



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



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE PERIGO DE ABATIMENTO DAS  
EDIFICAÇÕES SOBRE CAVIDADES ORIUNDAS DA EXPLORAÇÃO  
MINERÁRIA NO DISTRITO SEDE DO MUNICÍPIO DE OURO PRETO –  
MINAS GERAIS**

**Dorval Coelho Horta**

**MONOGRAFIA nº 353**

Ouro Preto, dezembro de 2019



**IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE PERIGO DE  
ABATIMENTO DAS EDIFICAÇÕES SOBRE CAVIDADES  
ORIUNDAS DA EXPLORAÇÃO MINERÁRIA NO DISTRITO  
SEDE DO MUNICÍPIO DE OURO PRETO – MINAS GERAIS**

---





## **FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

### **Reitora**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida Marlière de Lima

### **Vice-Reitor**

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

### **Pró-Reitora de Graduação**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Tânia Rossi Garbin

### **ESCOLA DE MINAS**

#### *Diretor*

Prof. Dr. Issamu Endo

#### *Vice-Diretor*

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### *Chefe*

Prof. MSc. Edison Tazava



# **MONOGRAFIA**

**Nº 353**

## **IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DE PERIGO DE ABATIMENTO DAS EDIFICAÇÕES SOBRE CAVIDADES ORIUNDAS DA EXPLORAÇÃO MINERÁRIA NO DISTRITO SEDE DO MUNICÍPIO DE OURO PRETO – MINAS GERAIS**

**Dorval Coelho Horta**

*Orientadora*

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rosyelle Cristina Corteletti**

*Co-Orientadora*

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Augusta Gonçalves Fujaco**

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2019/2.

**OURO PRETO**

**2019**

---

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

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.

Revisão geral: Dorval Coelho Horta

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

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

H821i Horta, Dorval Coelho .

Identificação e análise de perigo de abatimento das edificações sobre cavidades oriundas da exploração minerária no distrito sede do município de Ouro Preto – Minas Gerais. [manuscrito] / Dorval Coelho Horta. - 2019.  
73 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Rosyelle Cristina Corteletti.

Coorientadora: Profa. Dra. Maria Augusta Gonçalves Fujaco.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.

1. Geotecnia. 2. Engenharia geotécnica. 3. Minas e mineração. I. Corteletti, Rosyelle Cristina. II. Fujaco, Maria Augusta Gonçalves. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.13

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

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

## Ficha de Aprovação

---

### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

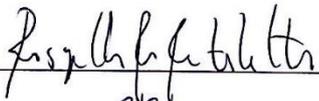
**TÍTULO:** Identificação e Análise de Perigo de Abatimento das Edificações sobre Cavidades oriundas da Exploração Minerária no Distrito Sede do Município de Ouro Preto – Minas Gerais

**AUTOR:** DORVAL COELHO HORTA

**ORIENTADORA:** Prof. Dr<sup>a</sup>. Rosyelle Corteletti

**Aprovado em:** 18 de dezembro de 2019

#### BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr<sup>a</sup>. Rosyelle Cristina Corteletti  \_\_\_\_\_ NUGEO/UFOP

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima  \_\_\_\_\_ DEMIN/UFOP

MSc. Charles Romazâmu Murta  \_\_\_\_\_ DEFESA CIVIL DE OURO PRETO

Ouro Preto, 18/12/2019



## Agradecimentos

---

Agradeço primeiramente à Deus, por sempre guiar meus passos. À minha querida mãe, pelo amor e cuidado que me trouxeram até aqui. Ao meu pai, eterno exemplo, e hoje anjo protetor. Aos meus irmãos Natália e Fernando, pela cumplicidade e apoio de sempre. À doce Lulu, por trazer mais amor e união à nossa família. Ao Fábio, Gê e Carol por sempre estarem presentes. Aos meus queridos avós, tios (as), primos (as); em especial Tia Babi por ser minha segunda mãe e ao saudoso Tio Marquinho por caminhar comigo. À Júlia, pelo companheirismo e confiança.

Aos amigos de Jaguaraçu, Timóteo, Fabriciano e Teófilo Otoni, pelos bons momentos. Aos irmãos de período, em especial, à Geologia 14.1: Fê, Bela, Bebele, Belinha, Bruna, Mari, Tampinha, Trágica, João e Castidade. À Geogalera e aos amigos de Ouro Preto, em especial, Ruan, Tramela, Uni, Pixi, Lívia, Mí, Marcela, Tite e Elis. A todas as repúblicas amigas, principalmente república Seleta, pelo acolhimento e amizade. À SICEG - Chapa Sísmica, pelo aprendizado e união. À UFOP e aos Mestres, pela oportunidade e ensinamentos; em especial à querida Maria Paula. Por fim, gostaria de agradecer aos irmãos que a vida ouropretana me trouxe: José Hamilton, Iago, Jairo e Uriel por dividirem momentos felizes e incertos.

À Rosyelle, pelos ensinamentos, orientação e amizade e principalmente pela sua grandiosidade como ser humano e profissional. A todos do Núcleo de Geotecnia (NUGEO) e Defesa Civil de Ouro Preto, que contribuíram cada um de alguma forma para o meu crescimento pessoal e profissional. Ao Hernani, pela atenção e disponibilização do banco de dados de cavidades.

Por fim, agradeço ao Departamento de Geologia, à Escola de Minas, à Universidade Federal de Ouro Preto e à Fundação Gorceix, por terem me proporcionado um ensino público superior de qualidade durante toda a minha graduação.

Meus sinceros agradecimentos. Minha gratidão a vocês que estiveram comigo, essa conquista é nossa!



# SUMÁRIO

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>ix</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xvii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xxi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 JUSTIFICATIVA .....	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1 ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS.....	5
2.1.1 Cavidades naturais .....	5
2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE ROCHA.....	6
2.2.1 Rocha intacta.....	7
2.2.2 Parâmetros geomecânicos.....	7
2.2.3 Descontinuidades .....	10
2.3 MOVIMENTO DE MASSA GRAVITACIONAL .....	11
2.3.1 Solapamentos .....	11
2.4 ROCHAS BRANDAS.....	12
<b>3 ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>15</b>
3.1 REGIÃO URBANA DO DISTRITO SEDE DE OURO PRETO .....	15
3.1.1 Breve história da mineração.....	15
3.1.2 O processo de ocupação.....	17
3.1.3 Contexto geológico regional .....	21
3.1.4 Contexto geológico do distrito sede de Ouro Preto .....	24
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	29
4.2 LEVANTAMENTO DE BANCO DE DADOS.....	29
4.3 TRATAMENTO DE IMAGEM SIG .....	29
4.4 FICHA DE CAMPO.....	29
4.5 ATIVIDADES DE CAMPO .....	32
4.6 ANÁLISE DE PERIGO E ABATIMENTO .....	32

<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>33</b>
5.1	LEVANTAMENTO DO BANCO DE DADOS.....	33
5.2	ATIVIDADES DE CAMPO.....	36
<b>6</b>	<b>DISCUSSÕES.....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>61</b>
<b>8</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>63</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.1</b> - Localização da área de estudo. À esquerda mapa de Ouro Preto, delimitando seu distrito sede, e à direita localização do município no estado de Minas Gerais (inferior) e no mapa do Brasil (superior) (modificado de Oliveira 2010).....	2
<b>Figura 2.1</b> - Perfis de rugosidade (ISRM 1983). .....	11
<b>Figura 2.2</b> - Esquema de subsidência e colapso (modificado de Cemaden 2018). .....	12
<b>Figura 2.3</b> - Espectro geotécnico dos materiais geológicos, demonstrando os limites entre solos, rochas brandas e rochas duras (retirado de Pinho 2003).....	13
<b>Figura 3.1</b> - Desenho do processo de ocupação realizada na cidade, denominado Caminho Tronco (retirado de Dos Anjos 2018). .....	17
<b>Figura 3.2</b> - Evolução da ocupação a partir do caminho tronco (modificado de Oliveira 2010). .....	18
<b>Figura 3.3</b> - Áreas mineradas no Distrito Sede de Ouro Preto (retirado de Oliveira 2010). ...	20
<b>Figura 3.4</b> - Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Alkmim & Marshak 1998). O quadrado branco identifica a região do distrito sede do município de Ouro Preto – MG.....	21
<b>Figura 3.5</b> - Coluna estratigráfica da sequência supracrustal no Quadrilátero Ferrífero (retirado de Farina <i>et al.</i> 2015).....	22
<b>Figura 3.6</b> - Mapa geológico simplificado da região onde está localizada a cidade de Ouro Preto (modificado de Baltazar <i>et al.</i> 2005).....	26
<b>Figura 3.7</b> - Seção geológica esquemática com a disposição geral das principais unidades litológicas (modificado de CPRM 2016). .....	27
<b>Figura 4.1</b> - Ficha de descrição de campo, utilizada nas vistorias às cavidades e edificações (frente).....	30
<b>Figura 4.2</b> – Tabelas utilizadas na ficha de descrição de campo, utilizada nas vistorias às cavidades e edificações (verso).....	31
<b>Figura 5.1</b> - Mapa de distribuição das cavidades nos bairros do distrito sede do município de Ouro Preto - MG. ....	33

<b>Figura 5.2</b> - Gráfico de relação da quantidade de cavidades por bairro de Ouro Preto - MG.	34
<b>Figura 5.3</b> - Gráfico de correlação do litotipo presente nas cavidades mapeadas no distrito sede do município de Ouro Preto – MG, em percentual.....	35
<b>Figura 5.4</b> - Cavidades localizadas próximas ao cruzamento da rua Santa Rita com a rua Maciel. ....	36
<b>Figura 5.5</b> - Cavidades localizadas na rua Santa Rita, com edificação em uso sobre a escavação. ....	37
<b>Figura 5.6</b> - Porção interna da cavidade, onde pode-se observar o bandamento do itabirito.	38
<b>Figura 5.7</b> - Fraturas localizadas na porção interna da cavidade, com abertura de 0,6m. ....	38
<b>Figura 5.8</b> - Cavidade de itabirito localizada na rua Santa Rita, com edificação em uso ao lado. ....	39
<b>Figura 5.9</b> - Cavidades localizadas na rua Santa Rita, com edificações em uso 2m acima. ....	40
<b>Figura 5.10</b> – Fratura observada na cavidade, com abertura de, aproximadamente, 0,1m. ....	40
<b>Figura 5.11</b> - Edificação com três pavimentos, construída ao lado de uma cavidade. ....	41
<b>Figura 5.12</b> - Fratura preenchida por cimento, próximo às cavidades descritas.....	41
<b>Figura 5.13</b> - Água nascente no itabirito constituinte da cavidade localizada na rua Santa Rita. ....	42
<b>Figura 5.14</b> - Identificação de edificações acima e ao lado da cavidade. ....	43
<b>Figura 5.15</b> - Mina do Padre Faria, cavidade de itabirito localizada na rua Santa Rita.....	44
<b>Figura 5.16</b> - Cavidade localizada no bairro Barra, próxima ao Centro de Convenções da UFOP. ....	45
<b>Figura 5.17</b> - Cavidade localizada no bairro Morro Santana, com vegetação densa acima da escavação. ....	46
<b>Figura 5.18</b> - Encontro de duas famílias de fraturas, formando estrutura em cunha, no itabirito. ....	46
<b>Figura 5.19</b> - Acesso para a cavidade abaixo da escada existente na área. Ponto localizado no bairro São Francisco. ....	47

<b>Figura 5.20</b> - Abertura da cavidade existente no litotipo quartzo-sericita xisto. Observa-se forte alteração nas paredes da escavação. ....	48
<b>Figura 5.21</b> - Planos de fraturas existentes na cavidade, formando estruturas em cunha. ....	49
<b>Figura 5.22</b> - Interior da cavidade quartzítica, onde pode-se notar a presença de veio de quartzo em seu interior. ....	50
<b>Figura 5.23</b> - Contato observado próximo à abertura da cavidade. O zoom evidencia o quartzito sobre o xisto. ....	50
<b>Figura 5.24</b> - Deslocamento observado no teto da cavidade composta por quartzo-sericita xisto. ....	51
<b>Figura 5.25</b> - Edificação paralela às cavidades visitadas, distante 10m da ocorrência 1 (quartzítica) e 14,7m da escavação 2 (xistosa).....	51
<b>Figura 5.26</b> - Cavidade localizada no quintal da República Xamego; porção constituída por itabirito. ....	52
<b>Figura 5.27</b> - Galeria de quartzo-sericita xisto, porção final da cavidade, com deslocamento do teto. ....	53
<b>Figura 5.28</b> - Famílias de fraturas observadas próximo à entrada da cavidade, no litotipo composto por itabirito. ....	53
<b>Figura 5.29</b> - Cavidade constituída por itabirito, com altura medida de 3,2m, localizada próximo ao mirante do Morro São Sebastião.....	54
<b>Figura 5.30</b> - Edificação distante cerca de 4m acima da abertura da cavidade localizada no Morro São Sebastião. ....	55
<b>Figura 5.31</b> - Porção constituída por quartzo-sericita xisto (abaixo) em contato com itabirito no interior da mina. ....	56
<b>Figura 5.32</b> - Bifurcações existentes no interior da Mina do Savinho, localizada no bairro Antônio Dias. ....	56
<b>Figura 5.33</b> - Deslocamento do teto da cavidade, existente nas porções constituídas por quartzo-sericita xisto. ....	57

**Figura 5.34** - Edificações existentes sobre cavidade turística do bairro Antônio Dias. A seta mostra a entrada para a visitação da Mina do Chico Rei..... 57

## ÍNDICE DE TABELAS

---

<b>Tabela 2.1</b> - Classificação quanto ao grau de resistência à compressão uniaxial (modificado de Neto 2016).....	8
<b>Tabela 2.2</b> - Classificação quanto ao grau de alteração do maciço (modificado de Neto 2016). .....	8
<b>Tabela 2.3</b> - Classificação quanto ao grau de coerência da rocha (modificado de Neto 2016).	9
<b>Tabela 2.4</b> - Classificação quanto ao grau de fraturamento do maciço (modificado de Neto 2016).....	9
<b>Tabela 3.1</b> - Fase cronológica de ocupação da cidade de Ouro Preto (retirado de Revista CPC – Centro de Preservação Cultural, USP – 2016). .....	18
<b>Tabela 3.2</b> - Estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero com a apresentação do contexto geológico da Cidade de Ouro Preto (modificado de Cavalcanti 1999 apud Oliveira 2010). .....	25
<b>Tabela 5.1</b> – Número de cavidades localizadas em cada bairro do distrito sede do município de Ouro Preto – MG.....	34
<b>Tabela 5.2</b> - Número de cavidades encontradas em cada litotipo identificado. Informações obtidas a partir do banco de dados disponibilizado pelo professor Dr. Hernani Mota. ....	35
<b>Tabela 5.3</b> - Coordenadas e litotipos das cavidades visitadas durante as atividades de campo do presente trabalho. ....	58



## Resumo

---

O distrito sede do município de Ouro Preto/MG apresenta em seu histórico geológico-geotécnico, grandes eventos relativos a movimentos de massa. A ocupação urbana desordenada, associada ao relevo acidentado da Serra de Ouro Preto e às características litológicas e estruturais do Quadrilátero Ferrífero, intensifica o risco de danos à população. Estudos apontam a interferência da exploração minerária na forma das encostas do Distrito, que registram escavações subterrâneas originadas para extração de ouro e ferro na região. Esta pesquisa visa a identificação de cavidades oriundas dessas escavações e a correlação com as áreas povoadas, a fim de detectar o risco de abatimento de edificações que se encontram sobre as cavidades e, com isso, proporcionar o gerenciamento das áreas de risco do município. Nota-se que as ocorrências de escavações na sede de Ouro Preto estão atreladas aos litotipos itabirito Cauê, quartzito Cercadinho e xisto Nova Lima. Os parâmetros geomecânicos identificam rochas resistentes, marcadas por muitos planos de descontinuidades, e rochas brandas, com deslocamento do material no teto das cavidades; que propiciam o abatimento de blocos. A sobrecarga das edificações sobre essas ocorrências acelera o possível colapso das estruturas que, na maioria das vezes, se dá de forma lenta e silenciosa; o que torna imprescindível o estudo e monitoramento, no intuito de antecipar possíveis danos ao município e à população.

**Palavras chave:** geotecnia, cavidades, abatimento, exploração minerária.



## **Abstract**

---

The main district of Ouro Preto / MG presents in its geological-geotechnical history, major events related to mass movements. The disordered urban occupation, associated with the rugged relief of the Serra de Ouro Preto and the lithological and structural characteristics of the Quadrilátero Ferrífero, intensifies the risk of damage to the population. Studies point to the interference of mining exploration in the form of the slopes of the District, which record underground excavations originated for gold and iron extraction in the region. This research aims to identify cavities from these excavations and to correlate them with populated areas, in order to detect the risk of buildings falling over the cavities and, thus, to manage the risk areas of the municipality. It is noted that the occurrences of excavations at the Ouro Preto headquarters are linked to the Cauê itabirite, Cercadinho quartzite and Nova Lima schist lithotypes. The geomechanical parameters identify resistant rocks, marked by many discontinuity planes, and soft rocks, with material decay in the cavity ceiling; that provide the abatement of blocks. The overload of buildings on these occurrences accelerates the possible collapse of structures that, in most cases, occur slowly and quietly; which makes the study and monitoring indispensable, in order to anticipate possible damages to the city and the population.

**Key words:** geotechnics, cavities, abatement, mining.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 APRESENTAÇÃO

A cidade de Ouro Preto/MG, Patrimônio Cultural da Humanidade, tem em seu contexto geológico-geotécnico, um dos cenários brasileiros de grandes probabilidades a eventos relativos a movimentos de massa. O distrito sede do município se desenvolveu em um cenário de relevo acidentado, onde o núcleo urbano está entre serras com características distintas. A geologia da cidade é marcada por litologias que se correlacionam com a superposição de várias deformações que configuram a estruturação geológica do Quadrilátero Ferrífero.

