Bússola

- Lupa de bolso (20x)
- Cartela granulométrica
- Trena de 20 m
- Ácido clorídrico diluído em 10%

Na etapa de laboratório foi feito o teste de carga pontual (*Point Load Test*) em dezesseis amostras de quatro tipos de rochas diferentes. Foram aplicados quatro testes em cada tipo (dois testes com direção perpendicular às descontinuidades e dois testes na direção paralela). Os testes foram executados em 23/03/2016, no laboratório de geotecnia no prédio do DEMIN – UFOP, com o sistema GCTS PLT-100, seguindo os passos da ISRM (2007) (Figura 3.1).



Figura 3.1: Sistema GTLS PLT-100 (Teste de Carga Pontual).

3.4 – CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

Após a aquisição de dados, as famílias de fraturas e falhas foram determinadas e classificadas com base nos sistemas de classificação geomecânica RMR e Q. Além disso, foi analisado o estado de alteração e resistência das rochas e descontinuidades e suas orientações em relação à direção da cavidade. Com isso foi possível determinar vários setores com características diferentes, que poderiam resultar em diferentes classificações de maciço. Essa setorização é de extrema importância, visto que o maciço pode ter comportamentos diferentes dependendo das características locais, o que resultaria em resultados diferentes. Portanto a classificação geomecânica se torna mais eficaz ao invés de fazer a média e classificar todo o maciço em um único resultado.

3.5 – ELABORAÇÃO DE CARTA GEOTÉCNICA

Após a classificação geomecânica de cada setor, essa última etapa se consistiu apenas no desenvolvimento da carta geotécnica, usando o *software Qgis*. Assim, foi possível classificar cada setor quanto ao seu grau de estabilidade, e, consequentemente, fazer uma estimativa qualitativa de todo maciço.

4 – RESULTADOS

4.1 – GEOLOGIA DA MINA

De acordo com Gomes (2012), a mina se encontra próxima à zona de contato entre a Formação Cauê e Formação Cercadinho, por isso é composta, principalmente, por itabiritos, além de filito hematítico prateado e quartzito. Porém, também foi possível encontrar veios de quartzo, sulfetos, turmalina, moscovita e argilominerais e veios de quartzo e magnetita. Estes veios apareciam paralelos a foliação S1, boudinados ou subverticais com direção E-W. Também foram encontradas porções argilosas, provavelmente compostas por caulim e sericita, ricas em magnetita.

A abertura principal da mina tem em torno de 192 m e possui orientação N-S. Sua estrutura principal é a foliação S1, que é paralela ao acamamento S0, com atitude 150/22, variando um pouco entre SSE e SSW.

O conduto principal serve apenas como meio de acesso principal, por isso possui uma escavação em forma de arco, que é geoteticamente mais estável, porém há escavações mais abertas, formando pequenos salões. Estes salões partem do meio do conduto principal em direção a leste com mergulho para SE. A escavação desta porção da mina tem orientação caindo para SE, pois seguia a atitude dos veios boudinados, paralelos a foliação, que foi onde ocorreu a extração de ouro. O mapa de contorno da mina pode ser visto no Anexo 1.

4.1.1 – Tipos de Rocha

Apesar dos itabiritos ocuparem quase a totalidade da mina e não haver grande variedade de litologias, foi possível identificar variações, que influenciariam no comportamento local do maciço, e foram necessárias para a realização desse estudo geotécnico. Por isso foram estipuladas quatro tipos de rochas que apresentam diferente mineralogia, textura, grau de intemperismo e local de ocorrência.

Tipo 1: Esse tipo foi nomeado como “**Itabirito Compacto**” e ocupa, aproximadamente, 25% da mina. Tem cor escura, quase preta. É composto, principalmente por bandas hematíticas, intercaladas com finas bandas de sílica, às vezes quase imperceptíveis. Em alguns locais podem haver finas camadas (até 2 cm) de argila de cor amarela ou vermelha. Há também veios de quartzo, boudinados ou não, entre o acamamento do itabirito, às vezes com magnetita. O Itabirito Compacto é uma rocha bem resistente, pouco porosa e as fraturas não são muito expressivas. É difícil retirar amostras ou quebrá-las com martelo de geólogo,

necessitando de várias pancadas. Na Figura 4.1 pode ser observado um exemplar desse tipo de rocha.



Figura 4.1: Amostra de "Itabirito Compacto" retirada da mina e serrada em laboratório.

Tipo 2: Conhecido localmente como “**Itabirito Xistoso**” (Figura 4.2) devido sua baixa coesão e maior teor de sílica, se assemelhando com um ritimoto com alternância de bandas silicosas, hematíticas ou argilosas. Tem mineralogia semelhante à rocha Tipo 1, porém é um itabirito mais intemperizado, mais friável e mais poroso, por isso, frequentemente está úmido ou molhado. É relativamente fácil quebrar uma amostra usando um martelo de geólogo. Esse tipo de rocha tem uma cor mais clara devido ao intemperismo dos minerais, intercalando bandas acinzentadas, amareladas ou avermelhadas. As fraturas e veios são mais persistentes e maiores. Ocupa, aproximadamente, 55% da mina.



Figura 4.2: Amostra de "Itabirito Xistoso" retirada da mina e serrada em laboratório.

Tipo 3: Esse tipo de rocha é composto por filito prateado (Figura 4.3) e quartzito, que ocorrem comumente juntos. Este tipo de rocha ocorre em pequenas camadas entre o itabirito e ocupa apenas 5% da mina. O filito prateado pode variar para cores de tons vermelho e branco devido ao intemperismo e é composto, principalmente, por sericita e outros argilominerais. Está sempre úmido ou comumente associado com percolação de água, por isso, aparenta estar mais erodido que as rochas adjacentes. O quartzito é composto, basicamente, por quartzo de areia média e sericita, tem cor branca ou amarela. Está também associado com percolação de

água, por ser muito poroso e intemperizado. As duas rochas são mais suscetíveis a deslocamento de lascas ou blocos, principalmente quando associadas a fraturas. Foram designadas como rocha branda por quebrarem ou amassarem facilmente com a batida de martelo.



Figura 4.3: Amostra de "Filito prateado" retirada da mina e serrada em laboratório.

Tipo 4: Esta rocha é composta de vários minerais gerados ou transportados por fluidos hidrotermais e foram mineralizados em forma de veios que seguem a direção e mergulho da foliação, frequentemente formando boudins que dobram essa estrutura do itabirito. A mineralogia é composta por quartzo, turmalina, sulfetos, magnetita, moscovita, caulim e argilominerais, podendo variar nas proporções desses minerais. Estes veios são de difícil interpretação, sem estratificação ou xistosidade interna, apresentando um padrão confuso de deposição ou mineralização, no qual o quartzo pode estar arredondado ou anguloso e é circundado por argilominerais de cor amarela ou vermelha, magnetita, sulfetos e turmalina. Em alguns locais estes veios aparecem com uma textura muito rugosa nas paredes da cavidade e supõe-se que isto foi devido à lixiviação dos minerais, principalmente sulfetos, deixando apenas moldes. Podem ser moderadamente resistentes, quando há mais quartzo e sulfetos, ou pouco resistentes quando há mais caulim, moscovita e argilominerais. A extração de ouro ocorreu nestes veios, que estão presentes em toda região e ocupam aproximadamente 15% da mina, variando de centímetros a metros de espessura. (Figura 4.4).



Figura 4.4: Veios e camadas hidrotermais com diferentes mineralizações e texturas.

4.1.2 – Geologia Estrutural

Acamamento

O acamamento (S_0) está sempre paralelo à foliação (S_1), com atitude 150/22, variando pouco para SW e SE. É evidenciado pelas camadas de formações ferríferas, no qual são intercaladas bandas de hematita e bandas silicosas. Camadas arenosas ou argilosas também aparecem entre as formações ferríferas, evidenciando o acamamento.

Foliação S_1

A mina apresenta uma foliação (S_1) com atitude 150/22, com mergulho preferencialmente para sul, variando um pouco para SW e SE (Figura 4.5). Evidenciada, principalmente, pelas descontinuidades penetrativas entre as bandas das formações ferríferas, gerando desplacamentos, orientação das micas em quartzitos e orientação dos veios. Essa foliação está comumente dobrada, arqueada, constituindo dobras de boudinagem, devido ao alívio de

pressão que favoreceu a percolação de fluidos hidrotermais. É a principal estrutura a qual se associa a mineralização aurífera.

