



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



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO EM ZONAS DE RISCO POTENCIAL NA  
REGIÃO DE OURO PRETO, MINAS GERAIS**

**Guilherme Augusto Magalhães Gomes**

**MONOGRAFIA nº 289**

Ouro Preto, Julho de 2018



**CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO EM ZONAS DE  
RISCO POTENCIAL NA REGIÃO 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. Dr. Marco Antônio Fonseca



**MONOGRAFIA**

**Nº 289**

**CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO EM ZONAS DE  
RISCO POTENCIAL NA REGIÃO DE OURO PRETO, MINAS  
GERAIS**

**Guilherme Augusto Magalhães Gomes**

*Orientador*

Prof. MSc. Luiz Henrique Cardoso

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 2018 /1.

OURO PRETO

2018

---

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: Guilherme Augusto Magalhães Gomes  
Luiz Henrique Cardoso

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

G633c Gomes, Guilherme Augusto Magalhães.  
Classificação de maciço rochoso em zonas de risco potencial na região de Ouro Preto, Minas Gerais [manuscrito] / Guilherme Augusto Magalhães Gomes. - 2018.  
  
xxiii, 89f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.  
  
Orientador: Prof. MSc. Luis Henrique Cardoso.  
  
Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.  
  
1. Mecânica do solo. 2. Geofísica. 3. Classificação geomecânica. I. Cardoso, Luis Henrique. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.  
  
CDU: 550.3:624.13

Catálogo: [ficha.sisbin@ufop.edu.br](mailto:ficha.sisbin@ufop.edu.br)

## Ficha de Aprovação

---

### TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TÍTULO:** Classificação de maciço rochoso em zonas de risco potencial na região de Ouro Preto, Minas Gerais

**AUTOR:** GUILHERME AUGUSTO MAGALHÃES GOMES

**ORIENTADOR:** Prof. MSc. Luiz Henrique Cardoso

**Aprovada em:** 21 de Agosto de 2018

#### BANCA EXAMINADORA:

Prof. MSc. Luiz Henrique Cardoso  DEGEO/UFOP

Profa. Dra. Maria Sílvia C. Barbosa  DEGEO/UFOP

Prof. MSc. Edison Tazava  DEGEO/UFOP

**Ouro Preto, 21/08/2018.**



## Agradecimentos

---

A Deus e a Nossa Senhora, por todo o amparo, amor e proteção oferecidos a mim ao longo de minha vida.

Aos meus pais, Cecília e Isaias, que nunca mediram esforços para me proporcionar o melhor e estiveram sempre ao meu lado, ao longo de todo o caminho até aqui, me apoiando e amando incondicionalmente.

Às minhas irmãs Raissa e Tatiane, e a toda minha família, pelo apoio nas horas em que precisei.

Ao meu filho João Guilherme, que me deu amor, carinho e força de vontade pra seguir em frente e superar os obstáculos.

Aos amigos verdadeiros, por estarem sempre dispostos a dividir alegrias e também dificuldades.

Aos professores, em especial aos professores Luiz Henrique e Maria Sílvia, pelo empenho em ensinar e por todo conhecimento repassado a mim, permitindo-me alcançar a formação profissional.

*“O dinheiro faz homens ricos,  
o conhecimento faz homens sábios e a humildade faz grandes homens.”*



# SUMÁRIO

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>ix</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>xi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xix</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xxi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA.....	2
1.3 TRABALHOS ANTERIORES .....	4
1.4 JUSTIFICATIVA.....	5
1.5 OBJETIVOS .....	6
1.5.1 Objetivos Específicos .....	7
1.6 MATERIAIS E MÉTODOS .....	7
<b>2 FISIOGRAFIA E ASPECTOS GERAIS DA REGIÃO</b> .....	<b>9</b>
2.1 TERRITÓRIO .....	9
2.2 CLIMA.....	9
2.3 HIDROGRAFIA .....	10
2.4 GEOMORFOLOGIA .....	11
2.5 VEGETAÇÃO .....	12
2.6 ASPECTOS ECONÔMICOS .....	12
<b>3 GEOLOGIA REGIONAL</b> .....	<b>15</b>
3.1 LITOESTRATIGRAFIA .....	15
3.2 ARCABOUÇO ESTRUTURAL.....	17
3.3 EVOLUÇÃO GEOLÓGICA.....	18
<b>4. MÉTODOS GEOFÍSICOS</b> .....	<b>21</b>
4.1 MAGNETOMETRIA.....	21
4.1.1 Introdução .....	21
4.1.2 Fundamentos .....	21
4.1.3 Magnetismo dos materiais .....	23
4.1.4 Tratamento dos dados .....	25
4.2 RADIOMETRIA.....	26
4.2.1 Introdução .....	26
4.2.2 Radioatividade das rochas.....	26
4.2.3 Integração Radiométrica-geológica .....	28
<b>5. GEOMECÂNICA</b> .....	<b>29</b>
5.1 TIPOS PRINCIPAIS DE MOVIMENTOS DE MASSA.....	29

5.2 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS.....	33
5.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS POR BIENIAWSKI.....	35
<b>6 PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EM OURO PRETO.....</b>	<b>43</b>
<b>7 GEOLOGIA LOCAL .....</b>	<b>49</b>
7.1 ASPECTOS GERAIS .....	49
7.2 LOCALIZAÇÃO DE AFLORAMENTOS.....	56
<b>8. ANÁLISE GEOFÍSICA.....</b>	<b>57</b>
8.1 MAGNETOMETRIA.....	57
8.1.1 Metodologia .....	57
8.1.2 Apresentação dos resultados .....	58
8.2 RADIOMETRIA.....	60
8.2.1 Metodologia .....	60
8.2.2 Apresentação dos resultados .....	61
<b>9 ANÁLISE GEOMECÂNICA.....</b>	<b>65</b>
9.1 METODOLOGIA .....	65
9.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	65
<b>10 INTEGRAÇÃO DA GEOFÍSICA À GEOMECÂNICA .....</b>	<b>79</b>
<b>11 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>

## INDÍCE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1.1</b> - Acesso à área de estudo. Trajeto Belo Horizonte a Ouro Preto pela BR 356, rodovia dos Inconfidentes .....	4
<b>Figura 1.2</b> - Localização de Ouro Preto no Brasil e em Minas Gerais .....	4
<b>Figura 1.3</b> - A área possui seu principal acesso através da Praça Tiradentes, caminhando sentido Mariana .....	4
<b>Figura 2.1</b> - Índices Pluviométricos mensais de Ouro Preto - MG .....	10
<b>Figura 2.2</b> - Rede hidrográfica de Ouro Preto .....	11
<b>Figura 3.1</b> - Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero .....	16
<b>Figura 3.2</b> - O Cráton do São Francisco .....	18
<b>Figura 4.1</b> - Representação geométrica do campo magnético terrestre e seus elementos. NG: norte geográfico; NM: norte magnético; E: leste .....	22
<b>Figura 5.1</b> - Escorregamento Planar .....	29
<b>Figura 5.2</b> - Escorregamento em Cunha .....	30
<b>Figura 5.3</b> - Escorregamento rotacional .....	30
<b>Figura 5.4</b> - Desenho de vertente sofrendo rastejo .....	31
<b>Figura 5.5</b> - Queda, tombamento e rolamento de blocos rochosas .....	32
<b>Figura 5.6</b> - Corrida de massa ao longo de canal fluvial .....	33
<b>Figura 5.7</b> - Aspectos da formação de blocos em função da interseção de juntas .....	38
<b>Figura 6.1</b> - Evolução da ocupação da área urbana de Ouro Preto do século XVIII ao XX ...	45
<b>Figura 6.2</b> - Ocupação urbana em Ouro Preto entre 1698 e 1940 .....	45
<b>Figura 6.3</b> - Evolução da ocupação da encosta no bairro Jardim Alvorada .....	46
<b>Figura 6.4</b> - Escorregamento na Rua Padre Rolim em 1979 .....	46
<b>Figura 6.5</b> - Movimento de massa que atingiu a rodoviária da cidade de Ouro Preto no dia 3 de janeiro de 2012 .....	46
<b>Figura 7.1</b> – Mapa dos pontos visitados em campo.....	49
<b>Figura 7.2</b> - Mapa litoestratigráfico da cidade de Ouro Preto .....	51
<b>Figura 7.3</b> - Anticlinal de Mariana com os eixos de investigação geomecânica (A, B e C: ortogonais, respectivamente, ao corte lateral e frontal do maciço e à foliação) ....	52
<b>Figura 7.4</b> - Carapaça de canga ferrífera detrítica sustentando a Serra de Ouro Preto. P5 no mapa de pontos apresentado na figura 7.9 .....	53
<b>Figura 7.5</b> - Afloramento de itabirito alterado próximo à rua Águas Férreas. P1 no mapa de pontos.....	54
<b>Figura 7.6</b> - Feição estrutural com quartzo em afloramento da figura anterior exibindo cinemática. P1 no mapa de pontos.....	54
<b>Figura 7.7</b> - Afloramento de quartzito apresentando foliação bem definida no bairro Piedade. P3 no mapa de pontos .....	55
<b>Figura 7.8</b> - Quartzito em meio ao itabirito e canga ferrífera no bairro Morro da Queimada sustentando a Serra de Ouro Preto. P4 no mapa de pontos .....	55
<b>Figura 7.9</b> - Mapa de pontos com localização dos pontos visitados durante os campos.....	56
<b>Figura 8.1</b> - Fluxograma e apresentação dos mapas temáticos magnetométricos .....	59

<b>Figura 8.2</b> - Mapa temático de Amplitude do sinal analítico, sendo apresentadas as morfofaces magnetométricas 1, 2, 3 e 4 e os lineamentos magnéticos regionais.....	60
<b>Figura 8.3</b> - Fluxograma e apresentação dos mapas temáticos radiométricos .....	62
<b>Figura 8.4</b> - Mapa temático canal Th, sendo apresentadas as morfofaces radiométricas 1,2,3 e 4 além dos lineamentos principais.....	63
<b>Figura 9.1</b> - Feições de deslizamento em cunha em itabirito. P1 no mapa de pontos.....	66
<b>Figura 9.2</b> - Feições de movimento em cunha no interior de cavidade no afloramento de itabirito. P1 no mapa de pontos .....	67
<b>Figura 9.3</b> - Feição de movimento em cunha descrito na imagem anterior observado lateralmente. P1 no mapa de pontos .....	68
<b>Figura 9.4</b> - Ocorrência pontual de espaçamento entre discontinuidades maior que 5mm em afloramento de itabirito. P1 no mapa de pontos .....	68
<b>Figura 9.5</b> - Afloramento de itabirito com foliação e plano de fratura da família J3 bem definidos. P1 no mapa de pontos .....	69
<b>Figura 9.6</b> - Foliação e famílias de juntas J3, J4 e J5 em afloramento de itabirito. P2 no mapa de pontos .....	70
<b>Figura 9.7</b> - Fratura da família J6 apresentando baixo mergulho vista em corte lateral do maciço. P6 no mapa de pontos .....	70
<b>Figura 9.8</b> - O sobrepeso gerado pela ocupação urbana é fator condicionante para caracterizar a estabilidade do maciço rochoso. P7 no mapa de pontos.....	71
<b>Figura 9.9</b> - Encanamento mal acondicionado próximo ao afloramento de itabirito mostra influência antrópica. P1 no mapa de pontos .....	72
<b>Figura 9.10</b> - Matações caracterizam movimentos de massa do tipo queda de blocos no topo da serra. P8 no mapa de pontos .....	73
<b>Figura 9.11</b> - Matações no Morro da Queimada. P8 no mapa de pontos .....	73
<b>Figura 9.12</b> - Depósito de Talus. P9 no mapa de pontos.....	74
<b>Figura 9.13</b> - Filito alterado exposto por escorregamento planar de itabirito e material alterado no bairro Piedade. P10 no mapa de pontos.....	74
<b>Figura 9.14</b> - Feição de movimento em cunha em maior escala, caracterizado pelas famílias J1, J2 e pelo plano de foliação. P11 no mapa de pontos .....	75
<b>Figura 9.15</b> - Evidências de ação antrópica. Injeção de caldas de cimento no bairro Morro Santana. P11 no mapa de pontos .....	76
<b>Figura 9.16</b> - Corte de antiga galeria para extração do ouro feito acompanhando a família J2. P12 no mapa de pontos .....	76
<b>Figura 10.1</b> - Correlação entre a sobreposição dos mapas geofísicos interpretados sobre a geologia e a topografia.....	81
<b>Figura 10.2</b> - Projeção estereográfica das atitudes das famílias de juntas observadas em campo: J1, J2, J3, J4, J5 e J6, e a foliação metamórfica.....	82