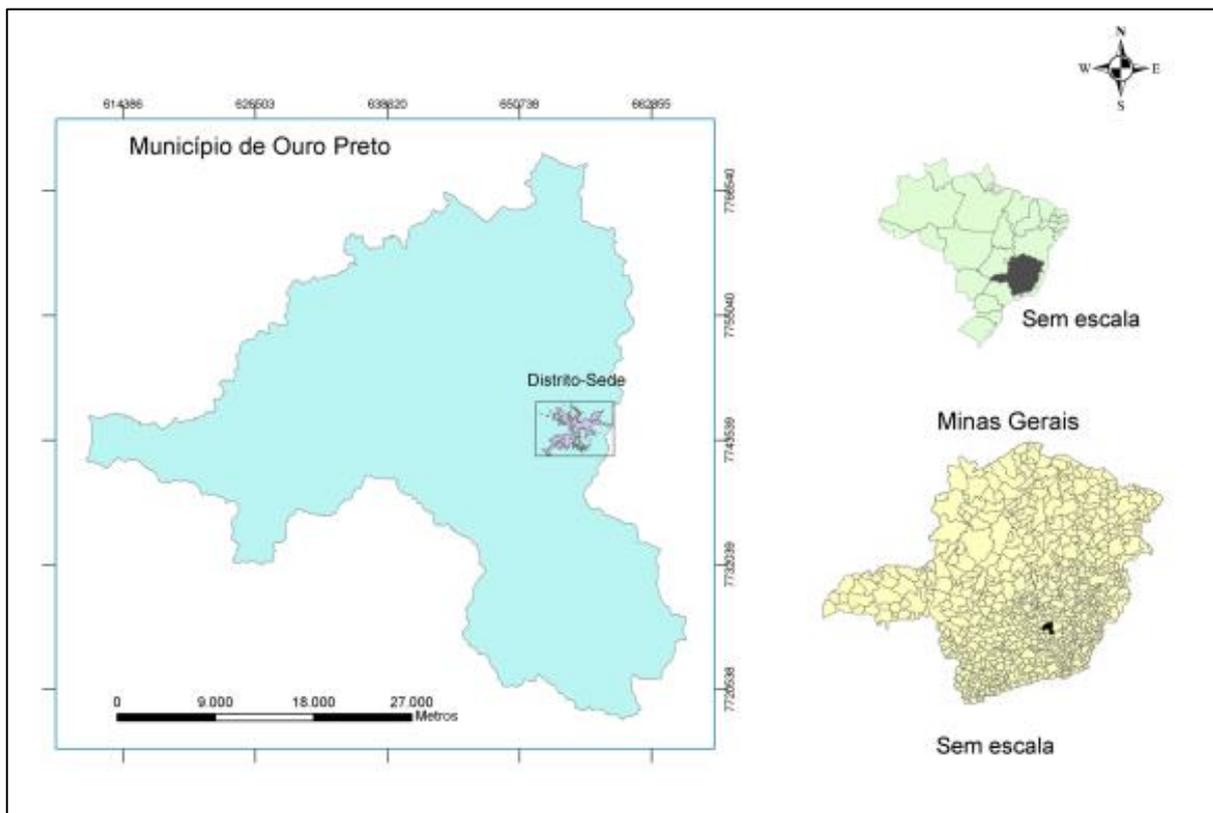
Diversos estudos descrevem como a atividade da mineração interferiu na forma das encostas da cidade de Ouro Preto. As características da mineração do ouro ocorridas nos séculos XVII e XVIII na Serra de Ouro Preto, apontam que essas áreas guardam registros das atividades passadas como ruínas, escavações subterrâneas, “buracos de sarilho”, mundéus, canais de condução de água e até artefatos usados no processo de extração do ouro (Oliveira 2010). Esses locais minerados são considerados sítios arqueológicos e patrimônios arqueológicos do Município, no entanto vêm sofrendo descaracterização com a ocupação urbana desordenada nessas áreas. Este conflito de uso acarretam a degradação do patrimônio arqueológico, mas sobretudo na instabilidade dos terrenos alterados pela mineração, levando perigo de abatimentos a essas construções, e conseqüentemente às vidas de seus moradores.

Diante deste contexto, este estudo visa identificar e catalogar as cavidades oriundas de escavações minerárias e correlacionar com as áreas ocupadas, buscando caracterizar as litologias principais existentes, assim como sua caracterização geomecânica. Acredita-se que há mais de 100 cavidades na área urbana sob edificações. Algumas foram catalogadas, porém as informações estão dispersas, logo não é possível saber com exatidão a quantidade real existente e suas localizações.

Procura-se ainda alimentar o Banco de dados da Defesa Civil de Ouro Preto com essas informações, a partir do desenvolvimento de ficha de caracterização padronizada, colaborando dessa forma no gerenciamento das áreas de risco do Município. Este trabalho está inserido no projeto “Identificação das áreas de risco do distrito sede do município de Ouro Preto” firmado entre o Núcleo de Geotecnia (NUGEO) da UFOP e a Prefeitura de Ouro Preto.

## 1.2 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo é o distrito sede do município de Ouro Preto, localizado na porção sudeste do estado de Minas Gerais (Figura 1.1), a cerca de 100 km da capital do estado (Belo Horizonte). O acesso se dá, a partir da capital, pela rodovia BR 040 sentido Rio de Janeiro até o cruzamento com a rodovia BR 356 (Rodovia dos Inconfidentes), seguindo até o distrito sede de Ouro Preto.



**Figura 1.1** - Localização da área de estudo. À esquerda mapa de Ouro Preto, delimitando seu distrito sede, e à direita localização do município no estado de Minas Gerais (inferior) e no mapa do Brasil (superior) (modificado de Oliveira 2010).

## 1.3 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é identificar, caracterizar e correlacionar as cavidades oriundas da exploração minerária que podem afetar a área urbana no distrito sede do município de Ouro Preto; e alimentar o Banco de dados da Defesa Civil da cidade, colaborando, dessa forma, no gerenciamento das áreas de risco do Município.

Além disso, como objetivos específicos têm-se:

- A identificação das principais litologias e sua classificação geomecânica nas cavidades;

- A elaboração de uma ficha de campo para caracterização da cavidade, e de seu entorno imediato, assim como das edificações existentes afetadas.

O trabalho possui o intuito de padronização de dados, a fim de contribuir para o aprimoramento do mapeamento geológico-geotécnico e compreensão do risco geotécnico associado às cavidades.

#### **1.4 JUSTIFICATIVA**

No contexto nacional, no aspecto de históricos de eventos catastróficos, Ouro Preto se destaca por possuir um quadro recorrente de eventos relativos a movimentos gravitacionais de massa. As ocupações em áreas de alto risco geológico-geotécnico condicionado por suas características físico-territoriais e climáticas são os aspectos que mais contribuem para este cenário.

A serra de Ouro Preto, além de possuir um contexto geológico-geotécnico complexo, historicamente sofreu grandes modificações do seu relevo devido a exploração do ouro no século XVII e XVIII e à exploração do ferro a partir da década de 50, gerando detritos ao longo da serra, oriundos do desmonte hidráulico para a exploração do ouro, além das escavações subterrâneas e buracos de sarilho. A ocupação desordenada e irregular gera os principais eventos instabilizadores das encostas da cidade, desde cortes de taludes sem critérios técnico, até sobrecarga no terreno sobre aterros e cavidades existentes, gerando neste caso abatimento dessas estruturas.

O distrito sede do município não possui registro das casas e áreas que podem ser afetadas pelo abatimento de cavidades, expondo dessa forma a população há um risco eminente sem nenhum controle ou programa de identificação dessas residências e retiradas da população nestas áreas. A identificação destas áreas e casas auxiliará a Defesa Civil do município na fiscalização, além de auxiliar no programa de gerenciamento de risco.



#### 2.1 ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

As escavações subterrâneas permitem a otimização do espaço, tanto em áreas urbanas como zonas montanhosas e, ainda, como acesso à mineração, para extração do minério. Entretanto, essas obras subterrâneas devem ser bem projetadas para que colapsos sejam evitados. Colapsos de estruturas e acidentes devem ser estudados para propiciar avanço de métodos construtivos e de sustentação de escavações em engenharia. Além da realização da escavação, é importante verificar as questões de necessidade de suporte, revestimento, tratamento e monitoramento/instrumentação (Silva 2018).

A caracterização do material sobre o qual se construirá é imprescindível para orientar a construção, as necessidades futuras de manutenção e riscos durante o uso. Há diversos mecanismos de suporte (como arcos e ancoragens) ou revestimento de aberturas (como telas, concreto simples, concreto reforçado), modos de preparação desses elementos e resistências intrínsecas que caracterizam a estrutura de sustentação da escavação. São fatores determinantes na estabilidade de escavações subterrâneas em maciços rochosos: propriedades e características inerentes ao maciço rochoso ao redor da escavação, tais como solo, rocha, material inconsolidado e presença de discontinuidades e percolação de água; tensões (e forças externas atuantes) in situ, que são funções de sua profundidade e ambiente geológico; e as características da escavação (Silva 2018).

As cavidades subterrâneas em estudo são fruto de processos naturais e práticas de mineração. A mineração subterrânea, em alguns casos, utiliza dessas cavidades naturais e, em outros, são implementadas por meio da escavação do terreno, envolvendo múltiplas aberturas que se mantêm por um período relativamente mais curto, onde realiza-se a proteção durante a escavação e controla deformações no maciço rochoso.

##### 2.1.1 Cavidades naturais

As cavidades naturais subterrâneas ou cavernas abrangem um complexo sistema de canais horizontais e verticais subterrâneos formados pela ação da água sobre a rocha matriz ou pelo desmoronamento de rochas.

De acordo com o Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990, art. 1º, cavidade natural subterrânea é “todo e qualquer espaço subterrâneo acessível pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, popularmente conhecido como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, furna ou buraco,

incluindo seu ambiente, conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora ali encontrados e o corpo rochoso onde os mesmos se inserem, desde que tenham sido formados por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou tipo de rocha encaixante”.

No contexto da região de Ouro Preto, dezenas de cavidades são registradas em rochas siliciclásticas, compreendendo principalmente quartzitos e conglomerados. No entanto, a maior parte das cavernas do Quadrilátero Ferrífero (QF) está contida em rochas ferríferas bandadas do Supergrupo Minas (Oliveira 2011). Essas cavernas estão tanto no interior do itabirito da Formação Cauê, quanto na canga, produto do intemperismo desta formação, ou no contato entre os dois litotipos. Vale ressaltar que existem poucas cavernas conhecidas em rochas carbonáticas, que abrangem dolomitos e calcários, restritas ao QF.

De acordo com Simmons (1963), a gênese de cavernas em minério de ferro provém de processos de dissolução do dolomito, mas também de quartzo e hematita, acarretando a formação de uma zona de minério de ferro alterado de alta porosidade.

Apesar de sua grande importância ecológica, as cavidades naturais subterrâneas estão sujeitas a pressão pelas atividades de mineração que, muitas vezes, aproveitam dessas formações naturais para minerar, causando a total destruição desses ecossistemas. As cavernas de minério de ferro estão particularmente associadas a grandes concentrações do minério e por isso são áreas altamente cobiçadas por mineradoras.

## **2.2 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DE ROCHA**

Do ponto de vista geotécnico, um maciço rochoso é definido como um conjunto de blocos de rocha justapostos e articulados, sendo o material que forma os blocos sua matriz, representada pela rocha intacta, e as superfícies que os limitam, as descontinuidades (Fernandes 2000). Trata-se, na maioria das vezes, de um meio altamente heterogêneo, com uma grande variedade de condicionantes e propriedades geológico-geotécnicas que tornam sua classificação uma tarefa complexa. Dependendo das modificações e solicitações aplicadas, o maciço se comporta de maneiras diferentes, de forma a alcançar o equilíbrio estático de seus blocos, uma vez que as características da rocha e das descontinuidades diferem de local para local em um maciço.

Diversos parâmetros devem ser analisados para um efetivo mapeamento geomecânico de uma cavidade, sendo a análise das descontinuidades considerada o principal parâmetro a ser aferido. Essa análise é utilizada na maior parte dos sistemas de classificação geomecânica de rochas, sendo as descontinuidades definidas como qualquer feição geológica, que determina planos ou superfícies de fraqueza que interrompem a continuidade do maciço, comumente planos de acamamento, superfícies de

foliação, juntas, fraturas e falhas em geral (Fernandes 2000). No entanto, as propriedades da rocha intacta não devem ser desconsideradas, tais como litologia, porosidade, permeabilidade, resistência e estado de alteração e fraturamento, além da presença ou ausência de água e sua taxa de fluxo. Além disso, é necessária uma análise cinemática das descontinuidades aferidas no maciço rochoso, bem como dos blocos delimitados por elas.

Após a descrição das características geológico-geotécnicas do maciço rochoso, valores são atribuídos para a sua compartimentação, a partir dos diversos sistemas de classificação geomecânica existentes, tais como RQD (Rock Quality Designation Index), RMR (Rock Mass Rating), Sistema Q (Rock Tunneling Quality Index), entre outros. Ressalta-se que a variabilidade natural desses maciços não permite uma análise determinística dos parâmetros, sendo necessária a utilização de métodos probabilísticos. Esses sistemas procuram definir, caracterizar, correlacionar e quantificar os parâmetros geomecânicos de um maciço rochoso, sendo o método de caracterização e compartimentação mais utilizado.

### **2.2.1 Rocha intacta**

A caracterização petrográfica do maciço consiste, sobretudo, da análise das suas características litológicas, aliadas ao estudo do estado de alteração e coerência do maciço rochoso. Do ponto de vista geotécnico, a litologia deve ser caracterizada pela sua composição, cor, textura e tamanho dos grãos, sendo indispensável uma caracterização litológica do maciço para uma melhor avaliação das suas propriedades físico-mecânicas. Essas propriedades também são definidas pela ação de processos intempéricos, aferidos de acordo com o grau de alteração e de coerência do maciço rochoso.

### **2.2.2 Parâmetros geomecânicos**

Visando realizar o mapeamento geomecânico dos maciços e a padronização dos métodos de classificação, a ISRM (International Society of Rock Mechanics) propõe algumas tabelas para direcionar a caracterização geomecânica das rochas, as quais servirão de metodologia aplicada na ficha de descrição de campo desenvolvida para este presente trabalho.

A primeira tabela retrata a classificação conforme o grau de resistência do maciço rochoso (Tabela 2.1), ou seja, a consistência a compressão uniaxial da rocha, utilizando ferramentas simples como auxílio do diagnóstico, tais como martelo de geólogo e canivete.

**Tabela 2.1** - Classificação quanto ao grau de resistência à compressão uniaxial (modificado de Neto 2016).

<b>Grau</b>	<b>Denominação</b>	<b>Caracterização</b>	<b>Resistência à compressão uniaxial (Mpa)</b>
R0	Rocha extremamente fraca	Marcada com a unha.	0,25 - 1,0
R1	Rocha muito fraca	Esmigalha-se com golpes firmes com a ponta do martelo de geólogo e pode ser raspada com canivete.	1,0 - 5,0
R2	Rocha fraca	Pode ser raspada com dificuldade com canivete, marcas podem ser feitas superficialmente com a ponta do martelo de geólogo.	5,0 – 25
R3	Rocha mediamente resistente	Não pode ser raspada ou riscada com canivete, mas as amostras podem ser fraturadas com simples golpes de martelo de geólogo.	24 – 50
R4	Rocha resistente	As amostras necessitam de mais que um golpe de martelo de geólogo para se fraturar.	50 – 100
R5	Rocha muito resistente	As amostras necessitam de muitos golpes de martelo de geólogo para se fraturar.	100- 250
R6	Rocha extremamente resistente	As amostras podem somente ser lascadas com o martelo de geólogo.	>250

Outro parâmetro importante refere-se ao grau de alteração do maciço, que está interligado à forma como ocorre a ruptura e a resistência ao cisalhamento da rocha. A ISRM denomina a classificação variando de rocha sã a saprolito, conforme Tabela 2.2.

**Tabela 2.2** - Classificação quanto ao grau de alteração do maciço (modificado de Neto 2016).

<b>Grau</b>	<b>Denominação</b>	<b>Caracterização</b>
A1	Rocha sã	Sem vestígios de alterações físicas e químicas dos minerais principais.
A2	Rocha pouco alterada	Sinais de alteração incipientes dos minerais primários; ligeiramente descolorida. Mesmas propriedades físicas e mecânicas da rocha sã.
A3	Rocha mediamente alterada	Minerais mediamente alterados; bastante descolorida. Propriedades mecânicas inferiores ao "A2", porém ainda resistente.

A4	Rocha muito alterada	Minerais muito alterados, às vezes pulverulentos. Propriedades físicas e mecânicas muito inferiores à "A3".
A5	Rocha extremamente alterada (saproilito)	Minerais constituintes totalmente descompostos, porém, preservando suas estruturas originais. Trechos não recuperados são considerados solo.

A proposta de classificação quanto ao grau de coerência do maciço (Tabela 2.3) baseia-se em características físicas da rocha, tais como resistência ao impacto, resistência ao risco e tenacidade, que podem ser identificadas manualmente ou com ferramentas como martelo de geólogo.

**Tabela 2.3** - Classificação quanto ao grau de coerência da rocha (modificado de Neto 2016).

Grau	Denominação	Caracterização
C1	Rocha muito coerente	Rocha com som metálico, quebra com dificuldades ao golpe do martelo. Sua superfície dificilmente é riscada pelo aço.
C2	Rocha coerente	Rocha com som fraco, quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo. Ao ser riscada pelo aço, deixa sulcos superficiais.
C3	Rocha mediantemente coerente	Rocha com som oco, quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo e com fragmentos dificilmente quebradiços à pressão dos dedos. Sulco leve ao risco de aço.
C4	Rocha pouco coerente (quebradiça)	Rocha quebra com facilidade ao golpe com martelo, bordas dos fragmentos quebram com relativa facilidade manualmente. Sulcos profundos ao risco do aço.
C5	Rocha incoerente (friável)	Rocha esfarela-se ao golpe do martelo, desagregando-se com a pressão dos dedos. Pode ser cortada com o aço, sendo riscada com a unha.