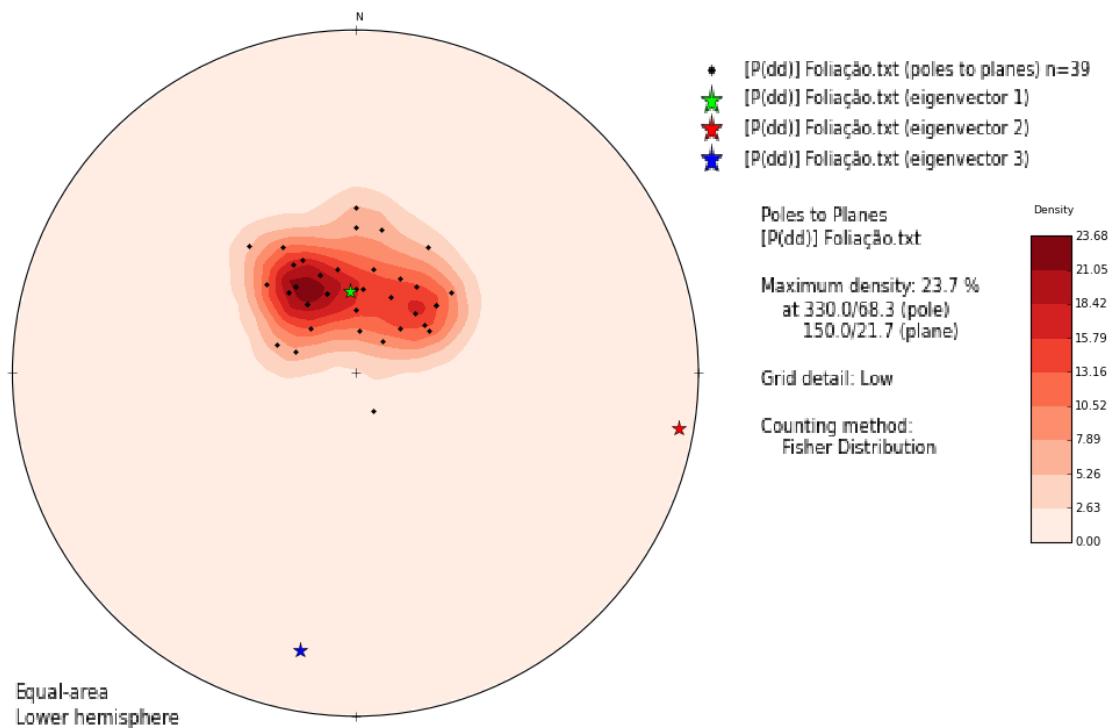


Figura 4.5: Medidas dos polos das foliações adquiridas em campo.

Veios

Os veios podem ser divididos em três principais tipos (Figura 4.6). Há veios compostos principalmente de quartzo, turmalina e sulfetos, com direção E-W, subverticais, quase perpendiculares à foliação e muito fraturados. Existem veios de quartzo puro ou quartzo e magnetita, de granulação grosseira, frequentemente boudinados, entre a foliação, provocando um leve arqueamento e também fraturados. Há também veios compostos por quartzo, mica, sulfetos e argilominerais, boudinados entre a foliação, podendo até cortá-la em várias direções e não estão fraturados.



Figura 4.6: Diferentes tipos de veios na Mina Du Veloso.

Fraturas e Falhas

Através dos trabalhos de campo e estudo das atitudes dos planos de fraturas pelo *Stereonet OpenStereo* (Figura 4.7), foi possível identificar duas famílias de fraturas com maior relevância. Porém foram observadas outras atitudes dispersas, que não influenciaram nos cálculos dos parâmetros das classificações geomecânicas:

Fratura 1 (Fr1): Esta família de fratura tem atitude **165/90**, podendo variar um pouco para S ou ESE. Está presente em toda a mina e em todos os tipos de rocha, frequentemente associada com percolação de água e, em alguns lugares, com desplacamento de lascas ou blocos. São fraturas verticais, retilíneas, pouco onduladas e fechadas, raramente abertas e preenchidas por material preto amorfo, podendo chegar até 0,5 cm. Essas fraturas tem espaçamento de 10 cm a 30 cm, são persistentes, podendo apresentar riscos de estabilidade para o maciço.

Fratura 2 (Fr2): A outra família de fraturas tem atitude **300/65**, variando um pouco para WNW ou NNW, mergulhando para NW. Pode influenciar no deslocamento de lascas, pois, geralmente, tendem a seguir a direção do conduto principal pelo teto, ou seja, sua direção é subparalela ao eixo do túnel de escavação, e, quando interceptam outras fraturas ou foliação, geram esses deslocamentos no teto do conduto. São mais onduladas pelo teto e pouco rugosas, tem espaçamento de 20 cm a 40 cm, geralmente estão secas, pouco abertas (de milímetros até 0,5 cm) e não estão preenchidas por outros materiais.

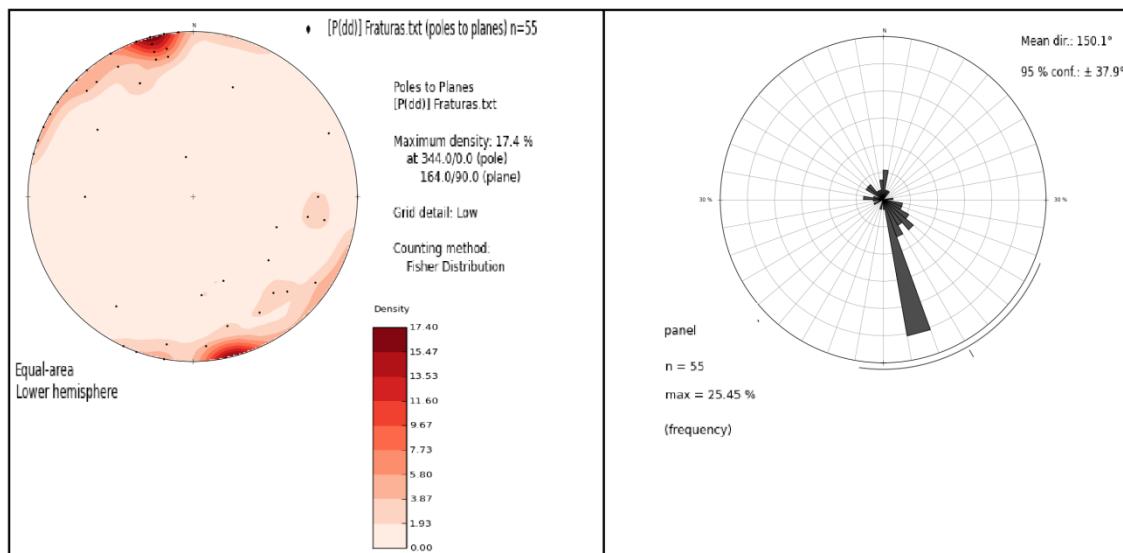


Figura 4.7: Análise das atitudes dos planos de fraturas no estereograma (*OpenStereo 0.1.2*).

Além das fraturas, foi possível identificar falhas ou zonas de cisalhamento (Figura 4.8) com atitudes diferentes das famílias de fraturas. Essas falhas, quase sempre, continham brechas de itabirito e quartzo angulosos, material argiloso, material escuro amorfo preenchendo espaços vazios, que pode ser turmalina, sulfetos ou até mesmo material originado da oxidação do Fe contido nas rochas. Algumas indicavam sentido de movimento através das foliações dobradas junto às falhas.

As atitudes principais encontradas foram medidas e obteve-se as seguintes famílias:

Falha 1 (F1): As falhas com atitude **200/40**, normalmente ocorrem subparalelas à foliação e acamamento, principalmente onde a rocha é mais branda e frequentemente associadas com percolação de fluidos hidrotermais e geração de veios, brecha de falha, hematita friável e argila. Podem estar associadas a movimentos cisalhantes no próprio plano de foliação, gerando uma descontinuidade mais forte. Devido a isso e por elas ocorrem normalmente juntas das litologias mais brandas e porosas, há percolação de água nessas rochas, por isso são mais abertas, até 40 cm, e erodidas, podendo apresentar risco de abatimento de blocos.