## ÍNDICE DE QUADROS

---

<b>Quadro 4.1</b> - Susceptibilidade magnética das rochas .....	24
<b>Quadro 4.2</b> - Filtros e suas finalidades .....	25
<b>Quadro 4.3</b> - Minerais radioativos e suas ocorrências .....	27
<b>Quadro 4.4</b> - Conteúdo radioativo das principais rochas ígneas .....	28
<b>Quadro 5.1</b> - Principais classificações geomecânicas .....	35
<b>Quadro 5.2</b> - Classificação e perfis de rugosidade das descontinuidades .....	39
<b>Quadro 5.3</b> - Parâmetros de Classificação dos Maciços Rochosos.....	41
<b>Quadro 5.4</b> - Parâmetro relacionado à orientação das descontinuidades .....	41
<b>Quadro 5.5</b> - Classe do maciço rochoso com valores de coesão e ângulo de atrito.....	42
<b>Quadro 6.1</b> - Registro Histórico de Ocorrências na cidade de Ouro Preto de 1989 até 2009 .	43
<b>Quadro 6.2</b> - Número de feições e porcentagem relativa (em área) dos tipos de movimentos gravitacionais de massa e processos correlatos .....	44
<b>Quadro 6.3</b> - Parâmetros geotécnicos da cidade de Ouro Preto .....	47
<b>Quadro 8.1</b> - Campos de variação para as morfofaceis magnetometricas definidas no mapa ASA .....	60
<b>Quadro 8.2</b> - Campos de variação relativa da porcentagem de isótopos para morfofaceis radiometricas definidas nos mapas de canal Th, K e U.....	63
<b>Quadro 9.1</b> - Avaliação dos parâmetros e resultados obtidos .....	77

## **INDICE DE TABELAS**

---

<b>Tabela 5.1</b> - Resistência a compressão uniaxial estimados a partir de testes de campo com o martelo do geólogo .....	37
--	----



## Resumo

---

Ouro Preto, situada na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, é famosa por ser tombada como patrimonial mundial da humanidade e, por outro lado, pelos catastróficos eventos de movimentação de massa que têm assolado a população e perdurado por várias décadas desde o início da ocupação urbana na região. Grande parte da cidade está assentada na serra da porção norte, a Serra de Ouro Preto que, por sua vez, se trata do flanco sul do Anticlinal de Mariana, estrutura regional do QF. O flanco é contextualizado por unidades lito estratigráficas do Supergrupo Minas que são, basicamente, quartzitos, itabiritos, xistos e filitos e, por vezes, carbonatos. Os itabiritos são rochas que apresentam boa porosidade / permeabilidade favorecendo infiltração das águas meteóricas. Abaixo dos Itabiritos estão os filitos que, por sua vez, são pouco permeáveis. Assim, a percolação de água em subsuperfície fica restrita entre a camada de itabirito e o contato itabirito / filito. O sobrepeso pela saturação de águas nos itabiritos associado à foliação metamórfica que mergulha favorável à inclinação das encostas, à alta densidade de juntas oriunda das várias deformações do Quadrilátero Ferrífero, à trepidação exaustiva do maciço pelo tráfego intenso de automóveis, ao despejo de dejetos fluidos em galerias de mineração abandonadas que adentram o maciço, ao sobrepeso gerado pelas ocupações urbanas irregulares em áreas impróprias, e a outros fatores, contribuem de forma expressiva à ocorrência de movimentos de massa. O problema exposto motiva a elaboração do presente trabalho que é fundamentado em investigar, sob o ponto de vista da geofísica aérea (magnetometria e radiometria), os lineamentos geoestruturais regionais e integrar os resultados aos dados da literatura e levantados em campo, auxiliando à realização da classificação geomecânica, via *Rock Massive Rating*, de maciço rochoso de itabirito na porção leste da Serra de Ouro Preto. Foram interpretados seis lineamentos geofísicos regionais que ajudaram a reconhecer seis famílias de juntas no campo. Assim, foi possível fazer a classificação em somente uma direção que é a ortogonal ao corte frontal do maciço, obtendo o valor 64 que o caracteriza como bom e estima parâmetros geomecânicos, a coesão e o ângulo de atrito interno, nas faixas de 300 a 400kPa e 35 a 45°. Geofísica local como Eletrorresistividade e Ground Penetration Radar integrados aos métodos clássicos de estabilidade de taludes e análises de laboratório (cisalhamento simples e ensaio triaxial) são recomendados em estudos posteriores.

**Palavras chave:** magnetometria, radiometria, *Rock Massive Rating*, movimentos de massa, Anticlinal de Mariana, itabirito, Serra de Ouro Preto, Quadrilátero Ferrífero.

---

## Abstract

---

Ouro Preto, located in the southeast of the Quadrilátero Ferrífero, is famous for being listed as a world patrimony of mankind and, on the other hand, for the catastrophic events of mass movement that have devastated the population and lasted for several decades since the beginning of the urban occupation in the region. Much of the city is settled on the northern portion of the mountain, the Serra de Ouro Preto, which in turn is the southern flank of the Mariana Anticlinal, a regional structure of the Quadrilátero Ferrífero. The flank is contextualized by lithostratigraphic units of the Minas Supergroup, which are basically quartzites, itabirite, schist and phyllites, and sometimes carbonates. Itabirites are rocks that have good porosity / permeability favoring infiltration of meteoric waters. Below the Itabiritos are the phyllites which, in turn, are little permeable. Thus, percolation of sub-surface water is restricted between the itabirite layer and the itabirite / phyllite contact. The overweight due to the saturation of water in the itabirite associated with the metamorphic foliation that plunges favorable to slope slopes, the high density of joints coming from the various deformations of the QF, the exhaustive trepidation of the massif by the intense traffic of automobiles, the discharge of fluid sludge in galleries of abandoned mining that enter the massif, the overweight generated by irregular urban occupations in improper areas, and other factors, contribute significantly to the occurrence of mass movements. The exposed problem motivates the elaboration of the present work, which is based on investigating, from the point of view of aerial geophysics (magnetometry and radiometry), the regional geostructural guidelines and integrate the results to the literature data and collected in the field, with the purpose of to support the accomplishment of the geomechanical classification, through Rock Massive Rating - RMR, of rock mass of itabirite in the eastern of Serra de Ouro Preto. Six regional geophysical lineaments were interpreted that helped to recognize six families of discontinuities in the field. Thus, it was possible to make the classification in only one direction that is orthogonal to the frontal cut of the massif, obtaining the value 64 that characterizes it as good and estimates geomechanical parameters, cohesion and the angle of internal friction, in the bands of 300 to 400kPa and 35 to 45°. Local geophysics such as Eletroresistivity and Ground Penetration Radar integrated with classical methods of slope stability and laboratory analysis (simple shear and triaxial) are recommended in later studies.

**Key words:** magnetometry, radiometry, Rock Massive Rating, mass movements, Anticlinal de Mariana, itabirite, Serra de Ouro Preto, Quadrilátero Ferrífero.



# CAPITULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 APRESENTAÇÃO

Ouro Preto, que está situada na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, é famosa por seu acervo patrimonial, reconhecido mundialmente, no tocante à sua história, à cultura herdada, aos aspectos econômicos como o ouro e topázio imperial, bem como, à universidade federal que, além de toda sua tradição de escolas antigas como as escolas de Minas e Farmácia, movimentou a economia local, contextualizando assim, um interim altamente positivo. Por outro lado, é famosa também pelos catastróficos eventos de movimentação de massa que têm assolado a comunidade ouro-pretana e perdurado por várias décadas desde o início da ocupação urbana na região até hoje.

Contudo, os principais problemas geotécnicos da região de Ouro Preto estão relacionados a rochas do Supergrupo Minas que, são basicamente, quartzitos, formações ferríferas, xistos e filitos, visto que a região está no domínio do flanco sul do Anticlinal de Mariana (Nalini-Jr 1993), estrutura regional do Quadrilátero Ferrífero. Na região há duas serras principais, que são paralelas e estão estruturadas na direção aproximadamente EW. São as serras do Itacolomi e de Ouro Preto, que estão situadas, respectivamente, nas porções sul e norte. Sustentando a Serra de Ouro Preto, estão os itabiritos da Formação Cauê e sua cobertura de redistribuição sedimentar (cangas ferríferas), bem como os quartzitos da Formação Moeda. No sopé das serras e fundo dos vales estão os xistos e filitos do Grupo Piracicaba e da Formação Batatal.

Os itabiritos são rochas que apresentam boa porosidade favorecendo infiltração das águas meteóricas, assim, comporta-se como um aquífero. Logo abaixo dos Itabiritos estão os filitos da Formação Batatal, rochas metassedimentares de granulometria fina, o que as torna pouco permeáveis, impedindo a infiltração da água, que não ultrapassa a camada de filito. Assim, o fluxo da água em subsuperfície fica restrito entre a camada de itabirito e o contato itabirito / filito. O sobrepeso causado pela saturação de águas nos Itabiritos durante períodos mais prolongados de chuvas, associado ao contexto geológico dos filitos que se encontram abaixo do itabirito, a foliação metamórfica que mergulha favorável ao talude das encostas, bem como, a alta densidade de juntas, as condições hidrogeológicas, a contribuição negativa da vegetação de raízes rasas assentadas sobre o maciço rochoso, a trepidação exaustiva do maciço pelo tráfego intenso de automóveis, o despejo de dejetos fluidos em galerias que adentram o maciço, dentre outros, contribuem de forma expressiva para ocorrência de deslizamentos.

Outro fator de extrema relevância aos processos de escorregamentos é o sobrepeso gerado pelas ocupações irregulares em áreas impróprias, também muito comuns na cidade. Além disso, as rochas estão altamente intemperizadas devido ao clima úmido (abundância de água meteórica) e relevo acidentado (que propicia boa infiltração e bom escoamento superficial). Isto leva a formação de espessas camadas de material alterado que culminam em desmoronamentos na região. A última movimentação de massa na região foi um deslizamento ocorrido, no dia 3 de janeiro de 2012, quando aproximadamente 33.000m<sup>3</sup> de matéria cederam e soterraram parte da do terminal rodoviário de Ouro Preto, vitimando duas pessoas, segundo dados da Defesa Civil da cidade.

A problemática exposta motiva a elaboração do presente trabalho que é fundamentado em investigar, sob o ponto de vista da geofísica, os lineamentos geoestruturais regionais para dar suporte à realização da classificação geomecânica de maciço rochoso de itabirito em zona periférica de Ouro Preto. Para a análise regional serão utilizados dados aeromagnetométricos e aeroradiométricos da região disponibilizados gratuitamente pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM. Pelo processamento dos mesmos se integrará a interpretação litoestrutural dos mapas geofísicos temáticos aos dados geológicos e geomecânicos da literatura e de campo. Na segunda etapa será realizada a classificação geomecânica do maciço rochoso, via Rock Massive Rating - RMR, referente à porção leste da cidade, que é uma parte periférica urbanizada, onde estão situados os bairros Morro Santana, Morro da Queimada, Piedade, Taquaral e Alto da Cruz, nos quais houve desastres expressivos por movimentações de massa no maciço.