Por fim, o grau de fraturamento é outra característica importante de maciços rochosos. A classificação apresenta cinco denominações que variam entre pouco fraturada e fragmentada, e são medidas pela relação da quantidade de fraturas/metro, como pode ser observado na Tabela 2.4.

**Tabela 2.4** - Classificação quanto ao grau de fraturamento do maciço (modificado de Neto 2016).

Grau	Denominação	Caracterização
F1	Pouco fraturada	< 1 fratura/metro.
F2	Fraturada	1 - 5 fraturas/metro.

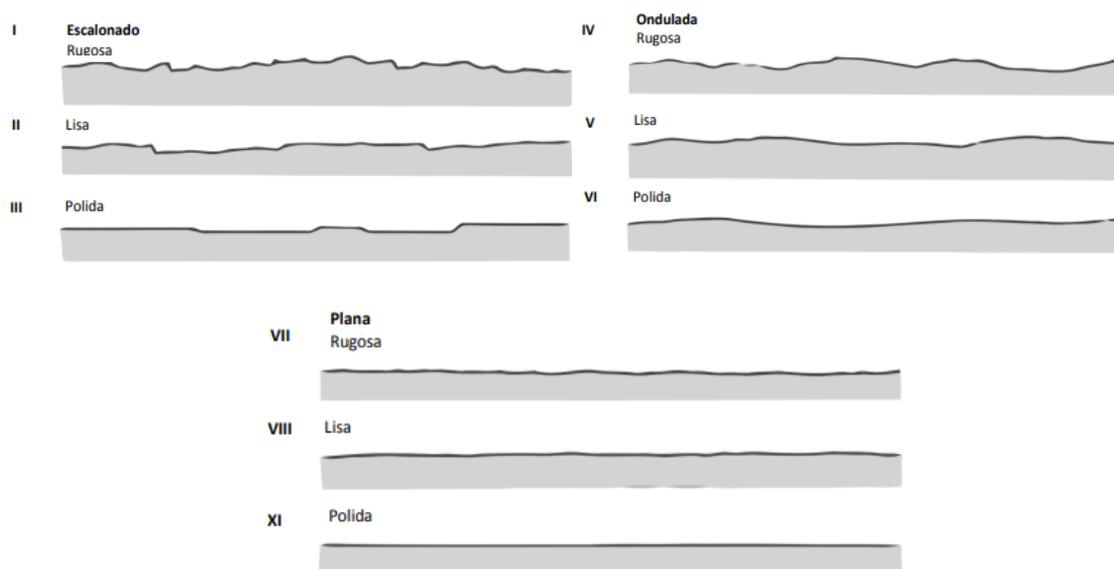
F3	Muito fraturada	5 - 10 fraturas/metro.
F4	Extremamente fraturada	10 - 20 fraturas/metro.
F5	Fragmentada	>20 fraturas/metro.

A classificação geomecânica das rochas constituintes das cavidades visitadas durante as atividades de campo deste trabalho foi baseada nas diretrizes da ISRM, que correlaciona os parâmetros e faixas de valores dentro do sistema de classificação do maciço rochoso RMR.

### 2.2.3 Descontinuidades

Quando se trata de ambientes subterrâneos, deve-se dar ênfase ao estudo das diferentes famílias de descontinuidades, uma vez que elas condicionam as propriedades e a compartimentação dos maciços rochosos em termos de resistência, deformabilidade e coeficiente hidráulico, além de terem o poder de modificar radicalmente o comportamento do maciço.

Devem ser analisados espaçamento, persistência, abertura, preenchimento, resistência das paredes, rugosidade e percolação de água. Segundo a ISRM (1983), o espaçamento e a persistência são, respectivamente, a distância entre duas descontinuidades adjacentes de uma mesma família e a extensão em comprimento da descontinuidade. A abertura é dada pela distância medida na perpendicular entre as paredes de uma descontinuidade. Essa abertura pode estar preenchida, sendo necessário conhecer a natureza do material de preenchimento, uma vez que ele pode afetar consideravelmente o comportamento do maciço rochoso quanto à resistência ao cisalhamento e à deformabilidade. A rugosidade é estimada a partir das ondulações na superfície da descontinuidade, sendo fundamental na análise da resistência ao cisalhamento das suas paredes (Figura 2.1). A resistência das paredes é analisada através do estado de alteração da rocha junto às paredes da descontinuidade, além da análise dos fatores supracitados, como abertura, preenchimento e rugosidade das descontinuidades.



**Figura 2.1** - Perfis de rugosidade (ISRM 1983).

## 2.3 MOVIMENTO DE MASSA GRAVITACIONAL

Movimento gravitacional de massa (MGM) é caracterizado como o movimento do solo/rocha ao longo da vertente sob ação direta da gravidade, sendo que a presença de outros fatores, como por exemplo água ou gelo, contribui reduzindo a resistência dos materiais no talude e/ou induzem o solo a um comportamento plástico e fluido (Tominaga *et al.* 2009).

Esses processos são desencadeados por uma complexa relação entre uma série de fatores condicionantes intrínsecos, que são elementos do meio físico ou biótico que diminuem a resistência do solo ou da rocha, contribuindo para a deflagração dos processos. Os condicionantes naturais fazem parte da própria dinâmica de desenvolvimento das encostas, porém, podem ser potencializados pela ação antrópica.

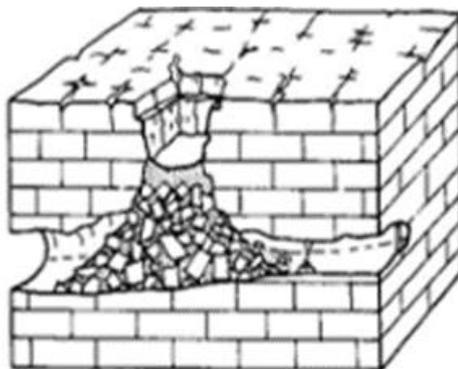
Segundo Guimarães *et al.* (2008), os movimentos gravitacionais de massa são classificados em: corridas/fluxos (de lama e/ou detritos), rastejos, solapamentos, quedas e deslizamentos (translacionais e rotacionais). Nesse trabalho será abordado o conceito de solapamento (colapso e subsidência), bem como as consequências acarretadas por esse processo.

### 2.3.1 Solapamentos

Subsidência e colapsos, também conhecidos como solapamento (Figura 2.2), são movimentos de massa caracterizados por afundamento rápido ou gradual do terreno devido ao desabamento de cavidades, redução da porosidade do solo ou deformação de material argiloso (Cemaden 2018).

Distinguindo os processos, pode-se retratar a subsidência como movimento relativamente lento, de afundamento de terrenos, devido à deformação ou deslocamento de direção vertical descendente. Já o colapso apresenta definição semelhante, porém ocorre como um movimento brusco do terreno (Infanti Jr & Fornasari Filho 1998). Ambos os processos causam prejuízos econômicos e mortes pelo desmoronamento total ou parcial de construções instaladas sobre esses terrenos.

Os processos de subsidência podem ser divididos em processos naturais causados principalmente pela dissolução de rochas e/ou por acomodação de camadas no substrato, devido ao seu peso ou a deslocamentos segundo planos de falhas; e processos acelerados por ação antrópica, ocasionados pelo bombeamento de águas subterrâneas, por recalques fruto do acréscimo de peso de obras e estruturas sobre o terreno, e por galerias de mineração subterrâneas (Unesp 2018). No trabalho em questão será discutido o efeito causado pelo colapso de substrato sobre cavidades naturais e minerárias no distrito sede de Ouro Preto - MG.



**Figura 2.2** - Esquema de subsidência e colapso (modificado de Cemaden 2018).

## 2.4 ROCHAS BRANDAS

O conceito de rochas brandas está atrelado à baixa resistência do material rochoso, ou seja, possuem fraca resistência à compressão uniaxial e seu comportamento geotécnico apresenta características intermediárias entre rochas sãs e solos (Pinho 2003). Essa denominação de rochas brandas pode se relacionar também à fraturamento e alteração do material, visto que as fraturas propiciam maior percolação de água e, conseqüentemente, altera a rocha, tornando-a menos resistente. Alguns estudiosos incluem à essa denominação outros tipos de rocha, tais como rochas com grandes cavidades originadas por dissolução, ou por processos genéticos (Pechorkin 1986).

A relevância do estudo de rochas brandas se baseia em uma grande diversidade de materiais geológicos serem caracterizados por baixa resistência pelo fato de, após submetidos a processos de alteração ou metamorfismo, sofrerem uma perda das suas características primárias. A deterioração dos

parâmetros físico-químicos da rocha dificulta o diagnóstico geotécnico do maciço, tornando complicado prever o seu comportamento.

Os limites de determinação de uma rocha branda são estabelecidos baseando-se na resistência, deformabilidade, porosidade, densidade ou compressibilidade do material, sendo a resistência à compressão uniaxial e a coesão os que melhor caracterizam a interface solo/rocha (Pinho 2003).

De acordo com Johnston (1993), as rochas brandas apresentam resistência à compressão uniaxial situada dentro do intervalo de 0,5 a 25 MPa, a depender do sistema de classificação utilizado. Materiais com resistência inferior a 0,5 MPa são considerados solos e com resistência superior a 25 MPa, rochas duras (Figura 2.3). Conforme Tabela 2.1, que determina o grau de resistência do maciço, esse intervalo refere-se às rochas muito fracas e fracas (“R1” e “R2”).



**Figura 2.3** - Espectro geotécnico dos materiais geológicos, demonstrando os limites entre solos, rochas brandas e rochas duras (retirado de Pinho 2003).

Além dos parâmetros citados para determinação de uma rocha branda, outro fator de grande interferência está relacionado ao grau de saturação do meio, diretamente ligado à desagregabilidade e a expansibilidade do material. O primeiro, refere-se à textura da rocha e o segundo, à composição mineralógica, marcada pela presença de argilas.

Trazendo o conceito de rochas brandas para o trabalho em questão, sua aplicação estará relacionada à diferenciação do potencial de abatimento entre uma rocha sã e outra branda, evidenciando os parâmetros apresentados nesse tópico, as características intrínsecas do maciço e a interferência do peso das edificações sobre as cavidades.



## CAPÍTULO 3

### ÁREA DE ESTUDO

---

#### 3.1 REGIÃO URBANA DO DISTRITO SEDE DE OURO PRETO

Ouro Preto está localizada na região central do estado de Minas Gerais e, segundo o IBGE, possui uma população estimada em 70.281 habitantes e área de, aproximadamente, 1.246 km<sup>2</sup>, com altitudes compreendidas entre 989 metros e 1.772 metros. O distrito sede do município iniciou sua consolidação pela ocupação no entorno do Núcleo Histórico, no entanto a demanda por novas áreas direcionou a população para a serra de Ouro Preto. A ausência de condições propícias de uso do solo acarretou a deflagração de problemas de ocupações inadequadas na área urbana do distrito. Sendo assim, é imprescindível que as ocupações respeitem as características do meio físico, a fim de evitar problemas futuros (Oliveira 2010).

A cidade se localiza em zona de intensa atividade de exploração mineradora conhecida como Quadrilátero Ferrífero (QF), onde são encontrados muitos recursos minerais de grande importância econômica. Uma breve compilação da história da mineração do município, que acarretou o desenvolvimento e ocupação de suas áreas, assim como o contexto geológico do QF, é retratada nos tópicos subsequentes.

##### 3.1.1 Breve história da mineração

A atividade mineradora no Brasil que remete ao período colonial é fundamentada pela busca por metais preciosos, em especial o ouro. Ao final do século XVII, foram descobertas ricas jazidas auríferas em Minas Gerais, na região de Ouro Preto (antiga capital Vila Rica). Lavradas as formações auríferas de aluvião e encostas, os mineradores iniciaram os trabalhos subterrâneos a fim de obter o minério.

Os primeiros relatos sobre o desenvolvimento destas atividades são de autoria de Wilhelm Ludwig von Eschwege, também conhecido por barão de Eschwege, que foi um mineralogista, geógrafo e metalurgista, contratado pela coroa portuguesa para proceder ao estudo do potencial mineiro do país. Encontrava-se em Portugal quando, em 1808, a corte se transferiu para o Rio de Janeiro devido à invasão francesa, tendo seguido posteriormente para Minas Gerais, onde viria a se notabilizar pela realização da primeira exploração geológica de carácter técnico-científico no país, a mina de Passagem de Mariana. Sua principal obra “Pluto brasiliensis” de 1833 é o mais completo relato sobre a geologia e recursos

minerais do Brasil nos séculos XVIII e XIX e mostra de forma minuciosa as técnicas, procedimentos e estruturas construídas para a execução da mineração do ouro na região das Minas Gerais.

No século XVIII, o Brasil era o país que produzia mais ouro no mundo. Além das jazidas de ouro, encontraram-se importantes depósitos de pirita, minério de ferro, manganês, alumínio e bário (Moraes 1945). No final do século XIX, com a exaustão do ouro e perda do status de capital do estado, Ouro Preto sofreu um esvaziamento econômico e político, acompanhado de uma expressiva redução demográfica, especialmente nos bairros periféricos.

Por volta do século XX, houve intenso repovoamento da cidade com o início da mineração de bauxita e fabricação de alumínio, na década de 1940 (Campos 2014). Esse aumento populacional sem um plano de desenvolvimento e de habitação adequados acabou gerando um crescimento desorganizado, sendo visível a grande quantidade de casas construídas em áreas de risco.

O fato é que a magnitude dos trabalhos de extração do ouro foi tal que ainda hoje se encontram no perímetro urbano das cidades de Ouro Preto e Mariana, numerosos vestígios destes: são montanhas recortadas, cujos flancos rasgados dão testemunho dos ataques do homem; canais laterais que cortam as encostas para condução de água; imensos reservatórios construídos em alvenaria de pedra, chamados mundéus, destinados a colher as lamas auríferas que desciam das montanhas lavadas; reservatórios de água para utilização nos trabalhos de mineração; aquedutos e estruturas de suporte a estes; inúmeras galerias subterrâneas abertas de forma a perseguir os veios mineralizados. Essas feições podem ser observadas de forma mais frequente na serra de Ouro Preto, onde ocorreu grande atuação da atividade mineradora.

Os locais minerados, os chamados sítios arqueológicos que são grandes patrimônios arqueológicos do Município, vêm sofrendo com a ocupação urbana desordenada ocorrido principalmente de entre as décadas de 50 e 80. Este crescimento foi caracterizado pela industrialização, quando a ALCAN - Alumínios do Brasil S/A - assumiu o controle da ELQUISA - Electro Química Brasileira -, gerando um aumento considerável da populacional que ocupou a serra de Ouro Preto, área intensamente minerada nos séculos passados.

### 3.1.2 O processo de ocupação

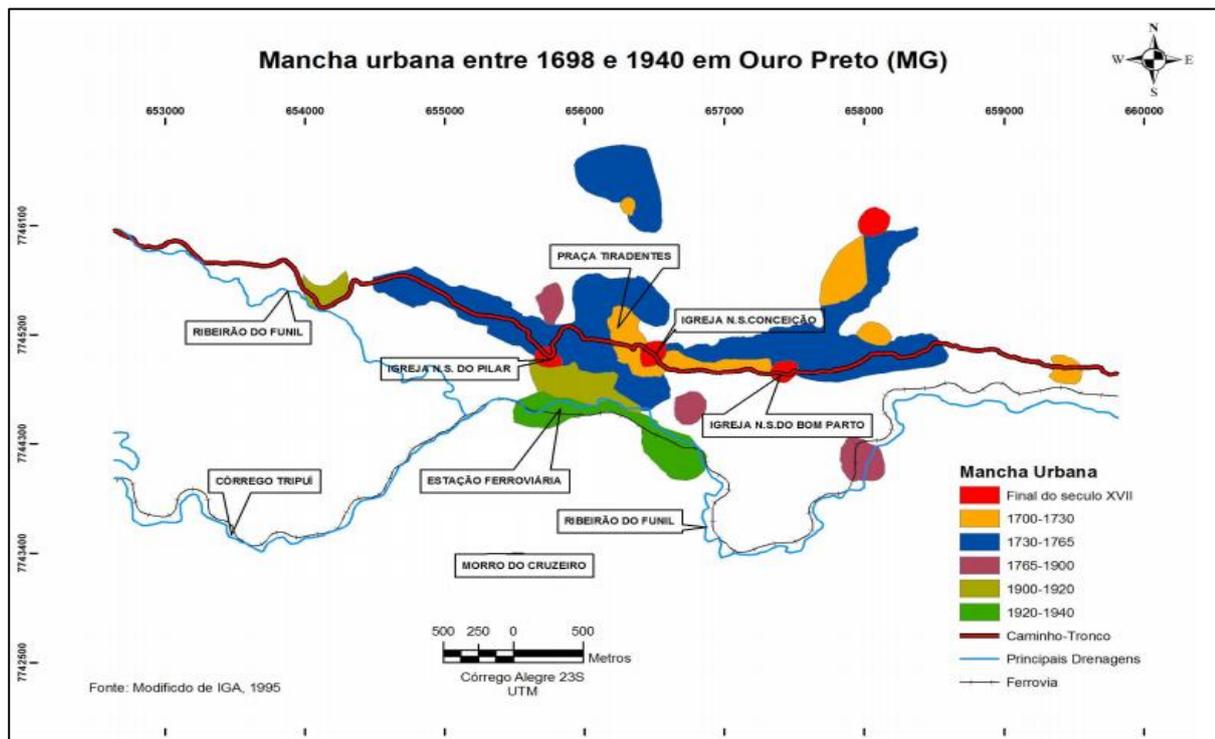
O distrito sede de Ouro Preto surgiu a partir do agrupamento de diversos arraiais. Adverso à maioria das cidades na época, onde se desenvolviam a partir de um núcleo central, Ouro Preto surge a partir da ligação entre as ocupações existentes (Pereira 2011), configurando o que se denomina hoje por “caminho tronco” da cidade conforme ilustra Dos Anjos (2018) na figura 3.1.

Os principais arraiais existentes na época de criação da cidade, por volta de 1698, são, aproximadamente, os consolidados hoje como os bairros: Cabeças, Pilar, Praça Tiradentes (Antiga Praça Santa Quitéria), Padre Faria, Alto da Cruz e Antônio Dias. Além destes, existiam arraiais secundários que também foram consolidados com o passar do tempo.