Falha 2 (F2): As falhas com atitude **270/75** estão sempre associadas à percolação de água e são mais onduladas, abertas (de 2 cm até 30 cm), mais erodidas em seu plano, tornando-as mais perceptíveis. Além disso, há brechas compactas e resistentes de quartzo e material escuro preenchendo os espaços vazios, mica e argilominerais. Ocorrem mais em “Itabiritos Xistosos”, principalmente onde houve maior exploração de ouro, nos pequenos salões na porção leste da mina.

Falha 3 (F3): A falha reversa com atitude **70/35** foi identificada quase no final do conduto principal, apresentando brecha do próprio itabirito friável, material escuro, mica e argilominerais. Não há percolação de água e é pouco ondulada e fechada.



Figura 4.8: A) Falha 1 e percolação de água em rocha argilosa. B) Falha 2, brecha de falha. C) Falha 3, brecha de falha em zona de cisalhamento.

Além das estruturas anteriores, foram observadas também dobras em S, dobras recumbentes fechadas, dobras em bainha, lineações, de difícil interpretação, devido ao forte intemperismo da rocha (Figura 4.9).

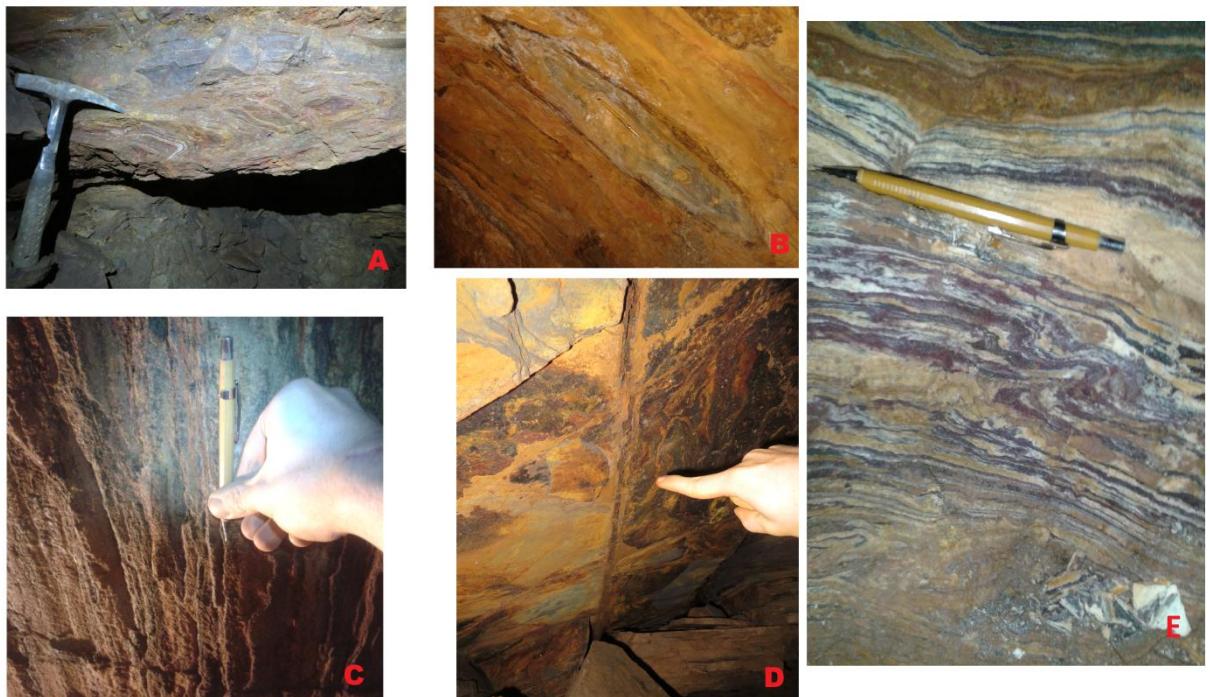


Figura 4.9: A) Dobra cerrada recumbente. B) Dobra em bainha. C) Lineação em itabirito. D) Fraturas preenchidas por material escuro amorfo.

4.2 – SETORIZAÇÃO

A setorização da mina foi baseada, principalmente, em parâmetros geotécnicos e nas seguintes características:

- Litologia (resistência e estado de alteração da rocha).
- Orientação das descontinuidades principais.
- Frequência, condições e persistências das descontinuidades.
- Presença de percolação de água e desplacamento de lascas ou blocos no teto.

Assim, foram determinados cinco setores, que podem ser visualizados na Figura 4.10.

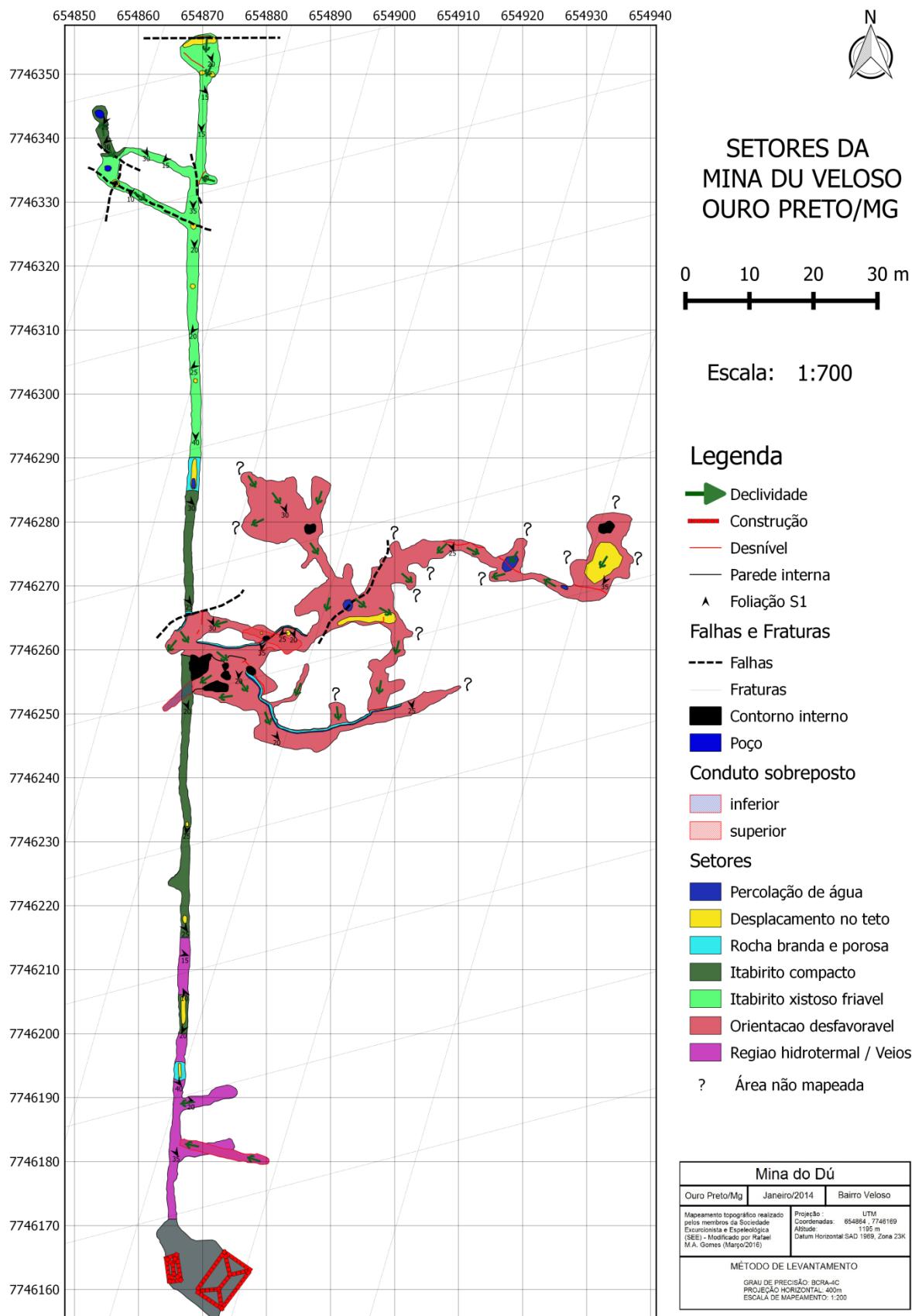


Figura 4.10: Divisão dos setores da Mina Du Veloso.