## **1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA**

A cidade de Ouro Preto (Datum Córrego Alegre, Zona 23S, 652000m E, 7740000m S e 660000m E, 7748000m S) está localizada na porção sudeste do estado de Minas Gerais, Brasil, a, aproximadamente, 107 km da capital do estado, Belo Horizonte. O acesso principal, a partir da capital, é feito no sentido Rio de Janeiro - RJ, pela BR 040, até o entroncamento com a BR 356, seguindo aproximadamente 60 km até o município de Ouro Preto (figura 1.1). A área em estudo está próxima ao limite entre as cidades de Ouro Preto e Mariana, cujas coordenadas que a limitam abrange os bairros periféricos da porção leste de Ouro Preto. Trata-se dos bairros Taquaral, Morro Santana, Morro da Queimada, Padre Faria, Piedade e Alto da Cruz, os quais estão assentados na Serra de Ouro Preto, onde exposições naturais de itabirito afloram nas encostas. A área possui seu principal acesso pela Praça Tiradentes, caminhando sentido Mariana (figuras 1.2 e 1.3). Encontra-se nas proximidades Bacia do Rio das Velhas, situada na região central do Estado de Minas Gerais. A porção mais alta da bacia encontra-se na Cachoeira das Andorinhas, próximo à área de estudo, considerada uma das nascentes do Rio das Velhas.

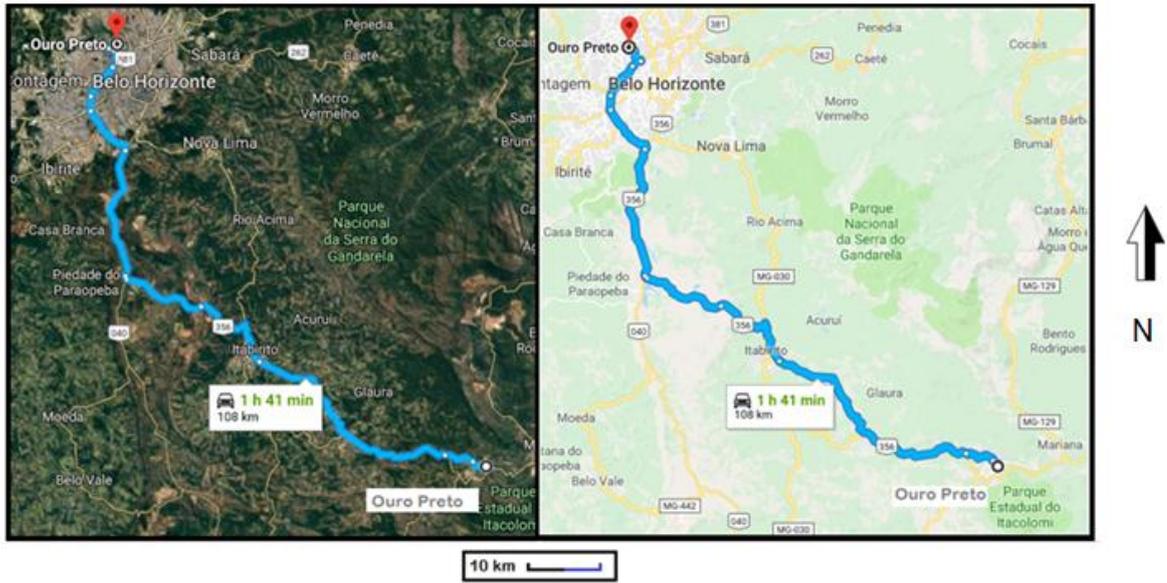


Figura 1.1 - Acesso à área de estudo. Trajeto Belo Horizonte a Ouro Preto pela BR 356, rodovia dos Inconfidentes. Retirado e modificado de Google Earth.

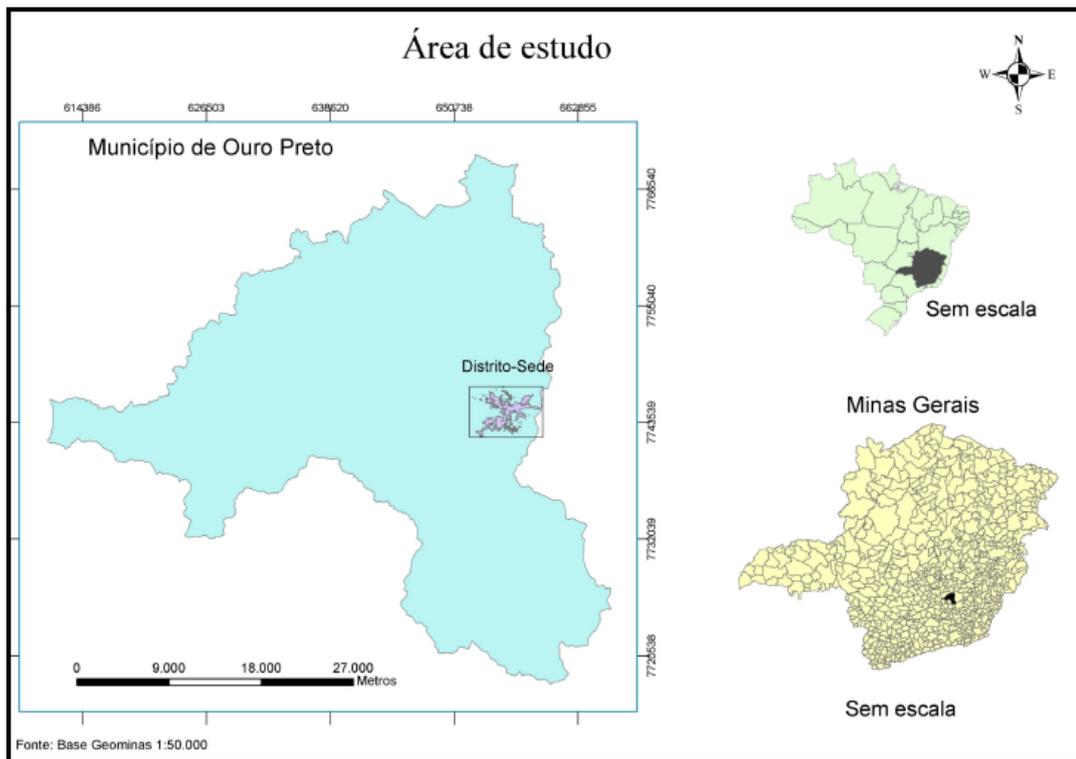
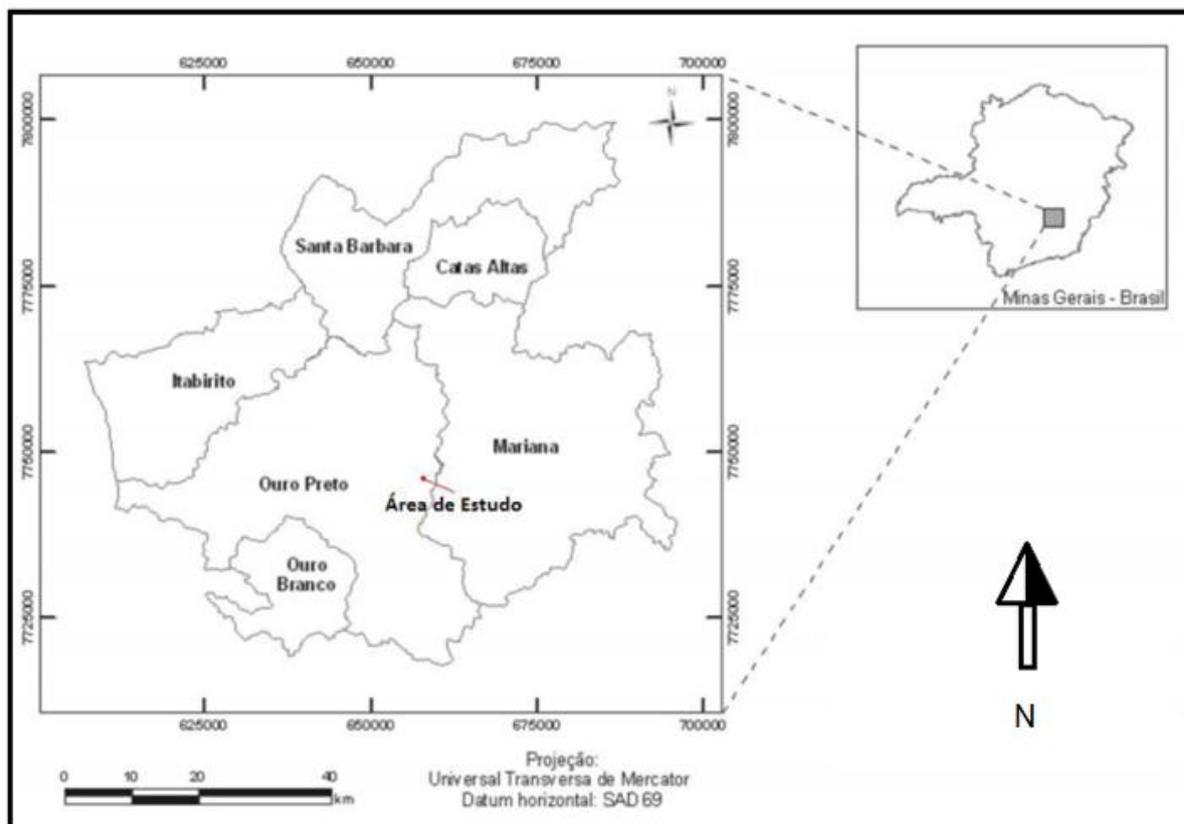


Figura 1.2 - Localização de Ouro Preto no Brasil e em Minas Gerais. Fonte: Shapefiles obtidas no Portal da Geologia (Lobato *et al.* 2005).



**Figura 1.3** - A área possui seu principal acesso através da Praça Tiradentes, caminhando sentido Mariana. Fonte: *Shapefiles* obtidas no Portal da Geologia (Lobato *et al.* 2005).

### 1.3 TRABALHOS ANTERIORES

Nos últimos anos ressaltam-se: o Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero (Baltazar *et al.* 2005), da CODEMIG, que gerou mapas na escala 1:50.000 que foi adotado como referência cartográfica nesse estudo.

Em termos geotécnicos, Carvalho (1987) publicou a Carta Geotécnica de Ouro Preto, onde considerou parâmetros como declividade e qualidade do terreno, afim de estabelecer um zoneamento de risco geológico na cidade de Ouro Preto com razoável precisão (em escala 1:2.000) e custo limitado. Contudo, parece que o sistema de coordenadas utilizado é incompatível com o sistema do presente trabalho, o que impossibilita plotar nesta carta, os pontos observados em campo.

Fonseca e Sobreira (1997) realizaram através do trabalho *The Landslide at Piedade Borough, Ouro Preto, Minas Gerais: Instability Processes in old mining Areas*, o estudo de um grande movimento de massa no bairro Piedade, ocorrido no mesmo ano de publicação, envolvendo um volume de cerca de 800m<sup>3</sup> de material, que resultou na morte de 12 civis, na destruição total de duas casas além do comprometimento de várias outras.

Fonseca & Sobreira (1998) através do trabalho *Geologic risk resulting from the land use of old mining sites in the Piedade Neighborhood, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil* relacionaram os riscos envolvidos à ocupação desordenada de locais onde no passado se minerava o ouro, tendo como principal resultado a elaboração de um mapa de risco da área estudada.