**Figura 3.1** - Desenho do processo de ocupação realizada na cidade, denominado Caminho Tronco (retirado de Dos Anjos 2018).

Na Figura 3.2 é apresentado um mapa cronológico de como os arraiais evoluíram e conformaram a cidade de Ouro Preto como é atualmente.



**Figura 3.2** - Evolução da ocupação a partir do caminho tronco (modificado de Oliveira 2010).

A análise cronológica da ocupação da cidade de Ouro Preto apresentada na Tabela 3.1, contempla desde os primeiros habitantes até o ano de seu Tombamento pela UNESCO.

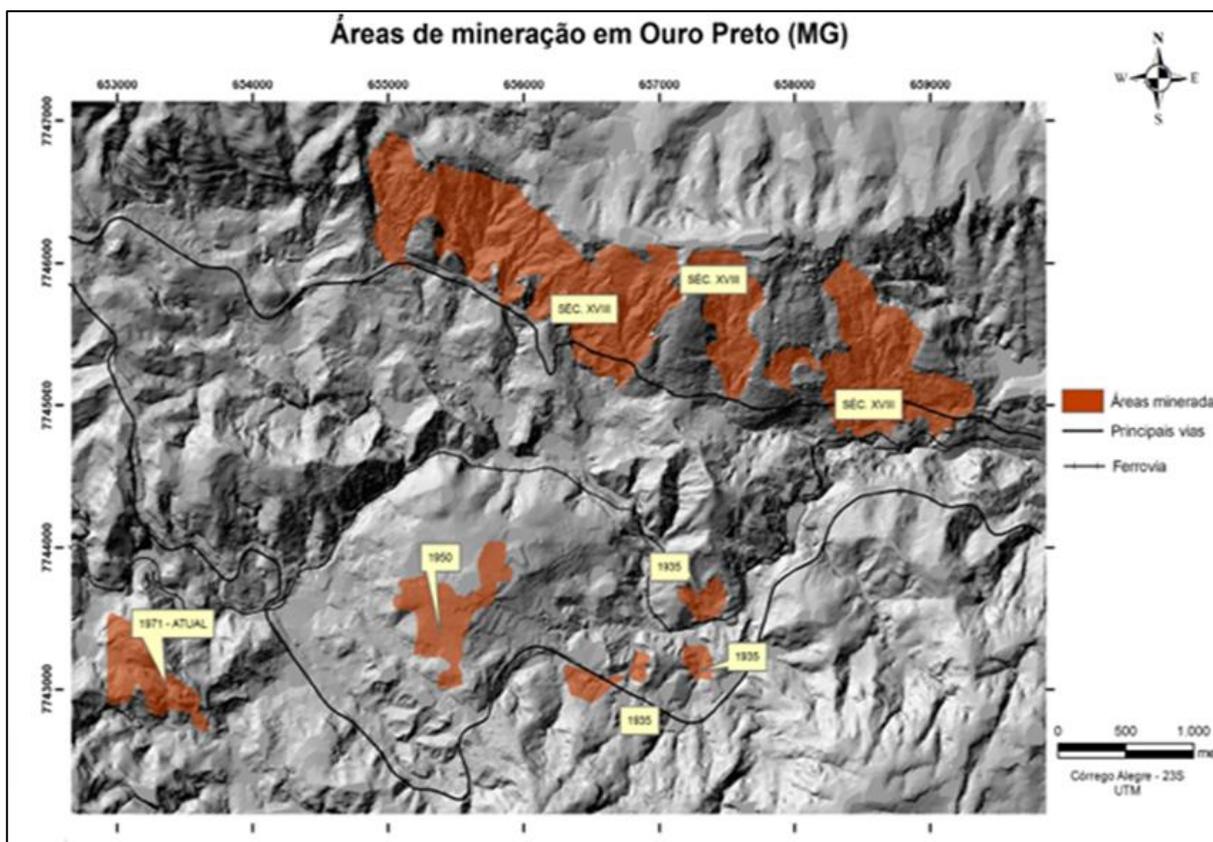
**Tabela 3.1** - Fase cronológica de ocupação da cidade de Ouro Preto (retirado de Revista CPC – Centro de Preservação Cultural, USP – 2016).

Ano	Processo
1698	Fundação da Cidade de Vila Rica, nome de domínio na época, que surgiu a partir das primeiras amostras de ouro, em grande quantidade, encontradas no Ribeirão do Tripuí.
1700	Primeira chegada de Bandeirantes na região.
1720	Início das construções mais sólidas, que caracterizavam a intenção de permanência na região.
1720 a 1750	Período de maior volume de extração de ouro.
1735 a 1763	Governo do Conde de Bobadela. Este governo se caracterizou pelas intervenções urbanas mais significativas do século XVIII, como a

	construção de pontes de ligação entre os arraiais, chafarizes para abastecimento de água etc.
1789	Inconfidência Mineira.
1820	Declínio da extração aurífera.
1823	Vila Rica é elevada a Capital da Província de Minas Gerais (já ocorrida a vinda da família Real Portuguesa para o Brasil).
1839 a 1876	Fase de grande relevância educacional. Criação da Escola de Farmácia e Bioquímica e da Escola de Minas e Metalurgia, respectivamente.
1888	Inauguração do ramal férreo.
1897	Capital da Província de Minas Gerais é transferida para Belo Horizonte.
1924	Fase de grande relevância para a Preservação do Patrimônio Artístico e Cultural - Visita dos Modernistas a Ouro Preto.
1930	Fase de grande relevância para o processo industrial e avanço populacional para as áreas de assentamentos precários. Foi implantada na cidade a indústria Electro Química Brasileira S/A (encampada em 1950, pela ALCAN - Alumínio do Brasil S/A).
1933	Decreto lei 22.928, de 12 de julho de 1933, que declara Ouro Preto como Monumento Nacional. Uma das primeiras medidas concretas para a Preservação do Patrimônio Artístico e Cultural.
1937	Criação do Instituto do Patrimônio Histórico Nacional – IPHAN.
1938	Tombamento de Ouro Preto pelo IPHAN.
1980	Conjunto arquitetônico e urbanístico de Ouro Preto é chancelado como Patrimônio Cultural da Humanidade pela UNESCO.

As inúmeras galerias subterrâneas construídas para perseguir os veios mineralizados, atualmente estão sob diversas residências ao longo de toda Serra de Ouro Preto, muitas delas desconhecidas. Essas ocupações acarretam atualmente a degradação do patrimônio arqueológico, mas sobretudo corroboram

na instabilidade dos terrenos alterados pela mineração. Este cenário foi gerado com a reativação das atividades minerárias no final da década de 30, onde a serra teve sua ocupação predominada por assentamentos precários ‘solucionando’ a falta de moradia gerada com o avanço populacional dado pela implantação da indústria de ferro. Logo, a ocupação tomou as encostas da serra desconsiderando a presença das estruturas de exploração e extração do ouro nos séculos anteriores (Figura 3.3), principalmente as galerias de mina, edificando construções sobre elas e aumentando, assim, a carga sobre o teto destas galerias, além de estabelecer uma rede de drenagem sem planejamento, modificando o sistema de águas superficiais e subsuperficiais da área e potencializando os processos de abatimentos dessas estruturas.



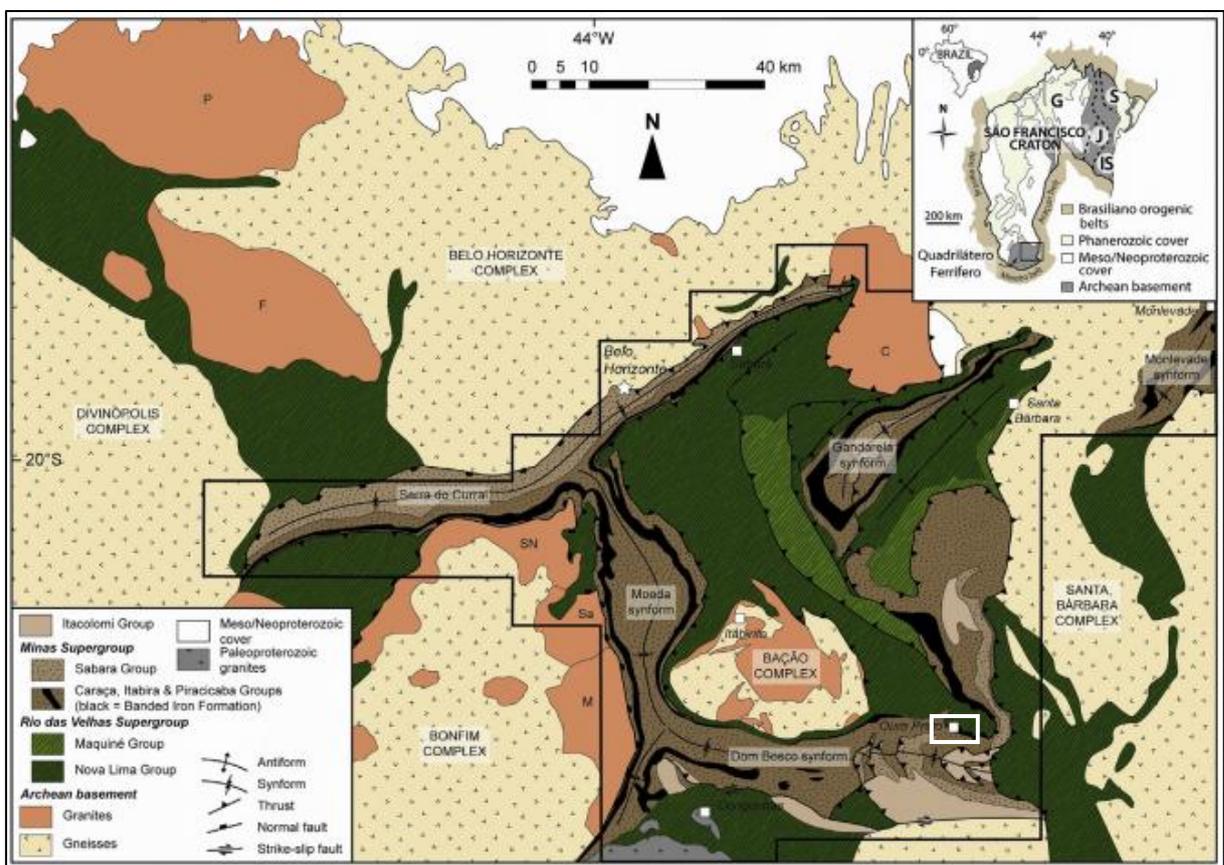
**Figura 3.3** - Áreas mineradas no Distrito Sede de Ouro Preto (retirado de Oliveira 2010).

De forma geral, as minas subterrâneas e suas estruturas de exploração para encontrar o ouro apresentam riscos inerentes à sua atividade exploratória, como os de colapso que podem atingir as construções sobre essas cavidades, bem como perda de vida humana. Vale ressaltar que, um dos grandes problemas decorrentes de exploração mineral subterrânea é exatamente o desmoronamento, que ocorre muitas vezes quando a mina se encontra desativada, causando mudanças no relevo e topografia do local e de áreas adjacentes.

### 3.1.3 Contexto geológico regional

Com 7000 Km<sup>2</sup> e localizado na zona meridional do Cráton São Francisco à leste do Brasil, o Quadrilátero Ferrífero (QF) representa a região mais intensivamente estudada do país desde o século XVII (Figura 3.1). Isto pode ser justificado por sua riqueza de depósitos minerários, além da vasta complexidade geológica que atrai a atenção de cientistas por todo o mundo.

Podemos definir o QF como um distrito metalogênico (Au, Fe, Mn) composto por uma assembleia supracrustal de *greenstones* Arqueanos e sobreposto por rochas sedimentares Neoarqueano-Paleoproterozóicas ocorrendo em quilhas alongadas bordejando corpos dômicos de gnaisses e granitos Arqueanos (Farina *et al.* 2015).



**Figura 3.4** - Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Alkmim & Marshak 1998). O quadrado branco identifica a região do distrito sede do município de Ouro Preto – MG.

O Quadrilátero Ferrífero é bordejado pelo cinturão Neo-proterozóico Araçuai à leste e pelo cinturão Mineiro Paleoproterozóico à sul. Tal distrito exibe vergência NNW de dobras e empurrões e possui uma superimposição metamórfica de 2100-2000 Ma., que ficou originalmente conhecido como “Diastrofismo Minas” (Cordani *et al.* 1980). Sua arquitetura estrutural característica é baseada na

geometria de Domos e Quilhas, em que cinturões de rochas supracrustais Paleoproterozóicas de baixo grau cercam os complexos granitóide-gnáissicos Arqueanos de médio a alto grau.

De acordo com Farina *et al.* (2015), o QF pode ser subdividido em quatro unidades litoestratigráficas Arqueano-Paleoproterozóico (Figura 3.2): (1) Complexos metamórficos Arqueano compostos por gnaisses, migmatitos e granitóides; (2) O Supergrupo Rio das Velhas também Arqueano, formado por rochas metavulcânicas e metassedimentares de baixo a médio grau; (3) O Supergrupo Minas Neoarqueano-Paleoproterozóico, composto por rochas metassedimentares de baixo à médio grau; e (4) O Grupo Itacolomi Paleoproterozóico composto por metarenitos e conglomerados.

Adicionalmente, o Quadrilátero inclui pequenos corpos graníticos e veios pegmatíticos cortando localmente os estratos mais jovens do Supergrupo Minas assim como gerações de diques máficos contrastando com as grades metamórficas, composição e tendências direcionais do QF.

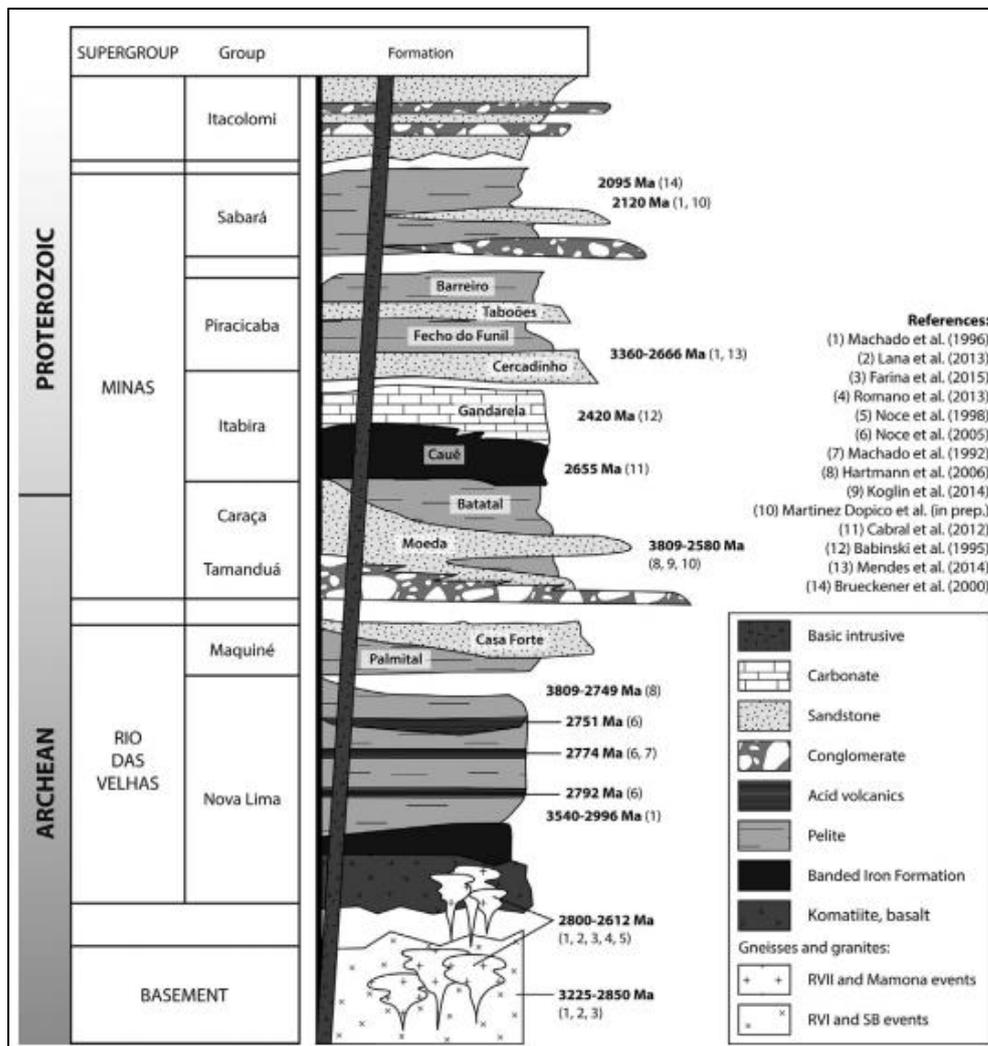


Figura 3.5 - Coluna estratigráfica da sequência supracrustal no Quadrilátero Ferrífero (retirado de Farina *et al.* 2015).

De uma forma geral, pode-se definir que o Complexo Metamórfico Arqueano, que na área é classificado como Complexo Bação, é constituído por gnaisses e migmatitos polideformados de composição tonalítica e granítica, apresenta intrusões de corpos granitóides (granitos, granodioritos) além de rochas máficas e ultramáficas. Já o Supergrupo Rio das Velhas de rochas vulcano-sedimentares de baixo a médio grau metamórfico, é subdividido, da base para o topo, pelos Grupos Quebra Ossos, Nova Lima e Maquiné (Dorr II 1969).

O Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi, são constituídos por coberturas plataformais de idade Proterozóica Inferior assentados discordantemente sobre o Supergrupo Rio das Velhas (Dorr II 1969), compondo 4.000 metros de espessura de metassedimentos. A base do Supergrupo Minas é composta pelos grupos Tamanduá e Caraça, que marcam a sedimentação clástica, de conglomerados a pelitos, da transição de ambiente aluvial para marinho costeiro (Dorr II 1969). A deposição do Grupo Itabira, que compreende as formações ferríferas bandadas Cauê e os carbonatos estromatolíticos Gandarela (Barbosa 1979), ocorre na porção intermediária. O topo da unidade é representado por conglomerados com seixos de formação ferrífera, quartzito Cercadinho e carbonatos do Grupo Piracicaba, e pela sequência clástica do Grupo Sabará.