- Setor 1: Cor vermelha, com orientação desfavorável das descontinuidades.
- Setor 2: Cor verde escuro, com rochas do tipo Itabirito Compacto.
- Setor 3: Cor verde claro, com rochas do tipo Itabirito Xistoso.
- Setor 4: Cor azul claro, com rochas brandas e porosas.
- Setor 5: Cor roxo, com influência de hidrotermalismo, ocupada por veios.

Como foi nessa área que ocorreu a extração de ouro, nas camadas e veios paralelos a foliação, portanto com mergulho para SE, a foliação S1 foi considerada a descontinuidade principal, devido sua orientação desfavorável em relação à escavação. Além disso, o **setor 1** (Figura 4.11) apresenta itabirito friável, algumas camadas arenosas ou argilosas, falhas e regiões muito fraturadas, que propiciam a percolação de água.

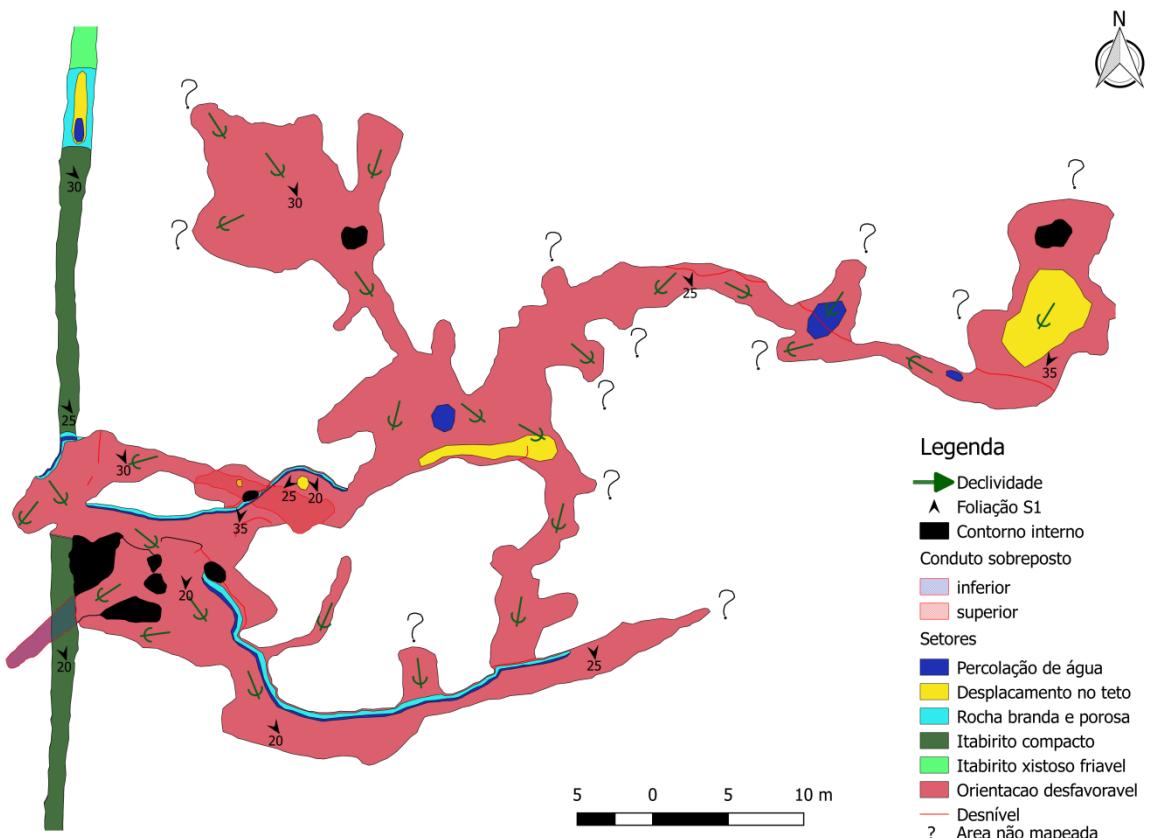


Figura 4.11: Setor 1 da mina.

No **setor 2** (Figura 4.12), o tipo de rocha foi considerado o fator mais importante. O itabirito compacto é uma rocha resistente, pouco ou nada alterada, menos porosa, com fraturas menos persistentes.

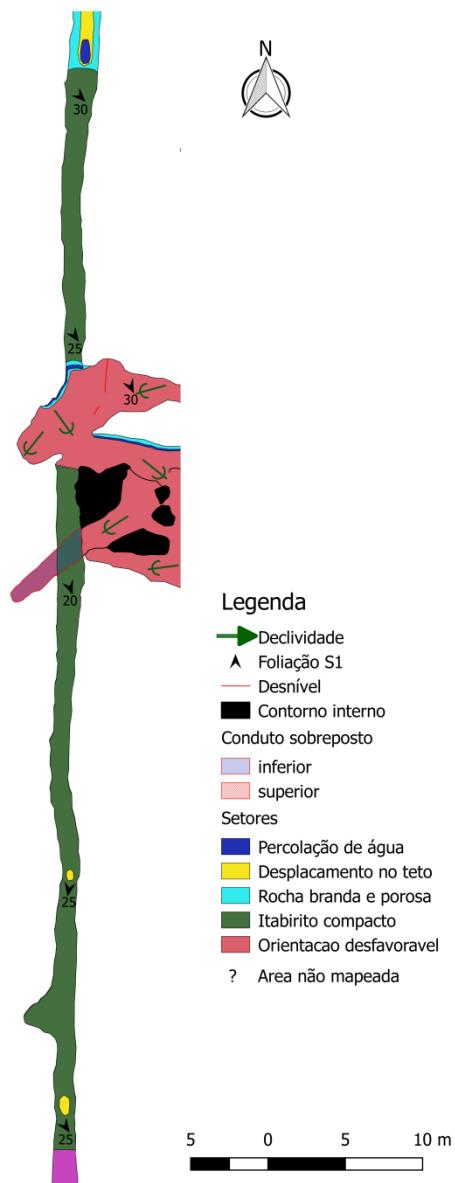


Figura 4.12: Setor 2 da mina.

O setor 3 (Figura 4.13) também leva o tipo de rocha como fator determinante. O itabirito xistoso é uma rocha com estado de alteração maior, mais porosa, menos resistente e as fraturas são mais persistentes, aumentando a probabilidade de soltar lascas.



Figura 4.13: Setor 3 da mina.

O **setor 4** ocorre somente em alguns lugares onde afloram camadas mais brandas, arenosas e argilosas, como filito prateado, rochas intrusivas alteradas para argilominerais, mica, caulim e/ou quartzitos. Frequentemente há percolação de água ou estão úmidas. São rochas muito alteradas e pouco resistentes com fraturas persistentes, pouco abertas.

O **setor 5** (Figura 4.14 e Figura 4.15) é uma região onde há grande quantidade de veios, bastante fraturada e dobrada, o que dificulta muito a interpretação geológico-estrutural. A rocha não é muito resistente devido às fraturas e veios, podendo estar pouco ou muito alterada, com regiões argilosas com grandes cristais de quartzo e mineralogia bastante variada. Não há percolação de água, mas pode estar umedecida nas regiões mais argilosas.