No tocante à Geofísica, magnetometria e radiometria têm sido aplicadas, principalmente na análise estrutural e mapeamento geológico. Assim, inúmeros trabalhos vêm mostrando bons resultados neste sentido. Carneiro & Barbosa (2008) analisam diversas famílias de lineamentos na região de Oliveira por meio de dados magnetométricos aerolevantados. Este tipo de análise também é feita por Queiroz (2012) que, além disso, aplica radiometria para mapear geologicamente a região de Mirabela, onde se concentram mineralizações associadas a litotipos máficos e ultramáficos. No trabalho de Carvalho (2006), as interpretações das estruturas geradas por radiometria e magnetometria mostram que as mineralizações de esmeralda na região a nordeste do Quadrilátero Ferrífero ocorrem em áreas falhadas, principalmente ligadas às bordas da zona de cisalhamento. Cardoso (2016) realiza investigação litológica e geoestrutural do flanco N/NE do Anticlinal de Mariana, via magnetometria e radiometria aérea, e consegue bom resultado na prospecção de cavidades naturais em canga ferrífera. Adicionalmente, vários trabalhos de conclusão do curso de Engenharia Geológica da UFOP mostram bons resultados da integração destes métodos para análise litoestrutural.

#### **1.4 JUSTIFICATIVA**

A partir dos anos 60, com o processo de expansão da cidade de Ouro Preto, a ocupação do solo se deu de forma desordenada resultando em uma urbanização caótica na formação de bairros, desrespeitando assim, as imposições inerentes as qualidades dos terrenos.

Segundo Sobreira (1991) condições geológicas e geomorfológicas são fatores predisponentes à ocorrência de movimentos de massa e processos erosivos. Paralelamente, períodos de chuvas intensas e prolongadas agravam esse quadro de predisposição incorrendo em riscos para a comunidade local.

Neste sentido, Ouro Preto tem um acervo de fatores que contribuem à instabilidade geotécnica e que justifica pesquisas que envolvam análises geomecânicas de maciços rochosos, tais como, relevo acidentado favorecendo o intemperismo; clima tropical úmido cujo índice pluviométrico é relativamente alto no verão em que são verificadas fortes e demoradas estações chuvosas que contribuem não apenas ao intemperismo, mas também aos eventos de velocidade alta como os escorregamentos; rochas respondem diferencialmente às intempéries; rochas foliadas com mergulhos favoráveis à inclinação das encostas; arcabouço geo-estrutural marcado por poli deformações gerando várias famílias de juntas;

sobrepeso de vegetação de porte pequeno a médio nos maciços; rochas com diferentes porosidades e permeabilidades, o que afeta a maior ou menor infiltração no maciço, sendo a infiltração o fator preponderante pelo parâmetro das pressões neutras e aumento do peso total do maciço.

Em adição, a defesa civil de Ouro Preto está sempre realizando intervenções em moradias cartografadas geotécnicamente em zonas de risco, cujos moradores insistem em residir. Os problemas, além dos citados, envolvem; fundações sobre galerias antigas de exploração de Ouro Preto; despejo de dejetos fluidos nos maciços onde estão assentadas as moradias; plantio de bananeiras o que intensifica o processo de movimentação de massa; colocação de lona sobre os taludes o que pode mascarar as evidências de movimentação; incremento de mais cômodos nas moradias sem qualquer critério geotécnico; construção sobre aterros; encanamentos com vazamento o que incorre em infiltração no maciço; dentre outros.

São tantas variáveis a se considerar na análise geotécnica da região, que é esperado que os resultados e discussões do presente trabalho possam contribuir pelo menos parcialmente junto aos critérios e diretrizes já estabelecidos na literatura e na defesa civil, no tocante à definição da continuação da ocupação ou não, ou até mesmo, a desapropriação da área em estudo, mitigando a atuação antrópica na promoção ou aceleração de processos de movimentações de massa, evitando que possíveis eventos possam vitimar mais pessoas.

Por fim, uma importante ferramenta a ser utilizada para estudos geotécnicos é a geofísica aplicada. Diversos trabalhos tem trazido um grande ganho ao tocante aos resultados e discussões sobre a análise litológica-estrutural, via aerogeofísica (magnetometria e radiometria) de vários contextos geológicos distintos. Assim, ao presente trabalho que levanta famílias de juntas e seus detalhes geotécnicos, é justificado o uso da geofísica na análise litológica-estrutural como suporte ao estudo geomecânico.

## **1.5 OBJETIVOS**

O objetivo geral desse trabalho consiste na classificação geomecânica de maciço de itabirito em zona periférica do Distrito Sede do município de Ouro Preto com histórico de movimentações de massa e evidências de problemas geotécnicos diversos, com o auxílio da análise de dados aero geofísicos no tocante à caracterização litológico-estrutural.

### **1.5.1 Objetivos Específicos**

- gerar mapas geofísicos temáticos magnetométricos: Campo Anômalo, Amplitude do Sinal Analítico, Mapas de gradiente vertical e horizontal em x e y, e mapa residual;
- gerar mapas geofísicos temáticos radiométricos: Canais de Urânio, Tório e Potássio, razões entre os radioisótopos, Contagem Total e Fator F;
- interpretar os mapas magnetométricos dividindo-os em morfofáceis magnetométricas para delimitar o maciço de itabirito; discriminar os lineamentos magnéticos, representando-os em diagramas estatísticos como a cruzeta de lineamentos e interpretá-los;
- interpretar os mapas radiométricos dividindo-os em morfofáceis radiométricas, definindo diferentes combinações dos três radioisótopos correlacionáveis a um determinado domínio geomorfológico.
- discriminar os lineamentos radiométricos, representando-os em diagramas estatísticos como a cruzeta de lineamentos e interpretá-los;
- levantar dados de campo conforme os parâmetros definidos no Sistema de Classificação Geomecânica RMR;
- discutir os lineamentos da geofísica com os encontrados em campo e realizar a classificação geomecânica considerando a discussão;
- discutir outras considerações que não são balizadas nos parâmetros definidos pelo sistema RMR, mas que são importantes na análise geotécnica na área.

### **1.6 MATERIAIS E MÉTODOS**

O trabalho foi desenvolvido em quatro etapas:

- 1) Revisão bibliográfica: a revisão bibliográfica foi feita discriminando a geologia regional; fisiografia (já que este trabalho está diretamente ligado a geomorfologia); os métodos

geofísicos envolvidos, que foram magnetometria e radiometria aérea e Geomecânica, a qual aborda a classificação de maciços rochosos e movimentos de massa.

- 2) Processamento de dados geofísicos, com a geração de mapas temáticos magnetométricos e radiométricos, com a interpretação de lineamentos regionais magnéticos e radiométricos bem como fáceis dos métodos mencionados.
- 3) Levantamento de campo, principalmente e de famílias de juntas, e observação de todos os parâmetros da classificação geomecânica RMR, bem como o levantamento de outros aspectos geológicos.
- 4) Integração da geofísica à geomecânica para classificação do maciço rochoso de Itabirito da área em estudo e discussão.

## CAPITULO 2

### FISIOGRAFIA

---

#### 2.1 Território

Localizada na Serra do Espinhaço, na Zona Metalúrgica de Minas Gerais (Quadrilátero Ferrífero), Ouro Preto (município) se encontra na Região Central da Macrorregião Metalúrgica e Campo das Vertentes de Minas Gerais.

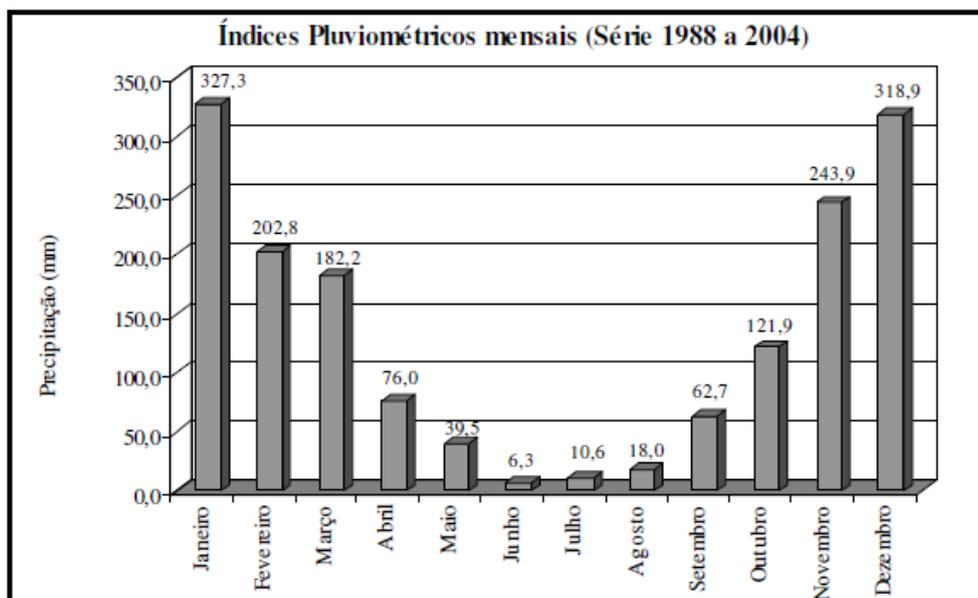
Sua área de unidade territorial equivale a 1.245,865 km<sup>2</sup>, tendo como limites ao Sul: Catas Altas da Noruega, Itaverava, Ouro Branco e Congonhas, a Oeste: Belo Vale e Moeda, a Leste: Mariana e ao Norte: Itabirito e Santa Bárbara.

Possui 12 distritos: Amarantina, Antônio Pereira, Cachoeira do Campo, Engenheiro Correia, Glaura, Lavras Novas, Miguel Burnier, Rodrigo Silva, Santa Rita de Ouro Preto, Santo Antônio do Leite, São Bartolomeu, Santo Antônio do Salto e o Distrito Sede.

#### 2.2 Clima

A relação de baixa latitude compensada pela altitude e conformação orográfica regional, faz com que a cidade de Ouro Preto tenha características básicas do clima tropical de montanhas. Nesse contexto, os verões são mais amenos e nos invernos predominam baixas temperaturas e elevada umidade atmosférica (Castro 2006). O clima ouro-pretano corresponde ao tipo Cwb, isso significa que é um clima úmido (mesotérmico), com verões chuvosos e invernos secos. O índice de precipitação máximo atingido no verão, é dez vezes maior que a precipitação no mês mais seco (Alvares *et al.* 2013).

A temperatura na cidade varia entre 6° e 28°C podendo chegar a 2°C entre os meses de junho e julho, já a temperatura média anual é de 18,5°C. Janeiro corresponde ao mês mais quente e julho ao mês mais frio. Em geral, as altas temperaturas coincidem com o período chuvoso enquanto que as mais baixas ocorrem no período seco (IGA 1995). A região de Ouro Preto possui alta pluviosidade, sendo a altitude do município um dos fatores determinantes para isso. A altitude média na cidade, é de 1.116m sendo o ponto mais alto Pico do Itacolomi, com 1.722m. O regime pluviométrico é caracterizado como tropical, com média em torno de 1.610,1 mm anuais. A pluviosidade se concentra principalmente entre os meses de outubro e março, correspondendo a 87% da precipitação anual como é mostrado na figura 2.1, que apresenta as médias pluviométricas mensais no período de 1988 a 2004 (Castro 2006).