O Grupo Itacolomi é composto por metarenitos e conglomerados, que contém clastos deformados de formação ferrífera, dispostos em *nappes* de cavalgamento nas porções sul e leste do Quadrilátero Ferrífero (Alkmim & Marshak 1998).

### 3.1.3.1 *Evolução estrutural e tectônica*

O Quadrilátero Ferrífero experimentou história tectônica polifásica que produziu um padrão regional complexo de deformação das rochas (Dorr II 1969). Tal complexidade, concomitante com a falta de datação absoluta das estruturas tectônicas, fez ascender e até conflitar diversas interpretações quanto à história de deformação do Quadrilátero.

De uma forma geral, três estruturas principais resumem as fases cinemáticas que afetam o Supergrupo Rio das Velhas e o Supergrupo Minas, sendo estas: (1) Dobras e falhas regionais com vergência noroeste e norte-nordeste gerando sinclinais assimétricos formados após a deposição do Grupo Sabará na colisão orogênica de antepaís do Riachão (Moeda, Dom Bosco, Pitangui-Peti, Mateus Leme e dobras de Souza). Associado a tal vergência, há uma elevação do grau metamórfico para leste do Bonfim para o complexo do Bação (Dorr II 1969; Alkmim & Marshak 1998); (2) Estruturas extensionais relacionadas à típica formação da província de domos e quilhas, em que calhas de rochas supracrustais Paleoproterozóicas metamorfizadas cercam os domos do embasamento Arqueano (Alkmim & Marshak 1998). Indicadores cinemáticos nas rochas supracrustais claramente indicam um deslocamento lateral e para baixo suportando um evento extensional, além de espessuras diferentes das

auréolas metamórficas em contato com os domos; (3) Dobras de empurrão da borda oeste, reativadas e sobreimpressas de estruturas preexistentes na região a leste de uma linha de tendência norte seguindo o flanco oeste do sinclinal Moeda, justificado pelo evento Ordoviciano Brasileiro recente (Chemale *et al.* 1994).

Dessa forma, podemos dizer que a evolução tectônica do QF se desenvolveu a partir da subducção da crosta oceânica e a subsequente colisão entre dois blocos continentais, onde granitoides formados entre 2920 – 2859 Ma foram metamorfizados e deformados entre 2780 – 2730 Ma, gerando gnaisses bandados e leucogranitos foliados (Romano *et al.* 2013; Farina *et al.* 2015) de grau metamórfico até anfibolito superior. Durante o espessamento crustal, parte da pilha metassedimentar foi depositada, deformada e empilhada, de modo que um relaxamento térmico extensional seguido da delaminação da litosfera, desencadeou na ressurgência da astenosfera que aqueceu a crosta continental e induziu a fusão parcial, justificando a formação do S.G. Rio das Velhas (Farina *et al.* 2015).

Por fim, as rochas do S.G. Minas representam uma evolução de margem passiva ao longo da fronteira entre o Cráton Congo e São Francisco, para um pacote sedimentar sin-orogênico, definindo a operação do Ciclo de Wilson entre 2.6 e 2.0 Ga (Alkmim & Marshak 1998; Canuto 2010).

### **3.1.4 Contexto geológico do distrito sede de Ouro Preto**

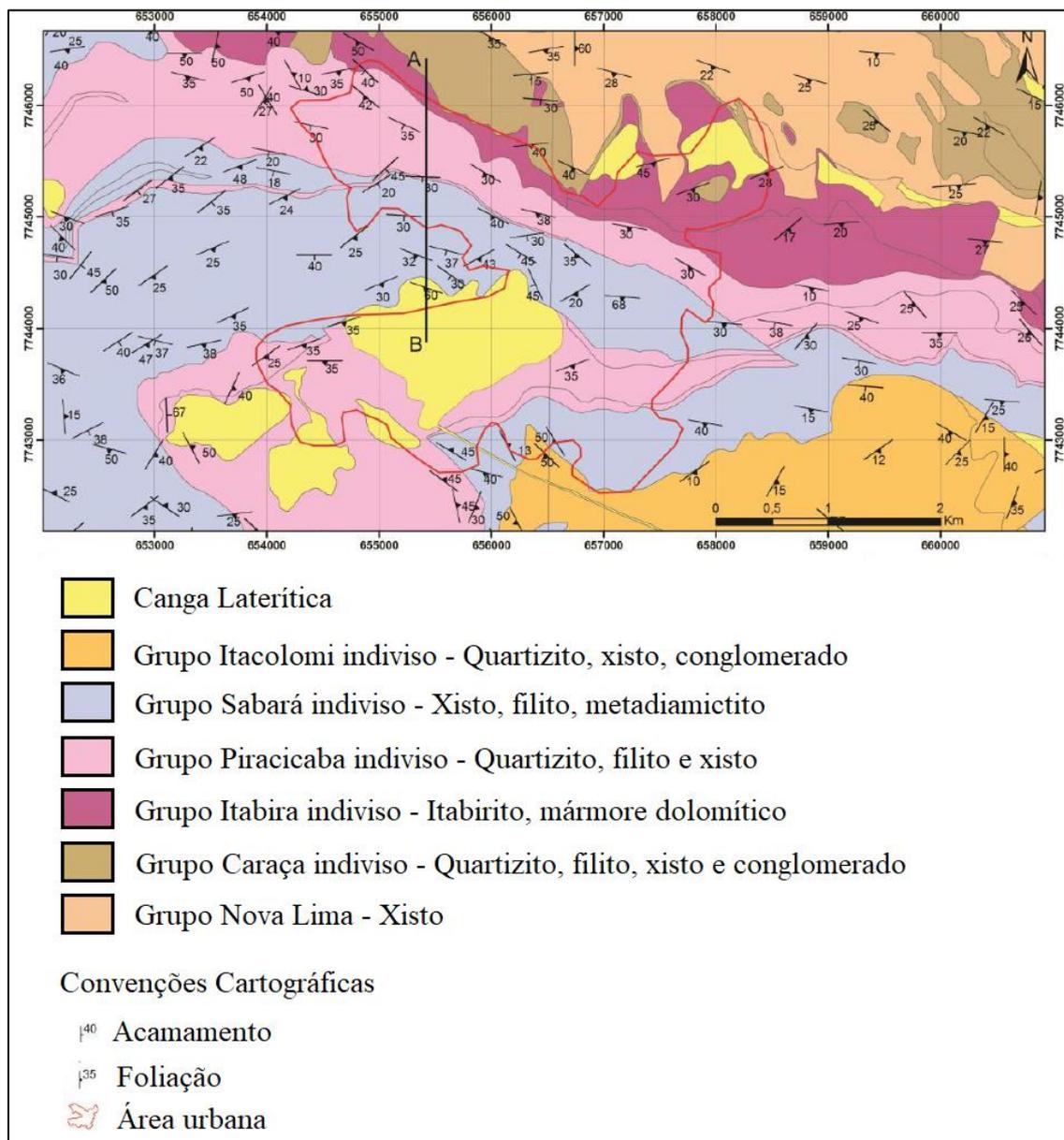
A cidade de Ouro Preto, localizada no sudeste da província mineral do Quadrilátero Ferrífero, está localizada em uma região inserida entre o anticlinal de Mariana e o sinclinal Dom Bosco, onde afloram unidades litoestratigráficas paleoproterozóicas, compostas principalmente por quartzitos, xistos, filitos e itabiritos, estruturados regionalmente segundo um homoclinal de direções NW-SE e E-W, com mergulho geral para SW e S. O documento aponta que essa sequência se encontra parcialmente encoberta por formações lateríticas, observadas principalmente nos platôs e porções mais elevadas do relevo.

A Tabela 3.2 apresenta um resumo da geologia no Distrito Sede da cidade de Ouro Preto, em que se encontram as três últimas unidades.

**Tabela 3.2** - Estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero com a apresentação do contexto geológico da Cidade de Ouro Preto (modificado de Cavalcanti 1999 apud Oliveira 2010).

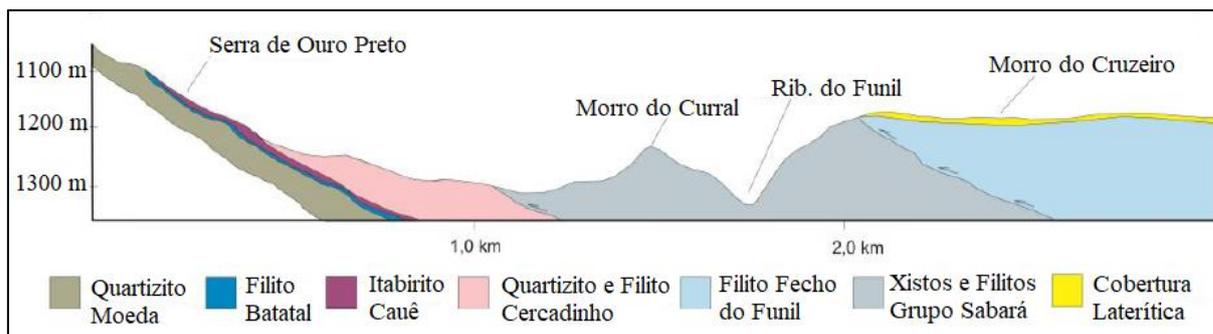
IDADE	SUPERGRUPO	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA		
PALEOPROTEROZOÍCO	MINAS	Itacolomi	Indiviso	quartzitos, ortoquartzitos, filitos quartzosos, filitos e conglomerados com seixos de itabiritos		
		Piracicaba	Sabará	Indiviso	clorita-xisto, grauvaca, metatufos, conglomerados e quartzitos	
			Barreiro	Barreiro	filitos e filitos grafitosos	
				Taboões	Ortoquartzitos	
				Fecho do Funil	filitos, filitos dolomíticos e dolomito silicoso	
				Cercadinho	quartzitos ferruginosos, quartzitos, filitos ferruginosos e dolomitos	
			Itabira	Gandarela	dolomitos, filitos dolomíticos e calcários	
		Cauê		itabiritos, itabiritos dolomíticos e hematíticos		
		Caraça	Batatal	filitos e filitos grafitosos		
			Moeda	quartzitos sercíticos, conglomerados e filitos		
		ARQUEANO	RIO DAS VELHAS	Maquine	Indiviso	quartzitos, conglomerados, sericita-quartzito-xisto e filito
				Nova Lima	Indiviso	filitos cloríticos, filitos grafitosos, metagrauvacas e formações ferríferas, quartzitos e <i>metacherts</i> , dolomitos e rochas máficas e ultramáficas
Quebra Ossos	Indiviso			komatiitos, formações ferríferas e <i>metacherts</i>		

O distrito sede é constituído pelas litologias do Supergrupo Minas representado pelos grupos: Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará, distribuídos ao longo de toda estrutura antiformal, com mergulhos para SW e SE e exibe vários falhamentos e dobramentos que condicionam a complexidade geológica da área (Oliveira 2010; CPRM 2016). A Serra de Ouro Preto, no norte da área urbana, se encontra o SGRV (Supergrupo Rio das Velhas), representado pelo Grupo Nova Lima. O mapa geológico simplificado da área (Figura 3.6) e uma seção geológica esquemática (Figura 3.7), que apresentam a disposição geral das principais unidades litológicas, podem ser encontrados a seguir.



**Figura 3.6** - Mapa geológico simplificado da região onde está localizada a cidade de Ouro Preto (modificado de Baltazar *et al.* 2005)

Vale ressaltar dentro do contexto geológico, apresentado no esquema do corte AB da Figura 3.7, algumas características estruturais e estratigráficas que atuam como facilitadoras dos processos de instabilização das encostas que formam a Serra de Ouro Preto. A disposição estratigráfica de itabiritos sobre filitos, que são litotipos com comportamentos geotécnicos e hidrológicos distintos, é foco principal de exemplo.



**Figura 3.7** - Seção geológica esquemática com a disposição geral das principais unidades litológicas (modificado de CPRM 2016).

Além da complexidade geológica na área, as rochas se encontram muito alteradas devido aos vários eventos geotectônicos registrados (Endo 1997), ademais, dispõem de formações litológicas com comportamento geotécnico muito sensível a fenômenos naturais e essa sensibilidade aumenta no distrito sede do município devido à intensa associação destes fenômenos com a ação antrópica (Xavier 2018). As principais unidades que apresentam esse tipo de sensibilidade são os xistos presentes no Grupo Nova Lima, com alto grau de alteração; os filitos da Formação Batatal, com baixa resistência e alta impermeabilidade; os quartzitos ferruginosos e os filitos cinzento-prateados da Formação Cercadinho, com baixa resistência à denudação; e os quartzitos da Formação Barreiro, que são descontínuos, alterados e de baixa resistência (Sobreira,1992).

As análises de Fontes (2011) e Oliveira (2010), identificaram cinco zonas litológicas no distrito sede divididos em:

1. Ao norte na Serra de Ouro Preto, ocorrem as formações Moeda, Batatal e Cauê, pertencentes ao Supergrupo Minas, sobrepostos ao xisto Nova Lima, do Supergrupo Rio das Velhas;
2. A área delimitada pelo Alto da Cruz, a leste da área urbana, é composta predominantemente pela Formação Cercadinho e o Grupo Sabará;
3. O Núcleo Histórico Central, no vale principal, formado por terrenos da Formação Cercadinho;
4. Na região dos bairros Jardim Alvorada e Vila São José, predominam as formações Barreiro e Taboões;
5. Nos bairros Morro do Cruzeiro, Saramenha e Pocinho, na parte sul da cidade, ocorrem principalmente a Formação Fecho do Funil e o Grupo Sabará, além do Grupo Itacolomi no bairro Novo Horizonte.



# CAPÍTULO 4

## MATERIAIS E MÉTODOS

---

O trabalho foi estruturado conforme os itens descritos a seguir.

### 4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A base inicial de consulta bibliográfica foi a dissertação Ocupação urbana de Ouro Preto de 1950 a 2004 e atuais tendências (Oliveira 2010), por se enquadrar na área de pesquisa do presente trabalho e o artigo Sustentação de escavações subterrâneas civis e de mineração (Silva 2018), por retratar o tema discutido neste trabalho. Visando ainda a compreensão dos métodos a serem utilizados nessa pesquisa, realizou-se a leitura de teses e artigos com temas referentes à cavidade e parâmetros geotécnicos.

### 4.2 LEVANTAMENTO DE BANCO DE DADOS

Utilizou-se, neste trabalho, o banco de dados (Anexo 1) de mapeamento de cavidades no distrito sede do município de Ouro Preto, disponibilizado pelo Dr. Hernani Mota de Lima. A base de dados desse trabalho corresponde à identificação e localização das principais cavidades existentes no município.

### 4.3 TRATAMENTO DE IMAGEM SIG

A partir do banco de dados, gerou-se o mapa de cavidades do distrito sede de Ouro Preto, para a caracterização das ocorrências na área de estudo. Este mapa foi produzido a partir do *software* QGis (versão 3.4 - Madeira), e utilizou-se as *shapes* de delimitação dos bairros do município, disponibilizadas pelo NUGEO (Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas), para melhor distribuir as ocorrências das cavidades e, a partir disso, direcionar o bairro a ser escolhido como estudo de caso.

### 4.4 FICHA DE CAMPO

Posteriormente à confecção do mapa de localização das cavidades, foi desenvolvida a ficha de descrição de campo (Figuras 4.1 e 4.2), com o intuito de obter uma coleta dos dados de forma padronizada e otimizada, que oriente o observador *in loco*, diminuindo assim a subjetividade na resposta dos dados.

DADOS GERAIS						
PONTO Nº:	DATA	UTM E	UTM N	ALT	ZONA	DATUM
Características do Ponto:						
Local:		Litologia:		Foto:		
Responsáveis:		Descrição do Acesso:				
Tipo: ( ) Escavação Subterrânea ( ) Buraco de Sarilho ( ) Mundéu ( ) Canais de água ( ) Outro:						
Estado de Conservação: ( ) Excelente ( ) Bom ( ) Ruim ( ) Péssimo						
Tipo de cobertura: ( ) Mata fechada ( ) Vegetação rasteira ( ) Área limpa						
PARÂMETROS RMR						
Presença de Água:	( ) Sim ( ) Não	( ) Lago	( ) Fluxo	( ) Perene	( ) Efêmero	( ) Gotejamento
Sumidouro:	( ) Sim ( ) Não	( ) Perene			( ) Efêmero	
Ressurgência:	( ) Sim ( ) Não	( ) Perene			( ) Efêmero	
Dimensão:	( ) Medida ( ) Estimada		Altura da entrada principal:			
Fraturas:	( ) Sim ( ) Não		( ) Aberta		( ) Preenchida	
Zona de Contato:	( ) Sim ( ) Não		( ) Abrupta		( ) Gradual	
Grau de resistência:	Grau de alteração:		Grau de coerência:		Grau de fraturamento:	
Formato do teto:			CROQUI			
Distância do teto às edificações:						
Material na base da cavidade:						
EDIFICAÇÕES E IMPACTOS						
Edificações: ( ) Inexistentes ( ) Em uso ( ) Abandonadas			Tipo: ( ) Moradias ( ) Garagem ( ) Depósitos ( ) Estruturas Metálicas ( ) Outros: _____			
Quantidade de edificações afetadas (sobre a cavidade):						
Coordenadas das casas: ( , ): ( , ); ( , )						
Presença de: ( ) Recalque no piso ( ) Trincas ( ) Rachaduras ( ) Outro: _____						
Estruturas/Estabilização: ( ) Suficiente para mitigar perigo; ( ) Insuficiente para mitigar perigo; ( ) Suficiente para mitigar perigo, mas requer reparos; ( ) Não Observado.						
Relato de Acidentes: ( ) Sim ( ) Não		Ano/Período: Houve danos e/ou retirada de moradores? Medidas mitigadoras: ( ) Sim ( ) Não <u>Especificar:</u>				

Figura 4.1 - Ficha de descrição de campo, utilizada nas vistorias às cavidades e edificações (frente).