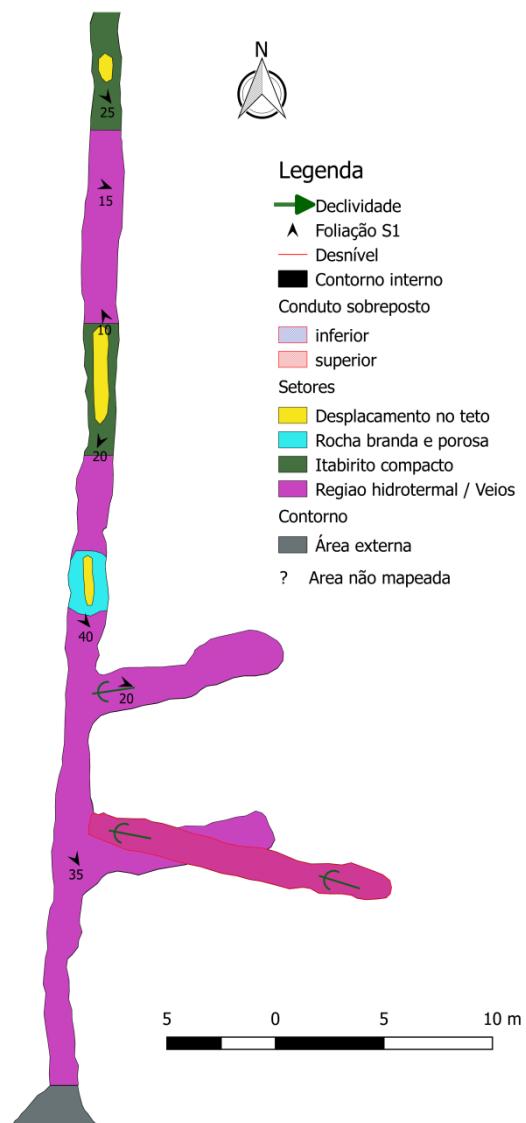


Figura 4.14: Setor 5 da mina.



Figura 4.15: Foto que exemplifica os veios e camadas argilosas do setor 5.

Além desses setores, foram demarcadas algumas regiões com características locais de fraturamento, percolação de água e deslocamentos de lascas, aumentando o risco de instabilidade (Figura 4.16). Essas regiões podem ser vistas na Figura 4.10 de cor amarela (deslocamentos de lascas) ou cor azul escura (percolação de água).

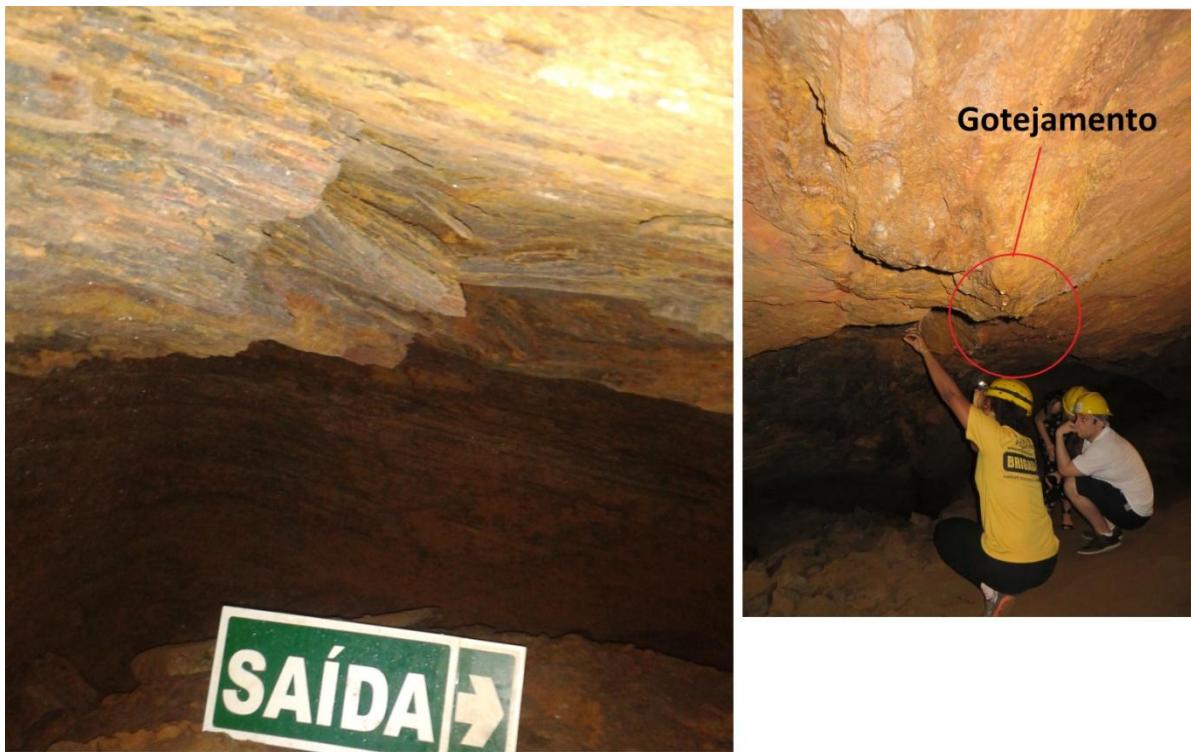


Figura 4.16: Sinais de desplacamento de lascas e gotejamento em fraturas ou falhas.

4.3 – PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO MACIÇO

Os parâmetros usados nos sistemas de classificação Q e RMR foram determinados para cada setor e podem ser observados nas Tabela 5 e Tabela 7.

Tabela 5: Parâmetros do sistema de classificação Q para cada setor da mina.

Parâmetros do Sistema de Classificação Q para cada Setor					
Setor	Setor 1	Setor 2	Setor 3	Setor 4	Setor 5
<i>Jn</i>	6,00	6,00	6,00	4,00	6,00
RQD	68,80	91,90	82,00	91,90	88,60
<i>Jr</i>	1,50	4,00	3,00	1,50	3,00
<i>Jw</i>	1,00	1,00	1,00	0,66	1,00
<i>Ja</i>	2,00	0,75	2,00	8,00	1,00
SRF	1,00	1,00	1,00	2,50	2,50

Como foram encontradas apenas duas famílias de fraturas, mais fraturas esparsas, o fator *Jn* tem valor 6 para todos os setores, exceto no setor 4 que ocorre localmente e não foram vistas fraturas esparsas.

O RQD foi calculado através da Equação 6 analisando o fator Jv , no qual é estimado o número de fraturas em um volume de 1 m³. Quanto maior o RQD, menos fraturada está a rocha.

A relação Jr/Ja estima a resistência ao cisalhamento entre os blocos. Rochas com maior Jr , como o setor 2, tem fraturas não persistentes. Rochas com Jr menor, como no setor 1, onde a descontinuidade principal é a foliação, apresenta um plano polido ondulado. O Ja mais baixo é 0,75, no setor 2, quando as paredes das descontinuidades são duras, compactas e com preenchimento impermeável. O maior valor ocorre no setor 4, pois tem fraturas abertas com preenchimento argiloso.

A relação Jw/SRF analisa o grau de tensão do maciço. Todos os setores apresentam o Jw igual a 1,0 por ter nenhuma ou pouca influência de água na escavação. Somente o setor 4 tem uma afluência média de água com lavagem ocasional do preenchimento das fraturas, além de ter um SRF estimado para zonas alteradas contendo argila. Ou igual a 1,0 quando a rocha competente sofre por tensões médias.

Na Tabela 6 podem ser observados os índices de carga pontual, calculado para cada tipo de rocha, que foram utilizados no sistema de classificação RMR.

Tabela 6: Resultado dos ensaios de carga pontual nos quatros tipos de rocha da mina (Foram seguidas as normas apresentadas no capítulo 2.4).

Litologia	Dir.	W (mm)	D (mm)	De ²	F	P (N)	Is ₍₅₀₎ (MPa)
Itabirito Compacto	+	52	52	2714,5	1,6	9600	5,78
Itabirito Compacto	+	54	54	3094,0	1,7	8240	4,65
Itabirito Compacto	//	33	33	1218,5	1,1	3000	2,70
Itabirito Compacto	//	37	37	1083,5	1,0	1950	1,86
Itabirito Xistoso	+	43	43	1314,0	1,1	1240	1,07
Itabirito Xistoso	+	44	44	1904,8	1,4	730	0,52
Itabirito Xistoso	+	42	42	1283,4	1,1	1580	1,38
Itabirito Xistoso	//	49	49	2620,3	1,6	710	0,44
Itabirito Xistoso	//	48	48	2689,1	1,6	1230	0,74
Filito prateado	+	60	60	3055,8	1,7	10	0,01
Filito prateado	+	45	45	2291,8	1,5	0	0,00
Filito prateado	+	30	30	878,5	0,9	60	0,06
Filito prateado	//	62	62	1973,5	1,4	120	0,08
Veio		80	80	4583,7	2,1	910	0,42
Veio		60	60	4583,7	2,1	690	0,32

Tabela 7: Parâmetros do sistema de classificação RMR para cada setor da mina.