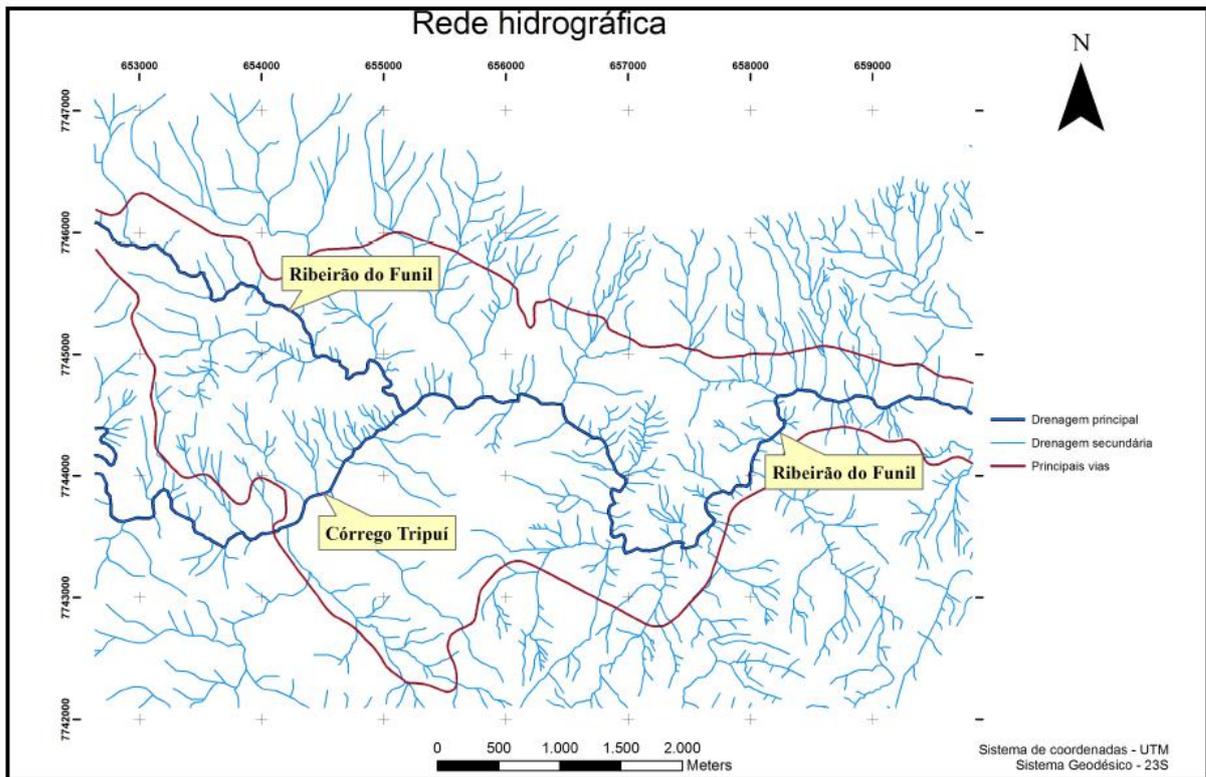


**Figura 2.1** - Índices Pluviométricos mensais de Ouro Preto - MG, Dados de COMPDEC Ouro Preto.

### 2.3 Hidrografia

A serra de Ouro Preto divide duas grandes bacias hidrográficas brasileiras, a do Rio São Francisco e a do Rio Doce. A cidade está inserida principalmente na bacia hidrográfica afluenta do Doce, o Ribeirão do Carmo. Essa bacia equivale a 2,73 % do Rio Doce, possuindo 134 km de extensão e uma área de 2.279 km<sup>2</sup> (Tavares 2006). Popularmente o Ribeirão do Carmo é conhecido, em Ouro Preto, como Ribeirão do Funil e possui um padrão de drenagem predominantemente dendrítico, já em um dos seus afluentes, o córrego Tripuí, o padrão é retangular como pode ser observado na figura 2.2.

Na região ainda se encontram as nascentes do Rio das Velhas, Piracicaba, Gualaxo do Norte, Gualaxo do Sul e Mainart.



**Figura 2.2** - Rede hidrográfica de Ouro Preto. Fonte: Shapefiles obtidas no Portal da Geologia (Lobato *et al.* 2005).

## 2.4 Geomorfologia

Quanto ao relevo, sua topografia distribui-se em 5% relevo planos, 40% em ondulados e 55% montanhosos, com distribuição irregular e chuvas concentradas no verão. Destaca-se no cenário nacional não somente por suas riquezas minerais, mas também por sua diversidade faunística e florística, clima marcante, e morfologia abrangente.

De acordo com Gomes *et al.* (1998), a morfologia local caracteriza-se por altas montanhas de desenvolvimento linear, áreas aplainadas com atitudes diversas e vales alongados, muitas vezes bem encaixados. Os traços do relevo, acidentado com vertentes bem íngremes e vales profundos e encaixados, mostram uma clara dependência da geologia local. O principal elemento na área urbana é a Serra de Ouro Preto, limite norte da malha urbana e divisor de grandes bacias regionais. As altitudes estão em torno de 1.060 metros nas partes mais baixas e 1.400 metros no topo da Serra de Ouro Preto.

A partir dos estudos de Alkmim & Marshak (1998), podemos dizer que a cidade de Ouro Preto está inserida sobre terrenos antigos e geologicamente complexos, com litologias variadas aflorando lado a lado, tornando possível uma heterogeneidade da paisagem, com diferentes aspectos topográficos, de clima, altitude, faunístico e florístico.

## **2.5 Vegetação**

Em se tratando da vegetação, pode se dizer que existe a predominância de transição entre subtipos da Mata Atlântica e do Cerrado. Ouro Preto abriga Campos Rupestres, matas de Araucária, florestas de candeias e possui grandes áreas remanescentes da Mata Atlântica. Parte dessa diversidade ocorre devido à presença dos campos ferruginosos, e há espécies vegetais restritas à região, constituindo um ambiente único no estado (Drummond *et al.* 2005).

## **2.6 Aspectos Econômicos**

Historicamente, o nome Ouro Preto foi adotado em 20 de maio de 1823, quando a antiga Vila Rica foi elevada a cidade. "Ouro Preto" vem do ouro escuro, recoberto com uma camada de óxido de ferro, encontrado na cidade (Biblioteca Nacional 1973). Embora oficialmente, após descoberta do ouro e processo extensivo de extração tenham sido enviadas a Portugal 800 toneladas de ouro no século XVIII, hoje, o ouro só existe na lembrança dos moradores mais antigos, mas o minério, pelo contrário, ainda é farto. Há 19 empresas trabalhando diretamente com extração mineral no município de Ouro Preto. Juntas, elas são responsáveis por quase 90% de tudo que é arrecadado pelos cofres públicos, de acordo com informações da prefeitura municipal. Conta ainda com pequenas minerações de topázio.

Em 1980, Ouro Preto classificou-se como Patrimônio da Humanidade pela relevância histórica de suas edificações e traçados urbanos, bem como pela posse do mais completo acervo das esculturas de Antônio Francisco Lisboa, o Aleijadinho, um ícone do Barroco brasileiro. A crescente importância econômica de Ouro Preto justifica-se também pelo incremento do turismo, intensificado a partir da sua definição como Patrimônio da Humanidade.

No final do século 17, as cidades de Ouro Preto e Mariana foram os principais palcos da descoberta de inúmeras jazidas auríferas de aluvião (Oliveira 1977 e Cavalcanti 1999). Segundo Vasconcelos (1974), a bandeira de Salvador Fernandes Furtado de Mendonça e Miguel Garcia em 1696, foi a pioneira da ocupação da atual cidade de Ouro Preto em consequência da descoberta de ouro nas margens do Ribeirão do Carmo. Já em 1698, Antônio Dias e Padre João de Faria encontraram ouro nas proximidades do Pico do Itacolomi, o que acarretou em um aumento exponencial da migração para região, que viveu seu apogeu entre os anos de 1739 e 1759. (Ziravello *et al.* 1999).

Quando a exploração se iniciou, os aluviões eram os principais alvos das buscas, isso devido ao alto teor e facilidade de tratamento. Segundo Eschwege (1833) os depósitos de aluvião eram classificados em três tipos: nos leitos dos rios, nos tabuleiros caracterizados por serem depósitos nas

margens dos rios em um nível logo acima do leito, e as grapiaras que eram mais elevadas situadas nos flancos das montanhas e originadas geralmente por meandros abandonados.

Posteriormente, iniciou-se a exploração nas encostas aplicando os métodos de lavra a céu aberto, rapidamente as montanhas ganharam um aspecto desnudo e inteiramente desolado. Para atingir o veio aurífero, toneladas de materiais de cobertura eram retirados, talhando as encostas em taludes para se atingir o fundo com máximo de segurança. À medida que penetravam em profundidade, os mineradores necessitavam alargar as bordas dessas imensas escavações cujas jazidas quase sempre, possuíam apenas alguns centímetros (Ferrand 1894).

O período de decadência veio após 1750, e trouxe consigo a escassez de alimentos, a fome, a miséria, a desordem e os primeiros indícios do esgotamento do ouro de aluvião que iria se concretizar no final daquele século (Meniconi 2001).

Eschwege (1833) e Calógeras (1904) dividem os trabalhos de mineração de acordo com a localização do jazimento. Nos vales, o objetivo era cavar até se atingisse as camadas ricas, abriram-se dessa forma catas profundas, que geralmente só era possível extrair poucos centímetros da camada. Essas camadas geralmente eram compostas por argilas e xistosas retiradas para posterior tratamento. Nos flancos (encostas) eram exploradas as rochas friáveis ou decompostas, na maioria das vezes xistos argilosos vermelhos e cortados por ricos veios de quartzo que se desenvolviam à meia encosta nas montanhas. No interior das montanhas (minas) as jazidas demandaram o desenvolvimento de métodos de lavras para a extração em galerias subterrâneas. A busca era por camadas de Itabirito cortadas por veios de quartzo, que geralmente afluíam nas bases das montanhas e seguiam a direção do veio em direção ao seu interior.

Contudo, mais agressivo que os trabalhos subterrâneos, foram os trabalhos mineração a céu aberto que envolveram áreas bem mais extensas e promoveu um passivo ambiental bem maior, O desmonte hidráulico era o processo mais comum, utilizando águas de chuva e da nascente da serra de Ouro Preto. As consequências dos processos de mineração na cidade são vistos até hoje através das alterações nas formas das encostas e das redes de drenagem, formação de grandes depósitos de dendritos e blocos rochosos a meia encosta, criação de taludes íngremes e instáveis, e o desencadeamento de processos erosivos acelerados (Sobreira 1990).

Atualmente, apesar de a economia de Ouro Preto depender muito do turismo, há também importantes indústrias metalúrgicas e de mineração no município. As principais atividades econômicas são o turismo, a indústria de transformação e as reservas minerais do seu subsolo, tais como ferro, bauxita, manganês, talco e mármore. Os minerais de importância são o ouro, a hematita, a dolomita, turmalina, topázio e topázio imperial.



## CAPITULO 3

### GEOLOGIA REGIONAL

---

#### 3.1 LITOESTRATIGRAFIA

O maciço em pesquisa está associado a sequências supracrustais do Quadrilátero Ferrífero, que estão assentadas sobre o embasamento cristalino composto por, que conforme Roeser & Roeser, 2010, são gnaisses tonalíticos e graníticos de idade arqueana (>2,7 Ga). Contudo, são reconhecidas três sucessões no Quadrilátero Ferrífero: Supergrupo Rio das Velhas que é do tipo *greenstone belt* de idade arqueana (Carneiro *et al.* 1998); Supergrupo Minas, onde o maciço está situado; e Grupo Itacolomi, ambos paleoproterozoicos (Dorr 1969, Machado *et al.* 1996 e Alkmim & Marshak 1998). A figura 3.1 mostra a estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero, segundo Alkmim & Marshak (1998).

Portanto, nem o Supergrupo Rio das Velhas que é constituído por rochas metavulcânicas e metassedimentares (Derby, 1906 - Série Rio das Velhas), nem o Grupo Itacolomi que é constituído, predominantemente, por quartzitos relacionados à ambiente litorâneo ou deltaico, não serão detalhados por não se contextualizarem ao maciço em pesquisa.

O enfoque é dado ao Supergrupo Minas definido por Derby 1906, como “Série Minas” e, atualmente, ajustado por Alkmim & Marshak (1998), na sucessão estratigráfica, da base para o topo: grupos Caraça, Itabira e Piracicaba,

O Grupo Caraça é dividido, da base para o topo, nas formações Moeda (Dorr *et al.* 1957 e Wallace 1958) constituída pelo quartzitos, filitos e conglomerados; e Batatal (Maxwell 1958) constituído por xisto, filito, chert e hematita.