Grau de resistência			
Grau	Denominação	Caracterização	Resistência à compressão uniaxial (Mpa)
R0	Rocha extremamente fraca	Marcada com a unha.	0,25 - 1,0
R1	Rocha muito fraca	Esmigalha-se com golpes firmes com a ponta do martelo de geólogo e pode ser raspada com canivete.	1,0 - 5,0
R2	Rocha fraca	Pode ser raspada com dificuldade com canivete, marcas podem ser feitas superficialmente com a ponta do martelo de geólogo.	5,0 - 25
R3	Rocha mediantemente resistente	Não pode ser raspada ou riscada com canivete, mas as amostras podem ser fraturadas com simples golpes de martelo de geólogo.	24 - 50
R4	Rocha resistente	As amostras necessitam de mais que um golpe de martelo de geólogo para se fraturar.	50 - 100
R5	Rocha muito resistente	As amostras necessitam de muitos golpes de martelo de geólogo para se fraturar.	100- 250
R6	Rocha extremamente resistente	As amostras podem somente ser lascadas com o martelo de geólogo.	>250

Grau de alteração		
Grau	Denominação	Caracterização
A1	Rocha sã	Sem vestígios de alterações físicas e químicas dos minerais principais.
A2	Rocha pouco alterada	Sinais de alteração incipientes dos minerais primários; ligeiramente descolorida. Mesmas propriedades físicas e mecânicas da rocha sã.
A3	Rocha mediantemente alterada	Minerais mediantemente alterados; bastante descolorida. Propriedades mecânicas inferiores ao "A2", porém ainda resistente.
A4	Rocha muito alterada	Minerais muito alterados, às vezes pulverulentos. Propriedades físicas e mecânicas muito inferiores à "A3".
A5	Rocha extremamente alterada (saprolito)	Minerais constituintes totalmente descompostos, porém preservando suas estruturas originais. Trechos não recuperados são considerados solo.

Grau de coerência		
Grau	Denominação	Caracterização
C1	Rocha muito coerente	Rocha com som metálico, quebra com dificuldades ao golpe do martelo. Sua superfície dificilmente é riscada pelo aço.
C2	Rocha coerente	Rocha com som fraco, quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo. Ao ser riscada pelo aço, deixa sulcos superficiais.
C3	Rocha mediantemente coerente	Rocha com som oco, quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo e com fragmentos dificilmente quebradiços à pressão dos dedos. Sulco leve ao risco de aço.
C4	Rocha pouco coerente (quebradiça)	Rocha quebra com facilidade ao golpe com martelo, bordas dos fragmentos quebram com relativa facilidade manualmente. Sulcos profundos ao risco do aço.
C5	Rocha incoerente (friável)	Rocha esfarela-se ao golpe do martelo, desagregando-se com a pressão dos dedos. Pode ser cortada com o aço, sendo riscada com a unha.

Grau de fraturamento		
Grau	Denominação	Caracterização
F1	Pouco fraturada	< 1 fratura/metro.
F2	Fraturada	1 - 5 fraturas/metro.
F3	Muito fraturada	5 - 10 fraturas/metro.
F4	Extremamente fraturada	10 - 20 fraturas/metro.
F5	Fragmentada	>20 fraturas/metro.

**Figura 4.2** – Tabelas utilizadas na ficha de descrição de campo, utilizada nas vistorias às cavidades e edificações (verso).

A metodologia de elaboração da Ficha de Campo (FC) tem como base os trabalhos de Corteletti & Filgueiras (2015); Tavares (2018); Chades (2018), onde os autores desenvolvem uma ficha para coleta de dados em campo específica para maciços de solo e rocha em áreas urbanas.

As cavidades estudadas se encontram dentro de área urbana, caracterizada principalmente pela ocupação desordenada, falta de drenagem competente e histórico de abatimentos. Essa é uma das características mais importantes na elaboração da FC. Dessa forma, tem-se a necessidade de diferenciar parâmetros e atributos pertinentes aos maciços rochosos e suas características geomecânicas em relação a edificação e estruturas em seu entorno imediato.

Por estar introduzida numa região geotectonicamente complexa, é comum as rochas possuírem diversas descontinuidades. Devido à sua importância na caracterização dos movimentos gravitacionais de massa, a FC se utiliza de alguns conceitos do sistema SMR (Romana 1985) para descrição das cavidades. Os parâmetros utilizados para caracterização das descontinuidades foram: orientação, espaçamento, persistência, rugosidade das paredes, abertura, preenchimento, fluxo de água e número de famílias.

A ficha trata-se de uma ferramenta técnica desenvolvida especificamente para caracterização de cavidades em áreas urbanas, porquanto tem como intuito a orientação e auxílio na identificação de feições físicas e suas características; particularidades das cavidades, litológicas; identificação de evolução e seus reflexos nas edificações próximas, além de padronizar as inspeções das cavidades.

Sendo assim, a FC possui três áreas de caracterização e diretrizes de dados relevantes a serem coletados durante o campo: (1) Dados gerais, que apresenta a localização, identificação e características da cavidade visitada; (2) Parâmetros RMR, que relaciona as informações referentes à análise geotécnica, tais como grau de resistência, alteração, coerência e fraturamento da rocha; (3) Edificações e impactos, onde é retratado o tipo de edificação existente sobre a cavidade, suas características estruturais e de estabilização, bem como a possibilidade de ocorrer acidentes na localidade.

#### **4.5 ATIVIDADES DE CAMPO**

Em posse do mapa de localização das cavidades e da ficha de descrição de campo, foram realizadas atividades de campo nos dias 06 de julho de 2019, 03 de agosto de 2019, 30 de novembro de 2019 e 06 de dezembro de 2019, onde visitou-se cavidades dos bairros Padre Faria, Barra, Morro Santana, São Francisco, Morro São Sebastião e Antônio Dias para coleta de dados geológicos e geotécnicos, que serviram de base para a realização e entendimento do estudo deste presente trabalho.

#### **4.6 ANÁLISE DE PERIGO E ABATIMENTO**

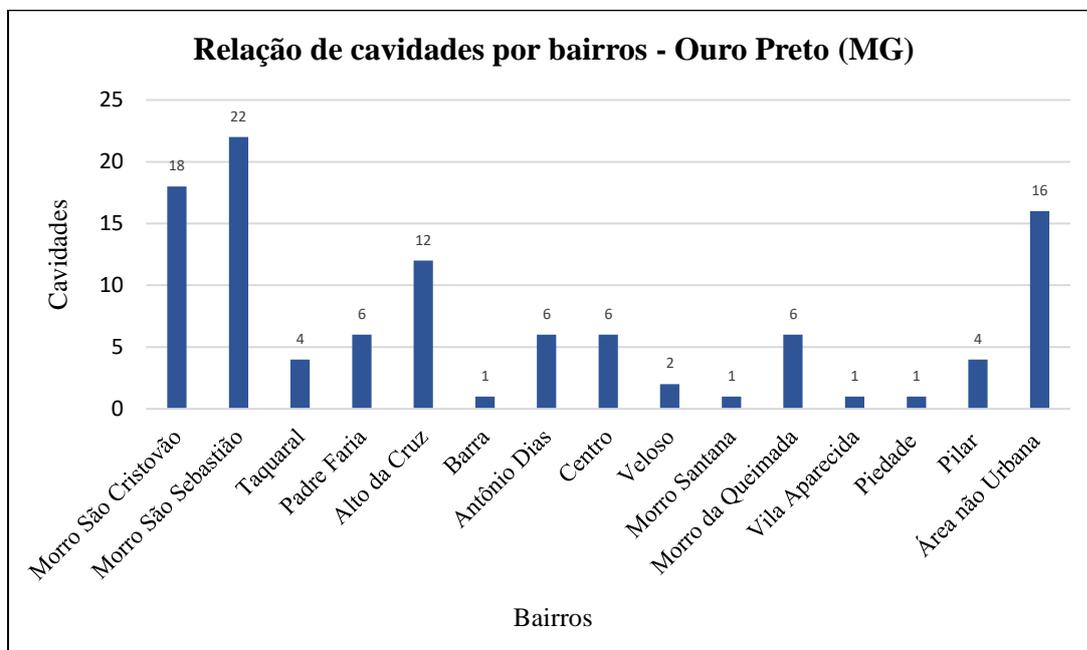
Após o levantamento de todas as informações relevantes ao projeto, fez-se a apresentação e discussão dos resultados, identificando e analisando os perigos de abatimento das edificações localizadas sobre as cavidades visitadas nas atividades de campo. Essa análise baseia-se na relação entre as litologias que compõem a cavidade e os parâmetros geomecânicos observados, indicando a resistência da rocha e as chances de abatimento do maciço.



Posteriormente à confecção do mapa, foi possível relacionar a quantidade de cavidades presente em cada bairro do distrito sede e, a partir disso, direcionar os pontos a serem visitados e analisados nas atividades de campo. Essa relação pode ser observada na Tabela 5.1 e ilustrada pelo Figura 5.2.

**Tabela 5.1** – Número de cavidades localizadas em cada bairro do distrito sede do município de Ouro Preto – MG.

Bairros	Nº de Cavidades
Morro São Cristóvão	18
Morro São Sebastião	22
Taquaral	4
Padre Faria	6
Alto da Cruz	12
Barra	1
Antônio Dias	6
Centro	6
Veloso	2
Morro Santana	1
Morro da Queimada	6
Vila Aparecida	1
Piedade	1
Pilar	4
Área não Urbana	16



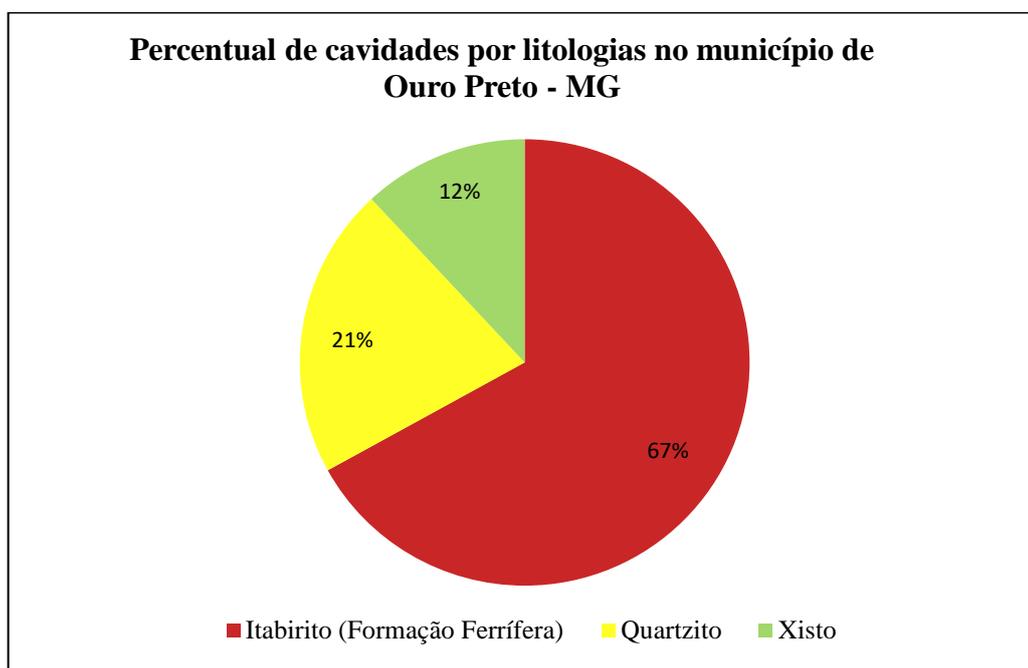
**Figura 5.2** - Gráfico de relação da quantidade de cavidades por bairro de Ouro Preto - MG.

Além disso, a listagem de litologias presente no banco de dados possibilitou a construção do gráfico de associação da quantidade de cavidades por litotipo apresentado (Tabela 5.2 e Figura 5.3).

Essa análise evidencia a formação ferrífera, também conhecida por itabirito, como a litologia predominante nas ocorrências de cavidades na área de estudo.

**Tabela 5.2** - Número de cavidades encontradas em cada litotipo identificado. Informações obtidas a partir do banco de dados disponibilizado pelo professor Dr. Hernani Mota.

Litologia	Nº de Cavidades
Itabirito (Formação Ferrífera)	73
Quartzito	23
Xisto	13



**Figura 5.3** - Gráfico de correlação do litotipo presente nas cavidades mapeadas no distrito sede do município de Ouro Preto – MG, em percentual.

Diante dos resultados obtidos nas análises apresentadas e, por ser uma região de estudo do NUGEO, definiu-se o bairro Padre Faria, inicialmente, como área de atuação das posteriores atividades de campo. No entanto, outras ocorrências de cavidades foram visitadas nos demais bairros do município. Optou-se pela escolha de bairros espaçados no distrito sede de Ouro Preto para melhor caracterização das estruturas e detalhamento das informações, a fim de compreender de forma mais ampla as ocorrências dispersas no município.

## 5.2 ATIVIDADES DE CAMPO

Tendo conhecimento da distribuição das cavidades no distrito sede de Ouro Preto, iniciou-se os trabalhos de campo para caracterização dos pontos visitados. Essas atividades foram direcionadas pela ficha de descrição de campo, que compila os dados relevantes ao estudo.

Inicialmente, visitou-se seis cavidades do Padre Faria presentes no banco de dados e mapeou-se mais três ocorrências no bairro, ambas localizadas na Rua Santa Rita. No primeiro ponto descrito, pôde-se observar duas escavações de, aproximadamente, 1 metro (m) de altura cada, com presença de duas famílias de fraturas e um bandamento, sem presença de água (Figura 5.4). A litologia se trata de um itabirito, com parâmetros geomecânicos médios: grau de resistência “R3”, grau de alteração “A3”, grau de coerência “C3” e grau de fraturamento “F2”, conforme tabelas apresentadas no tópico de parâmetros geomecânicos. Não foi constatado existência de edificações sobre as cavidades; no entanto, elas se localizam 2m abaixo da rua Maciel, principal acesso do centro de Ouro Preto para a cidade de Mariana – MG. Embora as escavações apresentavam-se estáveis na porção interna, suas estruturas são suficientes para mitigar perigo.



**Figura 5.4** - Cavidades localizadas próximas ao cruzamento da rua Santa Rita com a rua Maciel.

No segundo ponto, nota-se a presença de outras duas cavidades de itabirito (Figuras 5.5 e 5.6), com fraturas internas de 0,6m de abertura (Figura 5.7), favorecendo a queda de blocos. As escavações possuem 2,7m de altura, com ressurgência perene de água paralela às descontinuidades. Os parâmetros geomecânicos são semelhantes ao ponto anterior. Nessa ocorrência, encontra-se uma edificação em uso, com dois pavimentos, sem identificação de recalques, trincas ou rachaduras; porém, as estruturas das cavidades são suficientes para mitigar perigo.



**Figura 5.5** - Cavidades localizadas na rua Santa Rita, com edificação em uso sobre a escavação.



**Figura 5.6** - Porção interna da cavidade, onde pode-se observar o bandamento do itabirito.



**Figura 5.7** - Fraturas localizadas na porção interna da cavidade, com abertura de 0,6m.

Alguns metros à frente, verifica-se a existência de outras três cavidades, a maior delas com 4m de altura na entrada principal (Figuras 5.8 e 5.9), marcadas pela presença de bandamento e duas famílias de fraturas com extensão aproximada de 7m de profundidade, espaçamento de 2m e abertura de 0,1m (Figura 5.10). O litotipo e os parâmetros geomecânicos permanecem semelhantes aos pontos anteriores. Foi identificado presença de água em uma das ocorrências e existência de edificações em uso, sendo uma ao lado (Figura 5.11) e duas acima das cavidades, com distância de 2m entre o teto da escavação e o piso das casas. Vale ressaltar que, devido a extensão das cavidades, é possível que outras moradias sejam afetadas pelas estruturas, que são suficientes para mitigar perigo. Além disso, observou-se fraturas preenchidas com cimento em uma garagem, a poucos metros das ocorrências (Figura 5.12).



**Figura 5.8** - Cavidade de itabirito localizada na rua Santa Rita, com edificação em uso ao lado.



**Figura 5.9** - Cavidades localizadas na rua Santa Rita, com edificações em uso 2m acima.



**Figura 5.10** – Fratura observada na cavidade, com abertura de, aproximadamente, 0,1m.



**Figura 5.11** - Edificação com três pavimentos, construída ao lado de uma cavidade.



**Figura 5.12** - Fratura preenchida por cimento, próximo às cavidades descritas.

Em outra cavidade visitada, pode-se constatar a presença de água nascente na rocha (Figura 5.13), que formou uma abertura de, aproximadamente, 0,2m no plano de fratura. A escavação possui 5m de altura e está a 2,5m do piso das edificações acima (Figura 5.14). Os parâmetros geomecânicos permanecem semelhantes aos pontos anteriores, sendo suficientes para mitigar perigo às moradias.



**Figura 5.13** - Água nascente no itabirito constituinte da cavidade localizada na rua Santa Rita.



**Figura 5.14** - Identificação de edificações acima e ao lado da cavidade.

A última cavidade visitada no bairro foi a Mina do Padre Faria (Figura 5.15), com extensão não identificada, presença de água nascente e distanciada a 3m do piso das edificações. Os parâmetros geomecânicos se mantiveram conforme as ocorrências anteriores.



**Figura 5.15** - Mina do Padre Faria, cavidade de itabirito localizada na rua Santa Rita.

Tendo mapeadas as cavidades do bairro Padre Faria, o trabalho de campo foi direcionado a outras ocorrências no município de Ouro Preto. A partir disso, visitou-se uma escavação localizada no bairro Barra, próximo ao Centro de Convenções da UFOP. Nesse ponto, não foi possível descrever com detalhamento os parâmetros geomecânicos da rocha, visto que a cavidade se encontra às margens do ribeirão da Barra, impossibilitando a verificação das características da escavação devido ao período de cheia das águas (Figura 5.16). No entanto, pôde-se observar interferência da cavidade na estruturação da casa existente ao lado. Vale ressaltar que essa edificação se encontra interdita pelo órgão público devido ao abatimento no fundo do terreno, que apresenta, ainda, duas grandes fraturas abertas em sua encosta, evidenciando a instabilidade da área. O litotipo apresentado se trata de um itabirito.