Parâmetros do Sistema de Classificação RMR para cada Setor					
Setor	Setor 1	Setor 2	Setor 3	Setor 4	Setor 5
Índice de carga pontual	2,0	7,0	2,0	0,0	1,0
RQD	13,0	20,0	17,0	20,0	17,0
Espaçamento entre descontinuidades	8,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Condição das descontinuidades	20,0	30,00	10,0	0,0	20,0
Condição da água subterrânea	10,0	15,0	10,0	4,0	7,0
Orientação das descontinuidades	-5,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Além dos parâmetros RQD e índice de carga pontual, há o espaçamento entre as descontinuidades, que varia de 20 cm a 60 cm em todos os setores, exceto no setor 1, que varia de 6 cm a 20 cm, pois é o espaçamento médio das descontinuidades mais marcantes da foliação.

A condição das descontinuidades varia bastante para cada setor. No setor 2, as fraturas são rugosas e não contínuas. Nos setores 1 e 5, as descontinuidades são pouco rugosas com uma separação de até 1,0 mm e paredes muito intemperizadas. No setor 3, há preenchimento das fraturas separadas até 5,0 mm. No setor 4 há um preenchimento de material mole nas fraturas.

A condição da água subterrânea varia de completamente seco no setor 2, úmido nos setores 1,3 e 5 e gotejando no setor 4.

A orientação das descontinuidades é muito favorável em todos os setores, com exceção do setor 1, que a foliação é subparalela ao eixo da galeria escavada.

4.4 – CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

Após estimar os parâmetros para cada setor, foi usada a Equação 7 para calcular o valor de Q e foi obtido o valor RMR através da soma dos parâmetros, possibilitando a classificação de cada setor do maciço conforme as Tabelas 8 e 9:

Tabela 8: Resultado do sistema de classificação Q.

Classificação Geomecânica para o Sistema de Classificação Q					
Setor	Setor 1	Setor 2	Setor 3	Setor 4	Setor 5
Valor	8,60	81,70	20,50	1,14	22,15
Qualidade	Regular	Muito bom	Bom	Ruim	Bom

Tabela 9: Resultado do sistema de classificação RMR.

Classificação Geomecânica para o Sistema de Classificação RMR					
Setor	Setor 1	Setor 2	Setor 3	Setor 4	Setor 5
Valor	48,0	82,0	49,0	34,0	55,0
Qualidade da rocha	Razoável	Boa	Razoável	Pobre	Razoável

O setor 1 foi classificado como regular, classe V, ou razoável classe III para os sistemas de classificação Q e RMR respectivamente, pois sua descontinuidade principal, a foliação S1, tem uma orientação desfavorável em relação à direção da galeria, além de apresentar paredes intemperizadas, polidas, levemente onduladas e por possuir rochas do tipo 2, Itabirito Xistoso, que é moderadamente resistente, friável e porosa.

O setor 2 apresenta qualidade muito boa, classe III, ou boa, classe II para os sistemas de classificação Q e RMR respectivamente, devido à competência das rochas, do tipo 1, Itabirito Compacto, que são resistentes, pouco ou nada alteradas, quase impermeáveis e por não apresentarem fraturas persistentes.

O setor 3 se assemelha bastante com o setor 1, classificado por ter qualidade boa, classe IV, ou razoável classe III para os sistemas de classificação Q e RMR respectivamente. Possui rochas razoavelmente resistentes, porém são rochas do tipo 2 intercaladas com níveis argilosos e arenosos, apresentando fraturas pouco abertas e preenchidas, frequentemente úmidas.

O setor 4 é muito restrito a alguns locais de ocorrência de rochas brandas. Classificado como ruim, classe VI, ou pobre classe IV para os sistemas de classificação Q e RMR respectivamente, por estar sempre úmido ou com percolação de água, além de apresentar fraturas pouco abertas, com preenchimento mole.

O setor 5 é classificado por ter qualidade boa, classe IV, ou razoável classe III para os sistemas de classificação Q e RMR respectivamente. É um setor deformado, apresentando

dobras e fraturas mais intensas, rugosas, onduladas, porém em zona alterada. Possui rochas variadas, intercaladas entre brandas ou moderadamente resistentes.

Os valores de Q e RMR mostram que o maciço se comporta de uma maneira diferente em cada região, dependendo da resistência da rocha, composição mineralógica, quantidade e comportamento das descontinuidades e a relação da orientação do túnel x descontinuidades. De uma maneira geral, pode-se concluir que o maciço apresenta qualidade razoável a boa, podendo variar em locais restritos com características específicas, onde a rocha é mais branda, com percolação de água. Nesses locais a qualidade é ruim ou pobre.

4.5 – ANÁLISE DE RISCO E RECOMENDAÇÕES

Levando em consideração os sistemas de classificação RMR e Q, pode-se concluir que o maciço tem uma qualidade razoável a boa, por isso não apresenta grandes riscos de instabilidade. Nas regiões com qualidade razoável não é descartada a necessidade de fiscalização e estudos mais aprofundados e frequentes, pois podem estar em uma situação limítrofe, assim garantindo a estabilidade do maciço. Na Figura 4.17 é possível observar o comportamento da foliação S1 no setor 1, com uma orientação desfavorável, além de uma camada de filito na base, com percolação de água, e os veios boudinados, onde houve extração de ouro.

Perfil Esquemático

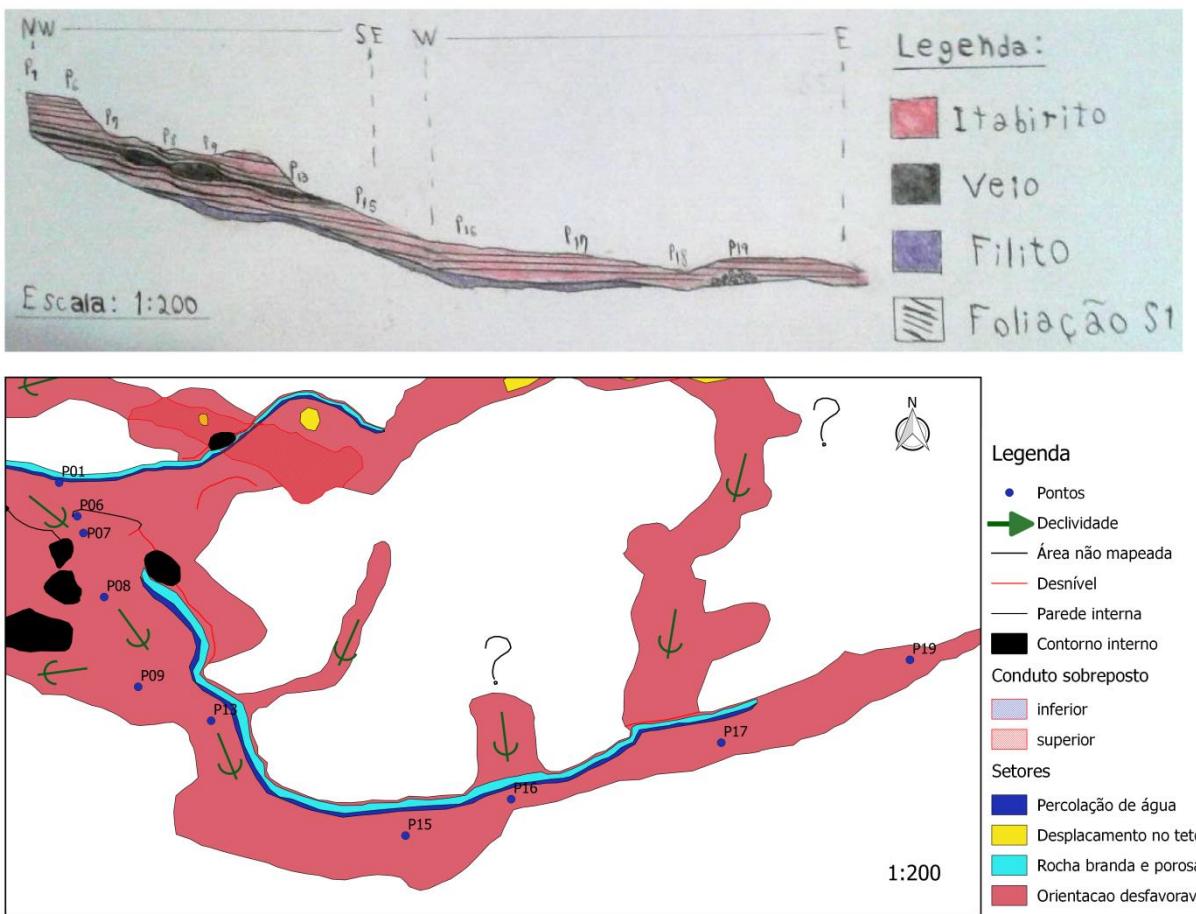


Figura 4.17: Perfil esquemático do setor 1, mostrando o comportamento da foliação S1 em relação a orientação da escavação.