O Grupo Itabira Dorr (1969) é dividido, da base para o topo, nas formações Cauê e Gandarela. A primeira é constituída por itabiritos (lentes de hematita compacta e pulverizada e zonas manganésíferas) e a segunda, por itabiritos dolomíticos, filitos dolomíticos argilosos, dolomito, metacalcários manganésíferos e mármore localmente, zonas manganésíferas e ferríferas.

O Grupo Piracicaba é dividido em quatro formações, da base para o topo: Cercadinho caracterizada por filitos prateados, quartzitos ferruginosos e lentes de dolomito; Fecho do Funil que apresenta filitos dolomíticos e argilosos e mármore; Taboões que é constituída por quartzito cinza-claro e friável; e Barreiro que é representada por filitos gráficas e filitos com colorações diversas (Dorr 1969).

As sequências do Quadrilátero Ferrífero são intrudidas por diques máficos (Alkmim & Marshak 1998). Ressalta-se também na estratigrafia as coberturas de redistribuição sedimentar, caracterizadas pelas extensas coberturas de cangas ferríferas. As cangas variam de idade cretácica (Tricart 1961 in

Varajão 1988) até quaternárias (Monteiro *et al.* 2014). As cangas podem ser do tipo estruturada, denominação dada ao itabirito intemperizado; detrítica, quando é construída por detritos das diversas sequências mencionadas; química, quando na constituição há alto conteúdo de limonita e pouco de detritos; e rica, cujos detritos seriam hematíticos com teor Fe >64% (Dorr 1964, 1969).

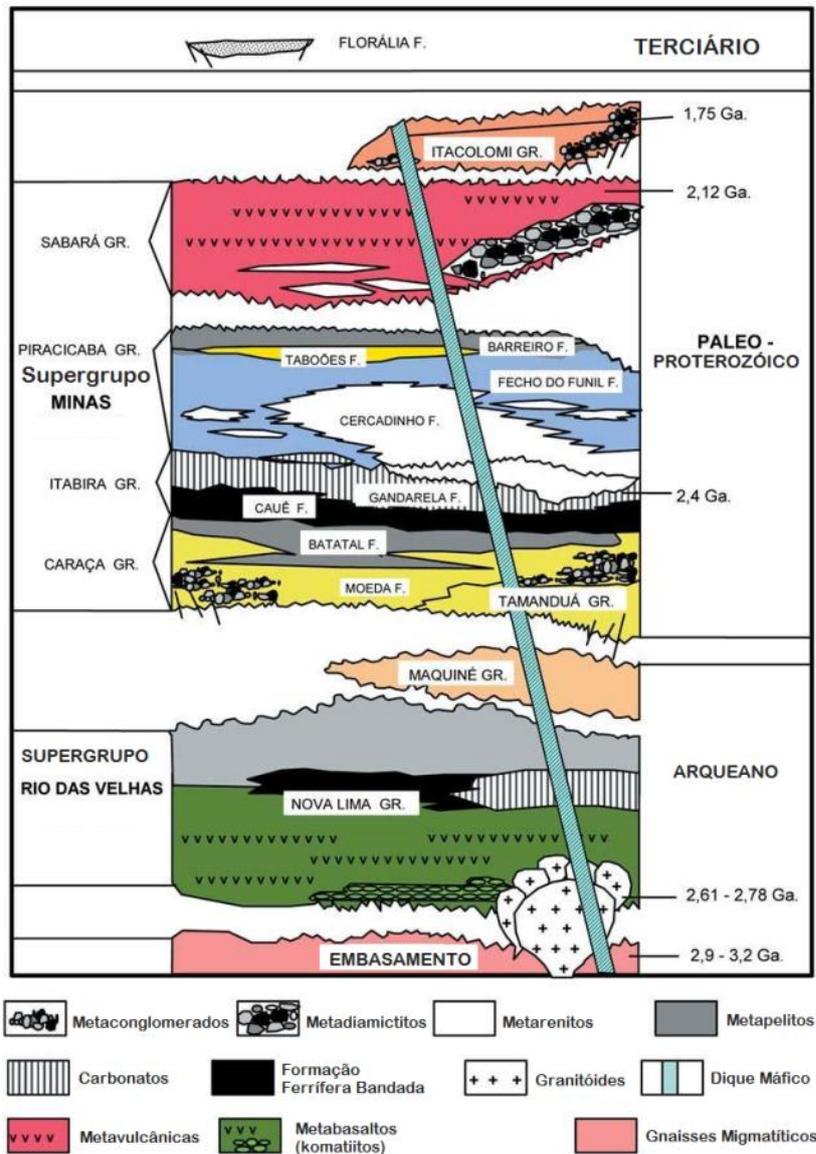


Figura 3.1 - Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero, modificada de Alkmim e Marshak (1998).

### 3.2 ARCABOUÇO ESTRUTURAL

O Quadrilátero Ferrífero localiza-se no limite de dois importantes elementos geotectônicos da Plataforma Sul-Americana, o Cráton do São Francisco e o Orógeno Araçuaí, como se pode observar na figura 3.2. O Quadrilátero ocupa a posição de antepaís do Cinturão Mineiro (Teixeira & Figueiredo 1991), que corresponde a uma margem colisional paleoproterozoica, com *trend* ENE-WSW, parcialmente preservada, no extremo sul do Cráton do São Francisco (Alkmim & Noce 2006).

A estrutural regional do Quadrilátero Ferrífero estudada neste trabalho é o Anticlinal de Mariana. Nalini Jr. (1993) admite dois eventos tectônicos atribuídos a esta estrutura: um extensional e um compressional subsequente.

O evento extensional foi caracterizado pelos dobramentos regionais do Anticlinal de Mariana por dobras (Fex) parasíticas, pela foliação (Sex) paralela ao acamamento e fraturas de tração preenchidas por veios. Este evento promoveu o soerguimento do embasamento da região e o arqueamento das seqüências supracrustais dos supergrupos Rio das Velhas e Minas.

O evento compressional caracteriza-se por um transporte tectônico de leste para oeste e é representado por três fases deformacionais: D1 (dobramentos e cavalgamentos), D2 (crenulação, dobras abertas com eixo EW e falhas direcionais, aproximadamente, EW); e D3 (crenulação, dobras abertas ortorrômbricas ou monoclinicas vergentes para E, e fraturamento EW e NE).

O Sistema de Cisalhamento Fundão-Cambotas relaciona-se ao Anticlinal de Mariana, dando origem a rampas oblíquas, sendo uma delas a Serra de Ouro Preto, no domínio do Flanco S/SW, segundo Endo & Fonseca (1992). No mapa geológico da cidade de Ouro Preto que será apresentado adiante, são notórias feições de empurrão deste sistema.

Portanto, ficam balizadas as falhas direcionais EW, os fraturamentos EW e NE e as juntas relacionadas às expressões de empurrão do sistema de cisalhamento mencionado como dados de literatura para serem reconhecidos nos trabalhos de campo, para posterior discriminação em famílias de juntas e verificação dos parâmetros geomecânicos considerados na classificação utilizada neste trabalho.

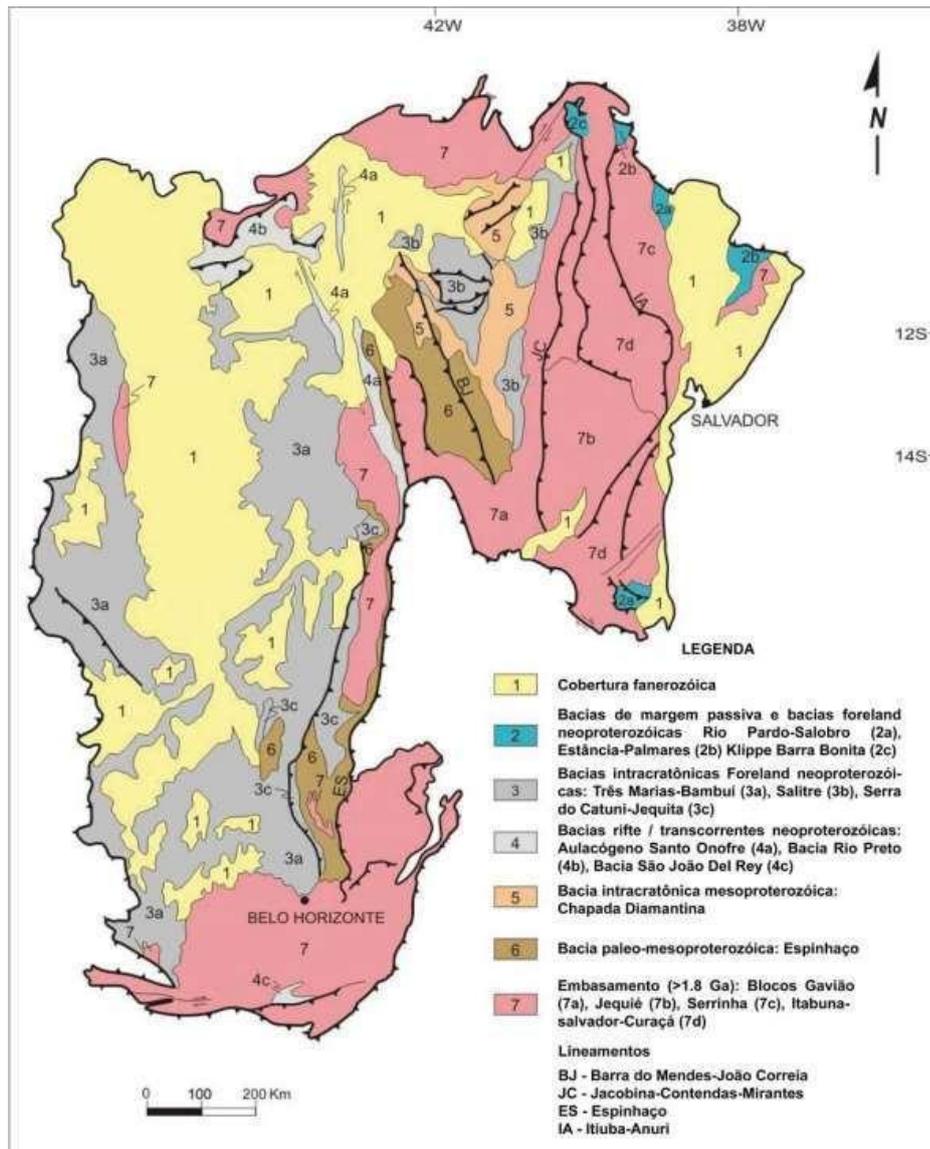


Figura 3.2 - O Cráton do São Francisco. Modificado de Delgado, 2003.

### 3.3 EVOLUÇÃO GEOLÓGICA

De acordo com Alkmim & Marshak (1998) a crosta continental formada no Quadrilátero Ferrífero passou por esforços distensivos entre 2,6 a 2,1 bilhões de anos atrás. Estes esforços levaram a formação de uma bacia sedimentar. O termo bacia sedimentar é usado para se referir a uma área geográfica que exibe uma depressão em relação ao terreno do entorno, formando uma grande bacia que recebe os sedimentos provenientes das áreas altas que a circundam, os quais vão se acumulando e sendo soterrados. Esta bacia sedimentar foi preenchida inicialmente por areias em um ambiente continental (Grupo Caraça). Com o afundamento da bacia, a água do mar entrou permitindo a deposição química

de formações ferríferas e de carbonatos (Grupo Itabira). Posteriormente, houve soerguimento de áreas em torno da bacia permitindo a deposição de areias e argilas do Grupo Piracicaba. Todas estas rochas fazem parte da unidade denominada de Supergrupo Minas. Seguem as etapas:

#### *Formação da Bacia Minas*

A crosta continental formada no Quadrilátero Ferrífero passou por esforços distensivos entre 2,6 a 2,1 bilhões de anos atrás. Estes esforços levaram a formação de uma bacia sedimentar. O termo bacia sedimentar é usado para se referir a uma área geográfica que exibe uma depressão em relação ao terreno do entorno, formando uma grande bacia que recebe os sedimentos provenientes das áreas altas que a circundam, os quais vão se acumulando e sendo soterrados. Esta bacia sedimentar foi preenchida inicialmente por areias em um ambiente continental (Grupo Caraça). Com o afundamento da bacia, a água do mar entrou permitindo a deposição química de formações ferríferas e de carbonatos (Grupo Itabira). Posteriormente houve soerguimento de áreas em torno da bacia permitindo a deposição de areias e argilas do Grupo Piracicaba. Todas estas rochas fazem parte da unidade denominada de Supergrupo Minas.