**Figura 5.16** - Cavidade localizada no bairro Barra, próxima ao Centro de Convenções da UFOP.

Outra escavação descrita localiza-se na rua 15 de Agosto, no bairro Morro Santana (Figura 5.17). A litologia observada se mantém no itabirito, porém com alguns parâmetros geomecânicos diferentes dos observados nos pontos anteriores. O grau de resistência da rocha se apresentou muito fraco, sendo classificado com “R1” e o grau de alteração mostrou-se elevado (“A4”); já o grau de coerência se manteve médio (“C3”) e o grau de fraturamento “F2”, com presença de 4 famílias de fraturas mais a foliação. A cavidade possuía altura de 3m e extensão de, aproximadamente, 20m, sendo considerada muito intemperizada. Vale evidenciar a presença de estruturas em cunha formadas pelo encontro de duas famílias de fraturas (Figura 5.18) e a existência de inclinômetro instalado no ponto. Não foram identificadas edificações sobre a escavação, apenas uma cobertura de mata fechada.



**Figura 5.17** - Cavidade localizada no bairro Morro Santana, com vegetação densa acima da escavação.



**Figura 5.18** - Encontro de duas famílias de fraturas, formando estrutura em cunha, no itabirito.

A cavidade visitada no bairro São Francisco é caracterizada pelo litotipo quartzo-sericita xisto. A escavação encontrava-se abaixo da escada de acesso à casa e possuía 4m de altura interna e extensão de, aproximadamente, 20m (Figuras 5.19 e 5.20). Nota-se gotejamento e deslocamento no teto, forte alteração e veios de quartzo contínuos.

Em relação aos parâmetros geomecânicos dessa litologia, evidenciou-se grau de resistência fraco (“R2”), grau de alteração e coerência médios (“A3” e “C3”) e grau de fraturamento “F2”, marcado por duas famílias de fraturas, que formam estrutura em cunha (Figura 5.21). Ademais, foi constatado que a edificação existente não seria diretamente afetada, visto que a cavidade se estende abaixo do caminho para a moradia, distante 5 metros; não exatamente sobre ela. Sendo assim, em caso de abatimento, desestabilizaria o terreno lateral à casa.



**Figura 5.19** - Acesso para a cavidade abaixo da escada existente na área. Ponto localizado no bairro São Francisco.



**Figura 5.20** - Abertura da cavidade existente no litotipo quartzo-sericita xisto. Observa-se forte alteração nas paredes da escavação.



**Figura 5.21** - Planos de fraturas existentes na cavidade, formando estruturas em cunha.

Outras duas escavações descritas localizam-se na rua do Pinheiro, bairro Morro São Sebastião sendo uma delas composta inteiramente de quartzito (Figura 5.22) e outra constituída por quartzosericita xisto internamente, apresentando contato abrupto com o quartzito (topo) próximo à entrada (Figura 5.23). A cavidade quartzítica possuía 1,8m de altura e 16m de extensão, contendo veios de quartzo. Nota-se a presença de uma família de fratura perpendicular à foliação da rocha, com parâmetros geomecânicos de fraturamento “F2”, grau de resistência muito alto “R5”, alteração mediana “A3” e coerência “C3”. Já a segunda cavidade diferencia-se da anterior pelo grau de resistência baixo “R2”, duas famílias de fraturas em cunha e deslocamento no teto (Figura 5.24). Pode-se constatar que o sobrepeso do quartzito sobre o xisto ocasionou um leve abatimento próximo à abertura da escavação. Não foi identificada presença de água em nenhuma dessas ocorrências. Diretamente acima das cavidades não há edificações, no entanto observa-se uma moradia paralela, distante cerca de 10m (Figura 5.25). Vale ressaltar que as escavações distam 4,70m.



**Figura 5.22** - Interior da cavidade quartzítica, onde pode-se notar a presença de veio de quartzo em seu interior.



**Figura 5.23** - Contato observado próximo à abertura da cavidade. O zoom evidencia o quartzito sobre o xisto.



**Figura 5.24** - Deslocamento observado no teto da cavidade composta por quartzo-sericita xisto.



**Figura 5.25** - Edificação paralela às cavidades visitadas, distante 10m da ocorrência 1 (quartzítica) e 14,7m da escavação 2 (xistosa).

Além das cavidades acima, mais uma ocorrência foi descrita no bairro São Sebastião, localizada na República Xamego (Figura 5.26). Esta, era composta, predominantemente, por itabirito; no entanto, apresentava uma galeria de quartzo-sericita xisto em seu interior (Figura 5.27), com contato abrupto evidente entre os litotipos, marcado por abertura de 0,03m. No itabirito, pôde-se determinar presença de três famílias de fraturas (Figura 5.28) e um bandamento, grau de resistência “R4”, grau de alteração “A2” e grau de coerência “C3”, bem como gotejamento de água próximo à abertura da cavidade. Já na galeria xistosa, notou-se o deslocamento no teto, como constatado nas demais ocorrências constituídas por esse litotipo. Embora a porção xistosa remeta a um grau de alteração alto, foi classificada como “A2” uma vez que se trata de características químicas composicionais da rocha; enquanto o grau de resistência foi considerado fraco (“R2”).

No geral, a cavidade se estende por 72m; sendo os primeiros 57,8m de itabirito com altura de 2m, seguido de 14,2m de quartzo-sericita xisto com altura de 5m. Observou-se a presença de uma moradia diretamente sobre a abertura da escavação; no entanto, os parâmetros geomecânicos não marcam indícios de abatimento.



**Figura 5.26** - Cavidade localizada no quintal da República Xamego; porção constituída por itabirito.



**Figura 5.27** - Galeria de quartzo-sericita xisto, porção final da cavidade, com deslocamento do teto.



**Figura 5.28** - Famílias de fraturas observadas próximo à entrada da cavidade, no litotipo composto por itabirito.

Outro ponto visitado localiza-se alguns metros abaixo do mirante no Morro São Sebastião. Nessa cavidade composta por itabirito (Figura 5.29), pôde-se visualizar duas famílias de fraturas e um bandamento com medida 270/40. A escavação possui 3,2m de altura e extensão estimada de 70m e presença de água crescente no solo, na porção final, o que impossibilitou a continuação da descrição. Os parâmetros geomecânicos observados forma resistência “R4”, alteração “A2”, coerência “C2” e fraturamento “F2”. Identifica-se a existência de moradia sobre a abertura da cavidade, com distância aproximada de 4m entre o teto da mina e o piso da casa, no entanto não foi relatado a presença de trincas e/ou rachaduras na estrutura da edificação (Figura 5.30).



**Figura 5.29** - Cavidade constituída por itabirito, com altura medida de 3,2m, localizada próximo ao mirante do Morro São Sebastião.



**Figura 5.30** - Edificação distante cerca de 4m acima da abertura da cavidade localizada no Morro São Sebastião.

Por fim, no bairro Antônio Dias, pôde-se descrever uma escavação conhecida localmente como Mina do Savinho, constituída por itabirito com passagens de quartzo-sericita xisto em seu interior (Figura 5.31), medindo 1,8m de altura e cerca de 80m de extensão, considerando suas bifurcações (Figura 5.32). Observa-se presença de veios de quartzo dispersos, apenas uma família de fratura, bandamento medindo 265/50 e, onde há xisto, deslocamento do teto (Figura 5.33). Apresenta parâmetros geomecânicos resistentes, classificados como “R4”, coerência “C1”, alteração “A2” e fraturamento “F2”. Foi visualizado uma edificação diretamente sobre a cavidade, no entanto as condições geomecânicas e geológicas mostram-se estáveis. Vale ressaltar que, na região encontram-se outras minas abertas à visitação turística, com presença de moradias em uso sobre essas ocorrências, como pode ser visto na figura 5.34.



**Figura 5.31** - Porção constituída por quartzo-sericita xisto (abaixo) em contato com itabirito no interior da mina.



**Figura 5.32** - Bifurcações existentes no interior da Mina do Savinho, localizada no bairro Antônio Dias.



**Figura 5.33** - Deslocamento do teto da cavidade, existente nas porções constituídas por quartzo-sericita xisto.



**Figura 5.34** - Edificações existentes sobre cavidade turística do bairro Antônio Dias. A seta mostra a entrada para a visita da Mina do Chico Rei.

No total, foram visitadas dezesseis ocorrências, sendo 9 delas encontradas no bairro Padre Faria, 1 na Barra, 1 no Morro Santana, 1 no Veloso, 3 no Morro São Sebastião e 1 no Antônio Dias (Tabela 5.3). Pode-se constatar que, conforme apresentado pelo banco de dados, a maioria das cavidades visitadas também correspondem ao litotipo de itabirito (formação ferrífera).

**Tabela 5.3** - Coordenadas e litotipos das cavidades visitadas durante as atividades de campo do presente trabalho.

<b>Mina</b>	<b>East</b>	<b>North</b>	<b>Área Urbana</b>	<b>Litologia</b>
1	657539,31	7744950,86	Sim	Itabirito (Formação Ferrífera)
2	657703,89	7744913,92	Sim	Itabirito (Formação Ferrífera)
3	657640,31	7744912,95	Sim	Itabirito (Formação Ferrífera)
4	657922,94	7744998,92	Sim	Itabirito (Formação Ferrífera)
5	657888,92	7744970,95	Sim	Itabirito (Formação Ferrífera)
6	657859,81	7744944,15	Sim	Itabirito (Formação Ferrífera)
7	657713,17	7744890,14	Sim	Itabirito (Formação Ferrífera)
8	657483,65	7744903,32	Sim	Itabirito (Formação Ferrífera)
9	657255,04	7745016,12	Sim	Itabirito (Formação Ferrífera)
10	655873,57	7744619,12	Sim	Itabirito (Formação Ferrífera)
11	656933,50	7745240,47	Sim	Itabirito (Formação Ferrífera)
12	655563,36	7746094,28	Sim	Quartzo-sericita Xisto
13	656135,24	7745845,55	Sim	Quartzito / Quartzo-sericita Xisto
14	656205,29	7745512,80	Sim	Itabirito / Quartzo-sericita Xisto
15	656174,78	7745601,64	Sim	Itabirito (Formação Ferrífera)
16	656525,93	7745188,84	Sim	Itabirito / Quartzo-sericita Xisto

## CAPÍTULO 6

### DISCUSSÕES

---

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos em diversas etapas dos trabalhos desenvolvidos, a fim de analisar o perigo de abatimento de edificações sobre cavidades oriundas da exploração minerária no distrito sede do município de Ouro Preto.

Inicialmente, pôde-se interpretar as informações contidas no banco de dados para direcionar as áreas de atuação do gerenciamento de risco geológico/geotécnico do município, bem como estudar a relação entre o número de escavações existentes associadas a cada litotipo presente. Nota-se que essas cavidades, em sua maioria, estão relacionadas às litologias que sustentam as serras da região, ou seja, itabiritos e quartzitos, que totalizam 88% das ocorrências, classificados como itabirito Cauê e quartzito Cercadinho; seguidos de 12% de xistos, típicos do Grupo Nova Lima. Outro dado extraído do banco de dados diz respeito às áreas de maior concentração das cavidades, novamente evidenciando a ocorrência predominante nas porções mais elevadas de Ouro Preto, em bairros próximos à Serra, tais como São Cristóvão e São Sebastião.

Conforme apresentado anteriormente, para melhor caracterização e detalhamento das informações, optou-se por visitar bairros com ocorrências espaçadas dentro do município, permitindo uma vistoria mais precisa nas estruturas das escavações e das edificações observadas, a fim de obter uma ampla compreensão dos parâmetros que constituem as cavidades. Sendo assim, os bairros foram Padre Faria, Barra, Morro Santana, São Francisco, Morro São Sebastião e Antônio Dias.

De forma geral, as cavidades visitadas podem ser agrupadas em duas classes, com suas particularidades, quando relacionadas ao conceito de resistência: rochas duras e rochas brandas. No primeiro grupo enquadram-se as nove cavidades localizadas no bairro Padre Faria, duas cavidades do Morro São Sebastião e uma ocorrência no bairro Antônio Dias, todas escavadas em itabiritos; além da cavidade de quartzito também localizada no Morro São Sebastião. As escavações do Padre Faria apresentam parâmetros geomecânicos considerados mediantemente resistentes (25-50MPa), presença de duas famílias de fraturas e um bandamento, evidenciando três planos de descontinuidade na rocha, com espaçamento entre as fraturas distando 2m, persistência de 7m e aberturas atingindo 10cm. Tais planos favorecem o abatimento de blocos que, em grande quantidade e associado ao sobrepeso das construções, podem colapsar a cavidade, afetando as edificações existentes acima e, automaticamente, colocando vidas em risco. Outro fator a ser considerado se trata da presença de água em algumas dessas escavações, que percolam pelos planos de fratura e aceleram a alteração do material, tornando-o menos coeso.

Enumerando as casas possíveis de serem impactadas pelo abatimento das cavidades do Padre Faria, pode-se dizer que seis delas estão diretamente acima das cavas, e outras próximas. Vale ressaltar as ocorrências localizadas no cruzamento entre a rua Santa Rita e rua Maciel que, embora não apresente moradias sobre a abertura, sofre forte impacto pelo trânsito de veículos na via que liga as cidades de Ouro Preto e Mariana. O teto das cavidades nesse ponto dista apenas 2m da estrada e, com a intensidade do tráfego, pode favorecer o colapso, danificando a área e comprometendo vidas.

As cavidades presentes nos bairros Morro São Sebastião e Antônio Dias evidenciam parâmetros ainda mais resistentes (50-250MPa), tanto nos itabiritos quanto no quartzito. Nelas, os planos de descontinuidade marcados pelas fraturas e bandamento, são os principais condicionantes de possíveis abatimentos. Nesses pontos, visualizam-se moradias sobre as escavações; no entanto, as condições geomecânicas não se mostram vulneráveis.

O segundo grupo classificado como rochas brandas, apresenta inteiramente três cavidades, e outras porções contidas no interior de rochas duras. A primeira delas se encontra no bairro Morro Santana, em um itabirito com resistência muito fraca (1-5MPa), bastante intemperizado, marcado por forte alteração dos minerais constituintes da rocha, com presença de quatro famílias de fraturas e um bandamento. A segunda e a terceira cavidade localizam-se, respectivamente, nos bairros São Francisco e Morro São Sebastião, ambas formadas pelo litotipo quartzo-sericita xisto, com grau de resistência fraco (5-25MPa), duas famílias de fraturas e presença de gotejamento no teto da cava, com material bastante alterado e deslocando do teto. Em especial, na terceira ocorrência destaca-se o contato abrupto com quartzito (presente acima do xisto), que aumenta o sobrepeso sobre o teto. Em todas as ocorrências de rochas brandas descritas, há o encontro de duas famílias de fraturas em cunha, favorecendo o colapso da estrutura, que atrelado ao sobrepeso das edificações existentes, aceleram o fenômeno de abatimento. Apenas a cavidade do bairro São Francisco contém moradias que seriam diretamente desestabilizadas pelo evento.

Não foi possível correlacionar a cavidade identificada na Barra com os grupos definidos acima, visto que o acesso estava dificultado pela cheia do ribeirão e, com isso, não se pôde caracterizar a escavação. No entanto, a edificação que seria afetada pelo possível abatimento, encontra-se interditada devido ao risco de deslizamento da encosta em que está inserida.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES

---

Diante da análise das informações contidas no banco de dados, verifica-se a predominância de ocorrências constituídas pelos litotipo itabirito e quartzito presentes no alinhamento da Serra de Ouro Preto; o que pôde ser confirmado através da descrição de 14 das 16 cavidades visitadas. A caracterização de todas as escavações propiciou o agrupamento em classes de rochas duras e brandas, evidenciando a concentração em graus de resistência altos, o que favorece a tenacidade das cavidades frente ao possível desabamento.

Nas rochas brandas, os fatores condicionantes para o abatimento das edificações são a menor resistência do material à compressão e o acunhamento de fraturas, além da leve interferência da água no fenômeno. Essa classe tem predominância do litotipo quartzo-sericita xisto e é marcada pelo deslocamento observado no teto das cavidades. A sobrecarga das casas, associado à percolação de água e alteração da rocha, contribui para o colapso. Já se tratando de rochas duras, a condição mais agravante está relacionada diretamente aos planos de descontinuidades, que favorecem a perda de coesão do material. De forma geral, a maior resistência da rocha à compressão retarda o possível colapso da estrutura.

No bairro Padre Faria foram descritas as edificações com maior proximidade entre o piso das casas e o teto das cavidades, o que torna necessário o acompanhamento da região. Em relação a inspeção das moradias, não foram observados indícios de abatimento nas suas estruturas; tais como recalque do piso, trincas ou rachaduras. No entanto, as condições geomecânica das rochas e estruturas geológicas existentes favorecem a queda das cavidades. Esta movimentação pode ser, na maioria das vezes, lenta e silenciosa, o que torna imprescindível o estudo e monitoramento dessas ocorrências, a fim de gerenciar as áreas de risco e antecipar possíveis danos ao município e à população.



## CAPÍTULO 8

### RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

---

Este estudo proporcionou a confecção do mapa de localização das cavidades catalogadas e identificou a existência de edificações que possam ser afetadas pelo abatimento de cavidades oriundas da exploração minerária no distrito sede de Ouro Preto, Minas Gerais. As informações coletadas e discutidas nos capítulos anteriores permitiram a caracterização, de forma ampla, dos parâmetros geomecânicos predominantes na região, bem como os aspectos geológicos principais que propiciam o desabamento dessas escavações, como os litotipos observados e a existência de descontinuidades nas rochas.

Diante disso, faz-se necessária uma análise mais minuciosa e detalhada de todas as ocorrências mapeadas no município. A vistoria das 109 cavidades, inicialmente identificadas no banco de dados, permitirá o gerenciamento do risco para a população, além de favorecer a catalogação de novas ocorrências. Para melhor entendimento do movimento de abatimento dessas cavidades, sugere-se a aplicação de microssísmica nos pontos críticos.