Além das classificações dos sistemas RMR e Q, a interpretação visual de campo também foi muito importante, pois estes sistemas não são capazes de analisar regiões particulares e sim de um aspecto geral do maciço. Por isso, na análise de risco, foram levadas em conta não só os sistemas de classificação, mas também a análise visual de campo.

Com isso, além do setor 4, que apresenta qualidade ruim, por ser uma rocha branda, porosa e com percolação de água, há também os locais de cor amarela e azul escura que correspondem a regiões que apresentam deslocamento de lascas no teto e percolação de água, respectivamente, e que podem ser visualizados no perfil esquemático (Anexo 2). A partir da análise desses parâmetros, presença de falha, grau de fraturamento, percolação de água, resistência da rocha, deslocamento, foi gerada uma carta de risco (Anexo 3), que mostra as regiões de baixo risco e as regiões com risco moderado de instabilidade, sendo este apenas o rompimento de pequenas de lascas, que causaria um pequeno acidente, ou o escorregamento de algum indivíduo em regiões com gotejamentos de água. Nessas regiões,

onde há desplacamento no teto, seria aconselhável, por exemplo, um revestimento com massa ou concreto, preferencialmente com pequenos tirantes em conjunto com um plano de fiscalização adequado. Onde há gotejamento, seria ideal a adequação de um piso antiderrapante em conjunto com um bom sistema de drenagem, além de estudos da superfície e subsuperfície para se entender melhor o comportamento hídrico da região, para então se verificar a interferência da percolação de água na estabilidade do maciço.

5 – CONCLUSÕES

Ao final desse trabalho foi possível concluir que as galerias, antigas minas subterrâneas em sua maioria, necessitam de um estudo geotécnico para garantir verificação da sua estabilidade e segurança. Deve-se ter um maior rigor se a galeria está sendo utilizada de algum modo ou se está inserida em meio urbano. Tal exigência se deve ao fato de Ouro Preto fazer parte de uma região com aspectos fisiográficos que favorecem escorregamentos ou instabilidade de maciços, que marcam a história da cidade.

A setorização da mina foi de extrema importância para se obter uma boa análise, visto que o maciço apresenta comportamentos diferentes em cada setor, dependentes de características como: resistência e coesão da rocha, quantidade e comportamento das descontinuidades, presença de água, relação da orientação da galeria x atitude das descontinuidades, etc. Deve-se evitar uma interpretação generalizada do maciço, que pode gerar equívocos nas análises.

De uma maneira geral, o maciço foi interpretado por ter qualidade razoável ou boa, não apresentando grandes riscos de instabilidade. Porém não é descartada a necessidade de fiscalização e estudos frequentes, além de pequenas medidas preventivas nas regiões que apresentam um risco moderado de instabilidade.

Apesar dos sistemas de classificação RMR e Q terem sido bem executados, apresentando um bom resultado, foi notória a necessidade da interpretação e análise visual de campo na avaliação dos possíveis riscos, assim como na indicação de recomendações de medidas preventivas.

Foi gerada uma carta de risco de instabilidade, que mostra as áreas de baixo risco e as áreas de risco moderado, que necessitam de maior cuidado, além de perfis esquemáticos, apresentando as principais estruturas, como foliação, falhas, fraturas, principais litologias, áreas com deslocamento de lascas ou percolação de água.

Referências

Softwares

Google Earth 2016

Qgis

Stereonet OpenStereo

Teses e Dissertações

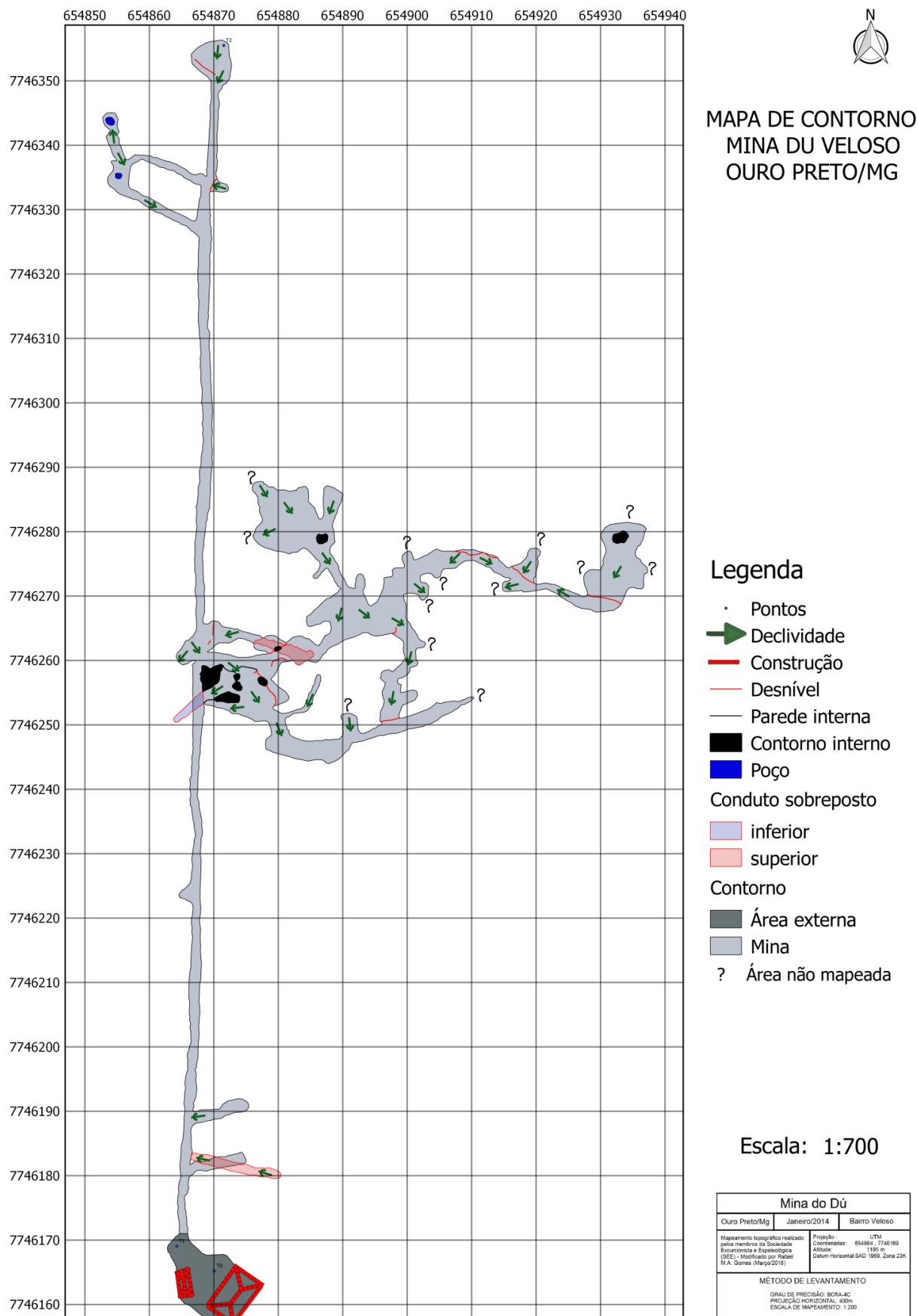
- Ávila, C. R., 2012. *Determinação das propriedades mecânicas de maciços rochosos e/ou descontinuidades utilizando classificações geomecânicas – uma comparação entre os diversos métodos de classificação.* Núcleo de Geotecnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado.
- Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. 1974. *Engineering classification of rock masses for the design of rock support.* Rock Mechanics and Rock Engineerin, Vienna, v. 6, p.189-236.
- Bieniawski, Z. T. 1989. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering.* Canada, 251p.
- Carvalho Filho, A., Curi, N., Shinzato, E. 2010. *Relações solo-paisagem no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais.* Pesq. agropec. bras., Brasília, v.45, n.8, p.903 - 916.
- Cavalcanti, J. A. D. 1999. *Mineralização aurífera de Lages-Antônio Dias, Ouro Preto-MG, controles lito-estratigráficos e estruturais.* Campinas, SP.: [s.n.].
- Cavalcanti, J. A. D. 2003. *Origem dos turmalinitos auríferos da regiao sudeste do Quadrihitero Ferrifero- MG: evidências de campo, petrografia, química mineral e dados isotópicos de Nd e Sr.* Campinas, SP.: [s.n.].
- Corgosinho, T. C. 2012. *Análise do controle litoestrutural do depósito aurífero de Felipe dos Santos,Morro da Queimada, flanco sul do Anticlinal de Mariana, Quadrilátero Ferrífero - MG.* Universidade Federal de Ouro Preto, DEGEO, Ouro Preto, Monografia de Graduação.
- Deere, D. U. *Geological considerations.* In: Noce, T., S. 2016. *Proposta de zoneamento geotécnico de cavidades naturais em formações ferríferas.* DEGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado.
- Franklin, J. A. 1985. *Suggested method for determining point load strength.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 22, n. 2, p. 51-60.
- Gair, J.E. 1962. *Geology and ore deposits of Nova Lima and Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil.* USGS Professional Paper, 341-A, 67p.
- Gomes M. V. 2012. *Estratigrafia e estrutura das unidades paleoproterozoicas expostas entre as serras de Ouro Preto e Itacolomi, área de Ouro Preto, MG.* Universidade Federal de Ouro Preto, DEGEO, Ouro Preto, Monografia de Graduação.
- Harder, E.C., Chamberlin, R.T. 1915. *The geology of central Minas Gerias, Brazil.* Journal Geology, v.23, n.4 p. 341 - 378.
- Hoek, E. 1994. *Strength of rock and rock masses.* ISRM New Journal 2(2), p. 4-16.
- Kahraman, S. 2001. *Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 38, p. 981-994.
- Noce, T., S. 2016. *Proposta de Zoneamento Geotécnico de Cavidades Naturais em Formações Ferríferas.* Universidade Federal de Ouro Preto, DEGEO, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado.
- Oliveira, L D. 2010. *Ocupação urbana de Ouro Preto de 1950 e 2004 e atuais tendências.* Universidade Federal de Ouro Preto, DEGEO, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado.
- Palmstrom, A. 1982. *The volumetric joint count – a useful and simple measure of the degree of jointing.* In: Noce, T., S. 2016. *Proposta de zoneamento geotécnico de cavidades naturais em formações ferríferas.* DEGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado.