#### *Evento Transamazônico*

Entre 2,10 e 1,80 bilhões de anos atrás grandes esforços tectônicos com colisão e junção de blocos continentais envolvem o Quadrilátero Ferrífero fechando a bacia sedimentar (Bacia Minas) e depositando as rochas sedimentares e vulcânicas do Grupo Sabará. Ocorrem falhamentos e dobramentos das rochas em escala regional. O evento tectônico responsável por estes esforços é conhecido como Evento Transamazônico.

#### *Deposição do Grupo Itacolomi*

O movimento de colisão continental que afetou a bacia dá lugar a cadeias de montanhas e permite a deposição de areias do Grupo Itacolomi em calhas entre montanhas. As rochas do Supergrupo Minas dão forma ao Quadrilátero Ferrífero e nelas ocorre uma das maiores reservas de minério de ferro do mundo.

### *Evento Brasileiro*

Entre 0,70 e 0,50 bilhões de anos atrás o Quadrilátero Ferrífero é afetado por um outro evento tectônico (denominado de Brasileiro) afetando sua porção oriental com novos dobramentos e falhamentos das rochas. O Quadrilátero Ferrífero é mundialmente reconhecido pela sua importância científica no registro da evolução da Terra ao longo de mais de 3 bilhões de anos e vem sendo objeto de estudos nacionais e internacionais desde o século XIX.

O ciclo neoproterozoico Brasileiro - Pan Africano (850 - 500 Ma) descreve a formação de Gondwana Ocidental desde a quebra do supercontinente anterior Rodinia, a abertura e fechamento de oceanos, subducção e colisão de arcos de ilha e continentes até a fusão / aglutinação final. Esse importante ciclo geodinâmico, supercontinental, envolvendo a Plataforma Sul-Americana, foi responsável pela formação, durante o Neoproterozoico, de extensas faixas dobradas nas regiões Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul do Brasil.

# CAPÍTULO 4

## MÉTODOS GEOFÍSICOS

---

### 4.1 MAGNETOMETRIA

#### 4.1.1 Introdução

A Magnetometria consiste basicamente em um método geofísico que tem como princípio realizar a medição do campo magnético secundário das rochas para investigar estruturas em subsuperfície. O campo magnético secundário é gerado pela interação das rochas com o campo magnético terrestre, e pode se sobrepor ou contrapor ao campo principal, a estas interações damos o nome de susceptibilidade magnética. É um método potencial, uma vez que não há necessidade que a superfície seja excitada para se realizar o levantamento (Telford *et al.* 1990).

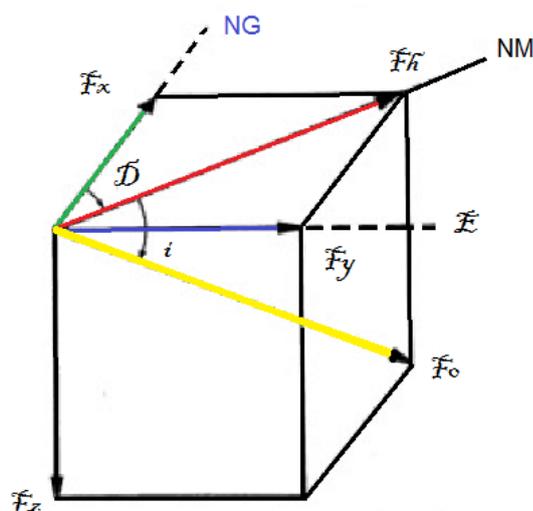
Cada tipo de material interage de uma determinada forma com o campo magnético. Alguns minerais presentes nas rochas como por exemplo a calcopirita, a magnetita e a calcocita dão respostas bem distintas durante as medições devido ao seu caráter magnético, e a esse tipo de resposta é dado o nome de anomalia. Anomalias podem caracterizar e definir desde depósitos minerais de importância econômica a lineamentos e zonas de descontinuidades nas rochas (Luiz & Silva 1995).

Trata-se de um método rápido e eficiente de aquisição e processamento das informações, de baixo custo, que pode ser usado em conjunto com outros métodos geofísicos para a avaliação e caracterização de alvos exploratórios de interesse, porém os minerais magnéticos são geralmente raros na constituição das rochas e a interpretação dos dados obtidos não é trivial. Ao instrumento utilizado para as medições é dado o nome de magnetômetro, que mede a intensidade do campo magnético e suas componentes (Luiz & Silva 1995).

#### 4.1.2 Fundamentos

A teoria mais moderna apresentada nos anos 40 por W. M. Elasser e Sir Edward Bullard explica que a Terra funciona como um dínamo, mostrando que o campo magnético na superfície é produzido por correntes elétricas que circulam no núcleo externo líquido da Terra, constituído por ferro e níquel, como células de convecção. A teoria, denominada de Teoria do Dínamo, também explica a variação secular do campo magnético terrestre e as inversões de polaridade magnética (Kearey *et al.* 2009). Por outro lado, sabe-se que o núcleo terrestre não é responsável pela geração de todo campo magnético. Em menor parcela, existem campos gerados por materiais magnéticos da crosta e correntes elétricas

induzidas por campos magnéticos externos à Terra (Luiz & Silva 1995). O campo magnético possui caráter dipolar, com os polos magnéticos representando a extremidade de “ímãs”, sendo a carga positiva na extremidade norte e a negativa na extremidade sul (Telford *et al.* 1990). Segundo Luiz & Silva (1995), o campo magnético da Terra pode ser representado por um vetor em qualquer ponto da superfície terrestre pelas componentes demonstradas na figura 4.1.



**Figura 4.1** - Representação geométrica do campo magnético terrestre e seus elementos. NG: norte geográfico; NM: norte magnético; E: leste. Retirado de Luiz & Silva (1995).

O campo magnético total ( $F_0$ ) é decomposto em elementos vetoriais denominadas componente horizontal ( $F_h$ ), ou norte magnético (NM), e componente vertical ( $F_z$ ). O ângulo entre o campo total  $F_0$  e a componente horizontal  $F_h$  é denominado de inclinação magnética ( $i$ ) e o ângulo que a componente horizontal  $F_h$  faz com o norte geográfico (NG) é denominado de declinação magnética ( $D$ ). A componente horizontal pode ser decomposta na componente norte ( $F_x$ ), na direção do norte geográfico (NG), e na componente leste ( $F_y$ ), na direção leste geográfico (E). Quando a componente vertical aponta para o interior da Terra é considerada positiva, o que ocorre na maior porção do hemisfério norte. Por outro lado, é negativa, quando aponta para fora da Terra, o que acontece no hemisfério sul (Luiz & Silva 1995).

O IGRF é um modelo produzido por estudiosos de todo o mundo e aprovado pela Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia - IAGA. Através do IGRF, o campo magnético terrestre é simbolizado por um somatório de harmônicos esféricos, com coeficientes gerados a partir de levantamentos magnéticos realizados em todo o planeta. O IGRF é uma ferramenta comum de pesquisadores geofísicos e cientistas espaciais como um modelo de referência de boa qualidade,

utilizado como referência na definição das perturbações causadas no campo por estruturas geológicas e depósitos minerais, ou seja, como referência na definição de anomalias magnéticas para prospecção (Luiz & Silva 1995).

#### 4.1.3 Magnetismo dos materiais

Os corpos na Terra mudam de comportamento quando submetidos a um campo magnético. As rochas que contêm minerais magnéticos, por exemplo, apresentam um campo secundário quando expostas a um campo magnético. Assim, um corpo colocado num campo magnético  $H$  adquire uma magnetização  $M$  que é proporcional ao campo (Telford *et al.* 1990):

$$M = k H \text{ (Equação 4.1)}$$

A susceptibilidade magnética ( $k$ ) é muito pequena na maioria dos materiais, podendo ser diamagnético ( $k < 0$ ) ou paramagnético ( $k > 0$ ). Alguns corpos ainda apresentam magnetização espontânea, sendo associadas aos maiores valores de atração, que são denominadas de objetos ferromagnéticos (Luiz & Silva 1995). A interação nos objetos ferromagnéticos é tão forte que somente uma temperatura elevada é capaz de mudar essa propriedade, a temperatura de Curie, que faz o objeto a se comportar como paramagnético.

A magnetização presente nas rochas pode ser classificada em dois tipos: magnetização induzida e magnetização residual remanescente. A magnetização induzida é provocada pelo campo magnético terrestre e a intensidade desse campo é proporcional a susceptibilidade magnética dos minerais. Já a magnetização residual remanescente é adquirida ao longo da história geológica, em campos magnéticos diferentes do atual. Assim, a magnetização total da rocha é constituída na soma vetorial dessas duas (Luiz & Silva 1995).

A interferência gerada pelas rochas no campo magnético terrestre produz perturbações locais que são classificadas em função da susceptibilidade magnética. Essas perturbações geram diferentes relevos magnéticos, associados a extensão, comprimento, profundidade, inclinação e latitude do corpo. Quanto maior a concentração dos minerais magnéticos mais acentuado será o relevo magnético (Telford *et al.* 1990). Assim, rochas sedimentares ricas em minerais magnéticos, com exceção as formações ferríferas, apresentam relevos magnéticos suaves, por apresentarem susceptibilidade magnética comumente baixa. Dentre as rochas ígneas, as básicas apresentam valores altos de susceptibilidade

magnética e as ácidas valores baixos, sendo assim, as rochas básicas produzem um relevo magnético acidentado. As rochas metamórficas podem apresentar relevos suaves, intermediários ou acidentados, em função da origem das rochas e das alterações provocadas pelo processo metamórfico. O quadro 4.1 mostra a variação da susceptibilidade magnética em algumas rochas.

ROCHAS		VARIAÇÃO x10 <sup>6</sup> emu	MÉDIA x10 <sup>6</sup> emu
SEDIMENTARES	Dolomita	0-75	10
	Calcário	2-280	25
	Arenito	0-1660	30
	Folhelho	5-1480	50
METAMÓRFICAS	Anfibolito	-	60
	Xisto	25-240	120
	Filito	-	130
	Gnaisse	10-2000	-
	Quartzito	-	350
	Ardósia	0-3000	500
ÍGNEAS	Granito	0-4000	200
	Riolito	20-3000	-
	Dolerito	100-3000	1400
	Diabásio	80-13000	4500
	Gabro	80-7200	6000
	Basalto	20-14500	6000
	Diorito	50-10000	7000
	Piroxenito	-	10500
	Peridotito	7600-15600	13000
	Andesito	-	13500

**Quadro 4.1** - Susceptibilidade magnética das rochas (Adaptada de Telford *et al.* 1990).

Nota: A sigla “emu” é designada como unidade eletromagnética embora não seja uma unidade de senso convencional. É usualmente utilizada para momento magnético (1emu=1ergG<sup>-1</sup>) e muitas vezes como dimensão volumétrica (1emu=1cm<sup>3</sup>).