A criação do mapa de gerenciamento de risco do município é imprescindível para que, em parceria com a Defesa Civil de Ouro Preto, vidas e patrimônios possam ser preservados. Vale ressaltar a importância da quantificação de edificações e vias sobre as cavidades que poderão ser afetadas diretamente pelo abatimento. A partir desse mapa, poderão ser implementadas práticas que visem a melhoria das condições habitacionais do distrito sede, além de incitar a difusão da identificação e análise nos demais distritos de Ouro Preto.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Alkmim, F.F., Marshak, S. 1998. The transamazonian orogeny in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: paleoproterozoic collision and collapse in the Southern São Francisco Craton region. *Precambrian Research*, **90**: 29-58.
- Baltazar, O. F., Baars, F. J., Lobato, L. M., Reis, L. B., Achtschin, A. B., Berni, G. V., Silveira, V. D. 2005. Mapa Geológico Ouro Preto na Escala 1:50.000 com Nota Explicativa. *In*: Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero – Integração e Correção Cartográfica em SIG com nota explicativa. CODEMIG. Belo Horizonte.
- Barbosa, A.L.M. 1979. Variação de fácies na Série Minas. *In*: I Simpósio de Geologia de Minas Gerais. Belo Horizonte, *SBG-MG, Boletim 1*, p. 89-100.
- Campos, K.M.N. 2014. Vestígios da mineração de ouro na Serra do Veloso: uma contribuição à geo-história de Ouro Preto-MG. *Revista Espinhaço*, **3(2)**:15-27.
- Canuto, J.R. 2010. Estratigrafia de sequências em bacias sedimentares de diferentes idades e estilos tectônicos. *Revista Brasileira de Geociências*, **40(4)**:537-549.
- Cavalcanti, J.A.D. 1999. *Mineração aurífera de Lages e Antonio Dias, Ouro Preto – Minas Gerais: Controles litoestratigráficos e estruturais*. MS Dissertation, Instituto de geociências, Unicamp, São Paulo, 125p.
- Cemaden: Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. 2018. Movimento de Massa. Disponível em <https://www.cemaden.gov.br/deslizamentos/>. Acessado em 22 nov 2018.
- Chades, S.B. 2018. Desenvolvimento e aplicação de planilha de campo e identificação de áreas de risco geológico-geotécnico para a Defesa Civil da cidade de Ouro Preto - MG. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 62p.
- Chemale, F., Jr., Rosier, C.A., Endo, I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, **65**:25-54.
- Cordani, U.G., Kawashita, K., Miiller, G., Quade, H., Reimer, V., Roeser, H. 1980. Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento na borda sudeste do Quadrilátero Ferrífero. *An. Academia Brasileira de Ciências*, **52**:785-799.
- Corteletti, R.C. & Filgueiras, R.A.C. 2015. Projeto de Contenção da Encosta do Morro do Itararé - Associação dos Funcionários da Baixada Santista. São Vicente, SP. Vale Fertilizantes, 2015, 180p.
- CPRM. 2016.. Ação Emergencial para reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa e enchentes. Relatório de atualização de mapeamento, Ouro Preto-MG. 60p.
- Dos Anjos, D.A. 2018. Amálgama territorial do distrito sede da cidade de Ouro Preto - MG. PROEX (Pró-Reitoria de Extensão), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Dorr II, J.V.N. 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS/DNPM, Washington, p. 110. Prof. Paper 641-A.

Horta, D. C. 2019, Identificação e Análise de Perigo de Abatimento das Edificações sobre Cavidades...

Endo I. 1997. *Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozoico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes*, Minas Gerais. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 243p.

Farina, F., Albert, C., Dopico, C.M., Gil, C.A., Moreira, H., Hippertt, J.P., Cutts, K., Alkimin, F.F., Lana, C. 2015. The Archean-Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brazil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences*, **68**:4-21.

Fernandes, G. 2000. *Caracterização geológico-geotécnica e propostas de estabilização da encosta do Morro do Curral – Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto*. MS Dissertation, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 154 p.

Fontes, M.M.M. 2011. *Contribuição para o desenvolvimento da metodologia de análise, gestão e controle de riscos geotécnicos para a área urbana da cidade de Ouro Preto*. MS Dissertation, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 135p.

Guimarães, R. F., Carvalho, O. A., Gomes, R. A. T., Fernandes, N. F. 2008. Movimentos de Massa. In: Florenzano, T.G. *Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo: Oficina de Textos, p.159-184.

Infanti Jr, N., Fornasari Filho, N. 1998. Processos de Dinâmica Superficial. In: Oliveira, A.M.S, Brito, S.N.A. (Eds.). *Geologia de Engenharia*, 9, São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), p.131-152.

ISRM: International Society for Rock Mechanics. 1983. Characterization of Swelling Rock. Disponível em <https://www.isrm.net/gca/?id=1020>. Acessado em 16 nov 2018.

Johnston, I.W. 1993. Soft Rock Engineering. In: J.A. Hudson (Editor) *Comprehensive Rock Engineering*. Pergamon Press. Oxford, vol. 1, p. 367-393.

Moraes, L.J. 1945. O passado e o futuro da mineração em Ouro Preto. *Revista Geologia e Metalurgia*. **1**:49-55.

Neto, M.P. 2016. *Estudo da influência do nível d'água nas análises de estabilidade dos taludes da cava da Mina do Andrade*. MS Dissertation, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 248p.

Oliveira, L.D. 2010. *Ocupação urbana de Ouro Preto de 1950 a 2004 e atuais tendências*. MS Dissertation, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 151 p.

Oliveira, O. A. B. 2011. Aspectos geológicos relacionados às cavernas no Quadrilátero Ferrífero – MG. In 31º Congresso Brasileiro de Espeleologia. Ponta Grossa - PR, pag. 103-109.

Pechorkin, I.A. 1986. Engineering geological aspects of study of karst deposits. *Proc. 5th Int. Congress, Int. Assoc. Engineering Geology*. Buenos Aires, p. 637-641.

Pereira, L. S. 2011. *Ouro Preto e a estética do labirinto*. MS Dissertation, Centro de ciências exatas, ambientais e tecnologias, Pontífica Universidade Católica de Campinas, São Paulo, 101p.

- Pinho, A. B. 2003. *Caracterização geotécnica de maciços rochosos de baixa resistência: o Flysch do baixo Alentejo*. PhD Thesis, Universidade de Évora, Évora, 283 p.
- Romana, M. 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *In: International Symposium on the role of rock mechanics, ISRM. Proceedings: 49-53.*
- Romano, R., Lana, C., Alkmim, F.F., Stevens, G.S., Armstrong, R. 2013. Stabilization of the southern portion of the São Francisco Craton, SE Brazil, through a long-lived period of potassic magmatism. *Precambrian Research*, **224**:143-159.
- Silva, J.M. 2018. Sustentação de escavações subterrâneas civis e de mineração. *Revista In the mine*. **73**:31-33.
- Simmons, G.C. 1963. Canga caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *The National Speleological Society Bulletin*, **25**:66-72.
- Tavares, V.L.S. 2018. *Proposta de metodologia para índice de risco (iR) no distrito sede do município de Ouro Preto/MG: uma contribuição para a hierarquização das áreas de risco e as tomadas de decisões*. MS Dissertation, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 186p.
- Tominaga, K.L., Santoro, J., Amaral, R. 2009. Desastres naturais: conhecer para prevenir. Instituto Geológico, São Paulo, 196p.
- Unesp: Universidade Estadual Paulista 2018. Processos de dinâmica superficial. Disponível em <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter12.html>. Acessado em 20 nov 2018.
- Xavier, M. O. 2018. *Mapeamento da Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa utilizando a Análise Estatística do Valor Informativo aplicada ao Distrito Sede da Cidade Histórica de Ouro Preto-MG*. MS Dissertation, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 110p.

Horta, D. C. 2019, Identificação e Análise de Perigo de Abatimento das Edificações sobre Cavidades...



Horta, D. C. 2019, Identificação e Análise de Perigo de Abatimento das Edificações sobre Cavidades...

## Anexos

### ANEXO 1 – BANCO DE DADOS DAS CAVIDADES

Mina	Nome	East	North	Área Urbana	Litologia
1	Mina do Veloso	654859,47	7746175,81	Sim	Formação Ferrífera/Quartzito
2	Mina da Rainha	657650,00	7745036,19	Sim	Formação Ferrífera/Quartzito
3	Mina da Caixa D'água I	657143,38	7745110,13	Sim	Formação Ferrífera
4	Mina da Escada	654856,49	7746296,84	Sim	Formação Ferrífera/Quartzito
5	Mina Veloso I	654636,01	7746423,03	Sim	Formação Ferrífera
6	Mina Veloso II	654620,02	7746456,05	Sim	Formação Ferrífera
7	Mina do Luan	654718,45	7746419,74	Sim	Formação Ferrífera
8	Mina do Scliar I	656519,15	7745189,57	Sim	Formação Ferrífera
9	Mina do Scliar II	656535,97	7745190,52	Sim	Formação Ferrífera
10	Mina da Caixa D'água II	656528,26	7745272,18	Sim	Formação Ferrífera
11	Mina do Casarão	656726,08	7745319,08	Sim	Quartzito
12	Mina Sete Bocas I	656674,10	7745410,78	Não	Quartzito
13	Mina Sete Bocas II	656647,79	7745433,93	Não	Quartzito
14	Mina Sete Bocas III	656673,96	7745475,98	Não	Quartzito
15	Mina Sete Bocas IV	656686,64	7745481,73	Não	Quartzito
16	Mina Felipe dos Santos	657469,26	7745325,68	Sim	Formação Ferrífera
17	Mina do Claudiano	655752,43	7744876,94	Sim	Xisto
18	Mina Praça do Circo	655768,36	7744907,02	Sim	Xisto
19	Mina Rua XV de agosto I	656944,36	7745252,11	Sim	Formação Ferrífera
20	Mina Rua XV de agosto II	656879,17	7745211,85	Sim	Formação Ferrífera
21	Mina Rua XV de agosto III	657184,38	7745256,11	Sim	Formação Ferrífera
22	Mina da Mercia	656981,97	7745278,66	Sim	Formação Ferrífera
23	Mina da Ferraria	656204,70	7745505,50	Sim	Formação Ferrífera
24	Mina das Águas Férreas	658131,68	7745029,87	Sim	Formação Ferrífera
25	Mina da Joelma	657979,70	7745041,24	Sim	Formação Ferrífera
26	Mina do Chico Rei	656621,79	7745054,23	Sim	Formação Ferrífera
27	Mina Palácio Velho	656658,53	7745100,95	Sim	Formação Ferrífera
28	Mina Jeje	657004,87	7745089,15	Sim	Formação Ferrífera
29	Mina Hotel Boroni	655768,76	7745687,25	Sim	Xisto
30	Mina do Morro do Piolho I	655561,95	7746099,17	Sim	Formação Ferrífera
31	Mina Rua Valentim Policarpo	656289,53	7745524,65	Sim	Formação Ferrífera
32	Mina Casa Alberto	656345,60	7745663,74	Sim	Formação Ferrífera
33	Mina Casa Alberto Fundo	656397,10	7745713,09	Não	Contato Quartzito/Xisto
34	Mina Casa Alberto Lado	656327,77	7745676,85	Não	Formação Ferrífera
35	Mina Supermercado Popular	657356,65	7745089,69	Sim	Formação Ferrífera
36	Mina Hotel Casa Grande	656265,00	7745402,01	Sim	Formação Ferrífera
37	Mina Casa do Geleia	657289,85	7745112,45	Sim	Formação Ferrífera

38	Mina do Antônio	657539,31	7744950,86	Sim	Formação Ferrífera
39	Mina santa Rita	657703,00	7744913,01	Sim	Formação Ferrífera
40	Mina Thiara do Padre faria	657703,89	7744913,92	Sim	Formação Ferrífera
41	Mina Sete Bocas V	656690,07	7745400,11	Não	Quartzito
42	Mina Sete Bocas VI	656639,06	7745404,01	Não	Quartzito
43	Mina Sete Bocas VII	656654,03	7745431,11	Não	Quartzito
44	Mina Sete Bocas VIII	656662,05	7745429,04	Não	Quartzito
45	Mina Sete Bocas IX	656674,09	7745456,05	Não	Quartzito
46	Mina Sete Bocas X Fechadura	656666,04	7745443,07	Não	Quartzito
47	Mina Sete Bocas X Entrada	656658,99	7745471,03	Não	Quartzito
48	Mina Sete Bocas XI	656680,08	7745540,02	Não	Quartzito
49	Mina Sete Bocas XII	656680,06	7745550,10	Não	Contato Quartzito/Xisto
50	Mina Ponte da Estação	655865,09	7744627,06	Sim	Contato Quartzito/Xisto
51	Mina	656663,02	7745558,11	Não	Quartzito
52	Mina da Árvore	656674,07	7745568,09	Não	Quartzito
53	Mina Sete Bocas XIII	656670,07	7745587,05	Não	Quartzito
54	Mina Sete Bocas XIX	656668,03	7745615,08	Não	Quartzito
55	Mina Adão UFOP I Soterrada	656745,05	7745716,11	Sim	Formação Ferrífera
56	Mina Adão UFOP II	656819,09	7745651,12	Sim	Formação Ferrífera
57	Mina Sogra do Morgado	656960,05	7745050,04	Sim	Formação Ferrífera
58	Mina das Bananeiras	656771,06	7745113,10	Sim	Formação Ferrífera
59	Mina Veloso III	654604,21	7746451,10	Sim	Formação Ferrífera
60	Mina Veloso IV	654946,62	7746474,70	Não	Formação Ferrífera
61	Mina Veloso V	655134,30	7746380,57	Não	Contato Quartzito/Filito
62	Mina Reservatório de Água III	655179,58	7745939,23	Sim	Formação Ferrífera
63	Mina Travessa Magnésio	655159,58	7746128,05	Sim	Formação Ferrífera
64	Mina do Gugu	655157,83	7746073,38	Sim	Formação Ferrífera
65	Mina Fabricio	655170,52	7746044,70	Sim	Formação Ferrífera
66	Mina Morro SS1	655305,34	7746063,19	Não	Formação Ferrífera
67	Mina Morro SS2	655305,05	7746076,81	Não	Formação Ferrífera
68	Mina do PAC	655284,65	7746105,99	Não	Formação Ferrífera
69	Mina Veloso VI	655145,14	7746020,58	Sim	Formação Ferrífera
70	Mina Dona Helena I	655115,03	7746153,69	Sim	Formação Ferrífera
71	Mina Dona Helena II	655115,33	7746186,90	Sim	Formação Ferrífera
72	Mina Tiana	655249,22	7745986,42	Sim	Formação Ferrífera
73	Mina Escola Dom Veloso	655604,82	7744909,39	Sim	Xisto
74	Mina Linha do Trem	655090,28	7744570,87	Não	Formação Ferrífera
75	Mina Clube OPTC	656008,95	7744584,68	Sim	Xisto
76	Mina Casa dos Inconfidentes	655850,69	7744397,93	Sim	Formação Ferrífera
77	Mina Hotel Senhora do Rosário	655849,30	7745394,26	Sim	Formação Ferrífera
78	Mina	657188,47	7745725,23	Não	Formação Ferrífera
79	Mina Campinho I	657197,99	7745625,51	Não	Formação Ferrífera

80	Mina Campinho II	657156,14	7745614,82	Não	Formação Ferrífera
81	Mina Padre Faria	657640,31	7744912,95	Sim	Formação Ferrífera
82	Mina Lavanderia	657493,99	7744892,16	Sim	Formação Ferrífera
83	Mina do Adão	656218,55	7745822,65	Sim	Formação Ferrífera/Quartzito
84	Mina Tassara	657893,77	7745231,66	Sim	Formação Ferrífera/Quartzito
85	Mina Bueiro Rua Santa Rita	657327,80	7744982,24	Sim	Formação Ferrífera
86	Mina Salvador	657296,38	7744971,46	Sim	Formação Ferrífera
87	Mina Tiradentes	657130,09	7745050,48	Sim	Formação Ferrífera
88	Minas Boqueirão I	656651,86	7745098,38	Sim	Formação Ferrífera
89	Minas Boqueirão II	656676,06	7745135,37	Sim	Formação Ferrífera
90	Mina Capela Padre Faria	659346,01	7744912,24	Sim	Formação Ferrífera
91	Mina do Aqueduto I	654569,34	7746413,86	Não	Formação Ferrífera
92	Galeria Santa Rita	656046,96	7745637,74	Sim	Formação Ferrífera
93	Mina do Mundeio	658098,74	7745012,94	Sim	Formação Ferrífera
94	Mina do Morro do Piolho II	655295,00	7746023,46	Sim	Contato Quartzito/Xisto
95	Mina do Morro do Piolho III	655305,21	7746070,60	Não	Contato Quartzito/Xisto
96	Mina do Tetao	655282,90	7746097,16	Não	Contato Quartzito/Xisto
97	Mina do Morro do Piolho IV	655281,49	7746293,96	Não	Contato Quartzito/Xisto
98	Mina do Morro do Piolho V	655330,31	7746109,16	Não	Contato Quartzito/Xisto
99	Mina do Morro do Piolho VI	655329,30	7746082,43	Não	Formação Ferrífera
100	Mina Rua Perita	654574,55	7746452,36	Sim	Formação Ferrífera
101	Mina do Aqueduto II	654278,15	7746608,27	Não	Formação Ferrífera
102	Mina do Aqueduto III	654213,39	7746543,58	Não	Formação Ferrífera
103	Mina do Aqueduto IV	654002,45	7746561,32	Não	Formação Ferrífera
104	Mina do Aqueduto V	654035,55	7746669,79	Não	Formação Ferrífera
105	Mina do Aqueduto VI	654110,29	7746609,19	Não	Formação Ferrífera
106	Mina do Aqueduto VII	654117,98	7746605,95	Não	Formação Ferrífera
107	Mina José Augusto I	655079,94	7745968,68	Sim	Formação Ferrífera
108	Mina José Augusto II	657097,44	7745120,85	Sim	Formação Ferrífera
109	Mina José Augusto III	657635,57	7744987,28	Sim	Formação Ferrífera