- Borba, R., P. et al. 2004. *Arsênio na água subterrânea em Ouro Preto e Mariana, Quadrilátero Ferrífero (MG)*. Revista Escola de Minas, Ouro Preto.
- SERRA, E. J., OJIMA, L. M. *Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos*. In: Noce, T., S. 2016. *Proposta de zoneamento geotécnico de cavidades naturais em formações ferríferas*. DEGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado.
- Sobreira, F. G. et al. 2014. *Divulgação do acervo arqueológico de mineração no período colonial em Ouro Preto e Mariana*. Rev. Ciênc. Ext. v.10, n.1, p.17-36.
- Sobreira, F.G. et al. 2001. *Ação antrópica e processos em encostas em Ouro Preto, Brasil*. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia.
- Wickham, G.E., Tiedemann, H.R. and Skinner, E.H. .1972. *Support determination based on geologic predictions*. In Proc. North American rapid excav. Tunneling conf., Chicago, (eds K.S. Lane and L.A. Garfield), 43-64. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.

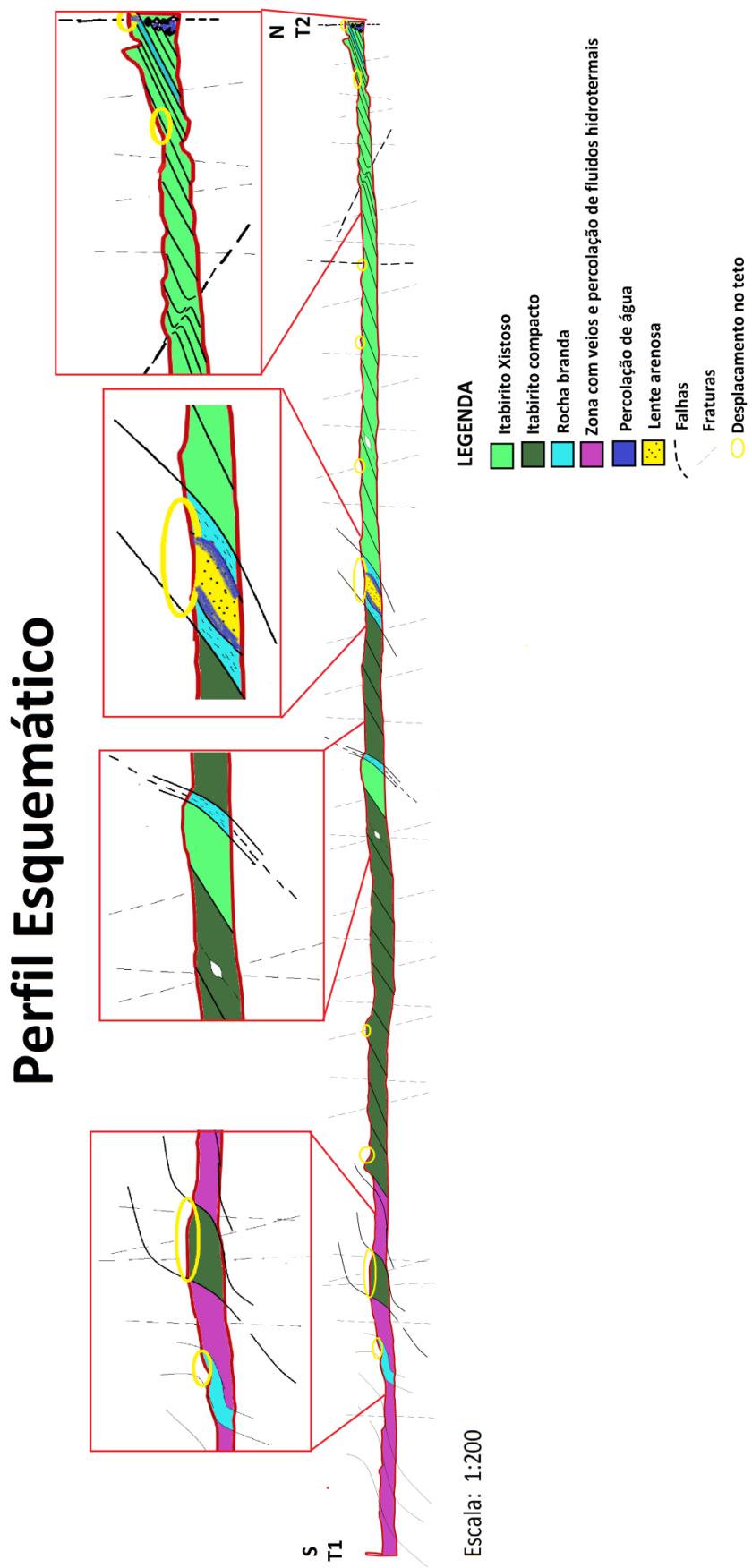
Livros

- IGA, 1995b. Secretaria de Estado de ciência, tecnologia e meio ambiente. 1995a. *Desenvolvimento ambiental de Ouro Preto – Microbacia do Ribeirão do Funil*. Belo Horizonte, CETEC - Minas Gerais.
- ISRM, International Society for Rock Mechanics. 2007. *Suggested Method for Point Load Strength*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 325, n. 89, p. 53-60.
- ISRM, International Society for Rock Mechanics. 1981. *Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 18, n. 1, p. 87-110.
- CPRM. 2012. *Geoparques do Brasil – Propostas*, Vol I, Cap 7.

ANEXO 1: Mapa de contorno da mina



ANEXO 2: Perfil Esquemático do conduto principal T1 - T2



Anexo 3: Carta de Risco de Instabilidade