#### 4.1.4 Tratamento dos dados

Os dados magnéticos, após serem coletados, passam por processos de tratamento, redução ou processamento a fim de os deixar apropriados à interpretação. O tratamento dos dados inclui correções (diurna e topográfica) e filtragens para melhorar a precisão e visualização do levantamento. As filtragens (quadro 4.2) são técnicas matemáticas que visam realçar ou atenuar as feições, separando o efeito das fontes indesejáveis (ruídos), para que se possa interpretar o sinal produzido pelas fontes de interesse. Os ruídos consistem em anomalias produzidas próximas a superfície ou interferência entre fontes rasas e profundas.

A correlação entre o domínio da frequência e o domínio de espaço/tempo é realizada através de Transformadas de Fourier, que relaciona a frequência do sinal geofísico com a profundidade da fonte emissora, por meio da aplicação de filtros para distinguir características da região (Telford *et al.* 1990). Com esses métodos é possível eliminar a interferência de fontes profundas na investigação de fontes rasas (e vice-versa), descrever qualitativamente a cronologia de eventos geológicos e mapear o embasamento de bacias sedimentares.

TIPO	FILTRO	FINALIDADE
Frequência	Passa baixa	Retira altas frequências evidencia informações de fontes profundas
	Passa alta	Retira baixas frequências e evidencia informações de fontes rasas
	Passa banda	Evidencia as anomalias do intervalo de frequência desejado
Continuação	Para baixo	Fornece dados de anomalias rasas (filtro altamente instável, geralmente não utilizado)
	Para cima	Filtra as altas frequências, retirando as anomalias mais superficiais e evidenciando as mais profundas
Derivada	Gradiente vertical	Evidencia as fontes rasas
	Gradiente horizontal em X	Evidencia as estruturas NS
	Gradiente horizontal em Y	Evidencia as estruturas EW
	Residual	Remove as anomalias regionais
	Amplitude do sinal analítico (ASA)	Projeta, em superfície, as anomalias em profundidade

**Quadro 4.2** - Filtros e suas finalidades. (Adaptado de Telford *et al.* 1990).

## 4.2 RADIOMETRIA

### 4.2.1 Introdução

A radioatividade é um fenômeno que tem origem no núcleo dos átomos instáveis, e por isso, é considerada uma propriedade física do núcleo atômico. Alguns elementos químicos possuem isótopos que se desintegram espontaneamente emitindo partículas, estes liberam energia na forma de radiação eletromagnética (Luiz & Silva 1995).

O levantamento radiométrico é utilizado em trabalhos de mapeamento geológico regional e prospecção mineral, através da presença de minerais radioativos ou não radioativos que estejam associados a elementos radioativos, como titânio e zircão. A técnica permite identificar processos de mineralização em diversos ambientes geológicos e áreas com alteração hidrotermal (Telford *et al.* 1990).

Os principais elementos radioativos são o potássio ( $^{40}\text{K}$ ), o urânio ( $^{238}\text{U}$ ) e o tório ( $^{232}\text{Th}$ ) constituintes da radioatividade natural das rochas. São elementos litófilos e a medida dos isótopos é realizada por cintilômetros (contagem de gama total) ou espectrômetros (contagem de vários canais), por meios terrestres ou aerolevantados. As contagens são medidas por segundo e convertidas em concentrações de potássio (%), urânio (ppm) e tório (ppm), sendo a energia dos elementos, crescente na ordem K, U e Th (Telford *et al.* 1990).

A radiometria constitui em um método ideal para rochas aflorantes a subaflorantes, uma vez que possui baixa penetrabilidade. Deste modo, a interpretação do levantamento radiométrico torna-se, principalmente, qualitativa.

### 4.2.2 Radioatividade das rochas

Como os elementos radioativos são constituintes dos minerais, e estes formam as rochas, determina-se uma relação da radioatividade de rochas e minerais, como observado na Tabela 4.3. Assim, o potássio é abundante em rochas ígneas ácidas em minerais como ortoclásio, microclina, moscovita e em depósitos salinos em minerais como silvita e carnalita (Telford *et al.* 1990).

O tório, presente nos minerais monazita, torianita, torita e uranotorita, ocorre em granitos, pegmatitos, gnaisses e depósitos de placeres. Semelhantemente, os principais minerais e ocorrências de urânio são uraninitas, encontrados em granitos, pegmatitos, e veios hidrotermais, carnotita em arenitos e gummita, produto de alteração da uraninita (Telford *et al.* 1990).

<b>POTÁSSIO</b>	
Mineral	(i) Ortoclásio e microclína [ $KAlSi_3O_8$ ]
	(ii) Moscovita [ $H_2KAl(SiO_4)_3$ ]
	(iii) Alunita [ $K_2Al_6(OH)_{12}SiO_4$ ]
	(iv) Sylvita, camalita [ $KCl, MgC_{12}, 6H_2O$ ]
Ocorrência	(i) Principais constituintes em rochas ígneas ácidas e pegmatitos
	(ii) Principais constituintes em rochas ígneas ácidas e pegmatitos
	(iii) Alteração em vulcânicas ácidas
	(iv) Depósitos de salinas em sedimentos
<b>TÓRIO</b>	
Mineral	(i) Monazita [ $ThO_2$ + raro fosfato terrífeço]
	(ii) Torianita [ $(Th, U)O_2$ ]
	(iii) Torita, uranotorita [ $ThSiO_4 + U$ ]
Ocorrência	(i) Granitos, pegmatitos, gnaisses
	(ii), (iii) Granitos, pegmatitos, pláceres
<b>URÂNIO</b>	
Mineral	(i) Uraninita [óxido de U, Pb, Ra + Th, terras raras]
	(ii) Carnotita [ $K_2O.UO_3.V_2O_5.2H_2O$ ]
	(iii) Gummita [alteração da uraninita]
Ocorrência	(i) Granitos, pegmatitos e/com depósitos em veios de Ag, Pb, Cu etc
	(ii) Arenitos
	(iii) Associado à uraninita

**Quadro 4.3** - Minerais radioativos e suas ocorrências (Adaptado de Telford *et al.* 1990).

Assim, estipula-se que a relação entre o percentual de isótopos radioativos nas rochas (meta) sedimentares é maior que nas rochas (meta) ígneas, exceto ígneas ácidas (Telford *et al.* 1990). Similarmente, observa-se que o percentual de isótopos radioativos nas rochas argilosas é maior do que nas arenosas, assim como a concentração nas rochas ígneas ácidas é relativamente maior comparada às rochas intermediárias, máficas e ultramáficas, como observado no quadro 4.4.

Radioelementos	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)
Rochas graníticas	4	13	4,1
Rochas basálticas	0,6	2	1,5
Rochas ultrabásicas	0,02	0,06	0,02

**Quadro 4.4** - Conteúdo radioativo das principais rochas ígneas (Telford, 1990).

### 4.2.3 Integração Radiométrica-geológica

A análise dos dados de radiometria em uma área é feita através da confecção de mapas radiométricos, abordando as diferentes concentrações de potássio, urânio e tório e do canal de contagem total. Os mapas apresentam, de forma qualitativa, a distribuição dos radioelementos na superfície do terreno ou a poucos centímetros de profundidade.

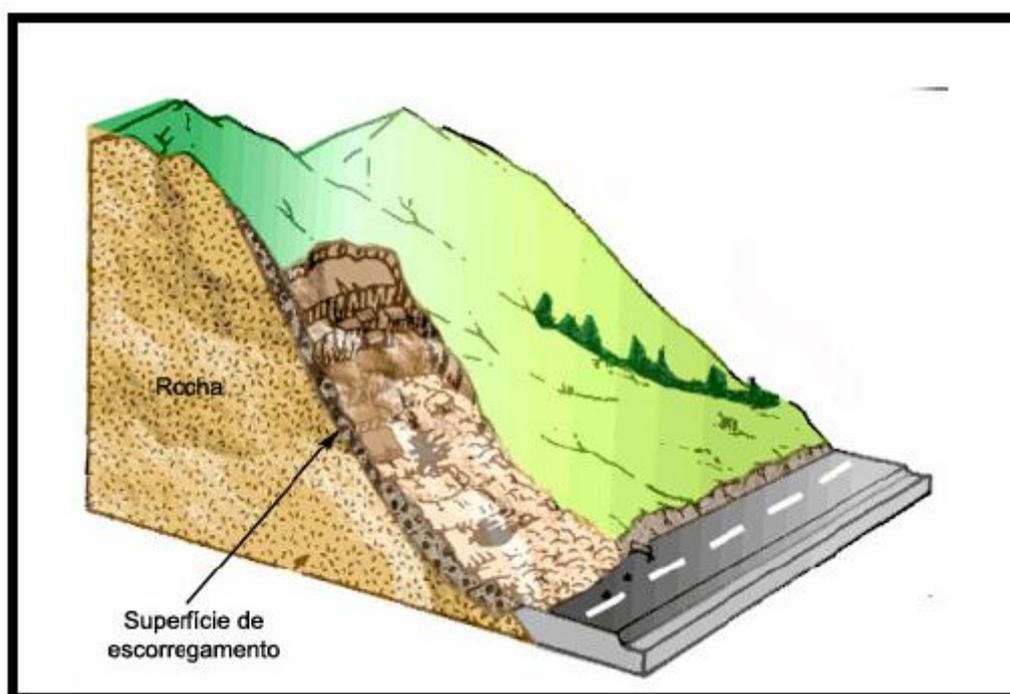
Através da concentração aparente dos isótopos determina-se uma relação com a química petrográfica, permitindo assim, integração radiométrica-geológica. Por outro lado, é importante considerar que os mapas radiométricos não mostram limites reais, devido à dispersão e interferência dos radioelementos (U, Th, K), além de fatores como umidade e porosidade do solo, e presença de drenagens.

Após a confecção dos mapas temáticos radiométricos (ternário, contagem total, canais TH, U e K, razões Th/K, U/K, U/Th e parâmetro F), é possível observar mudanças que permitem interpretar os tipos de rochas e os padrões estruturais, podendo assim, auxiliar na delimitação de contatos geológicos em trabalhos de mapeamento geológico.

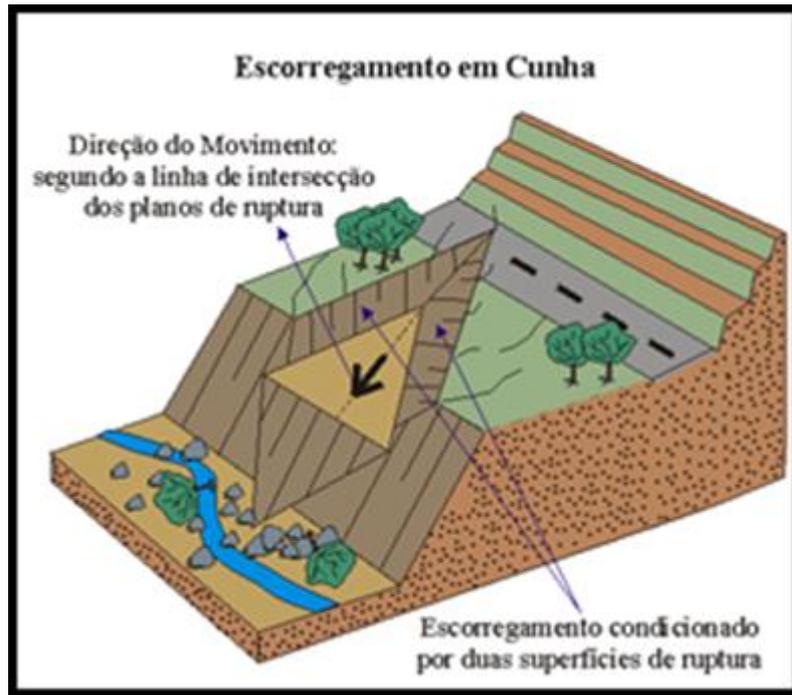
### 5.1 TIPOS PRINCIPAIS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Movimentos de massa são caracterizados por mecanismos específicos e em materiais específicos. Neste sentido, Hungr *et al.* (2014) apresentam uma classificação atualizada. Seguem os principais tipos:

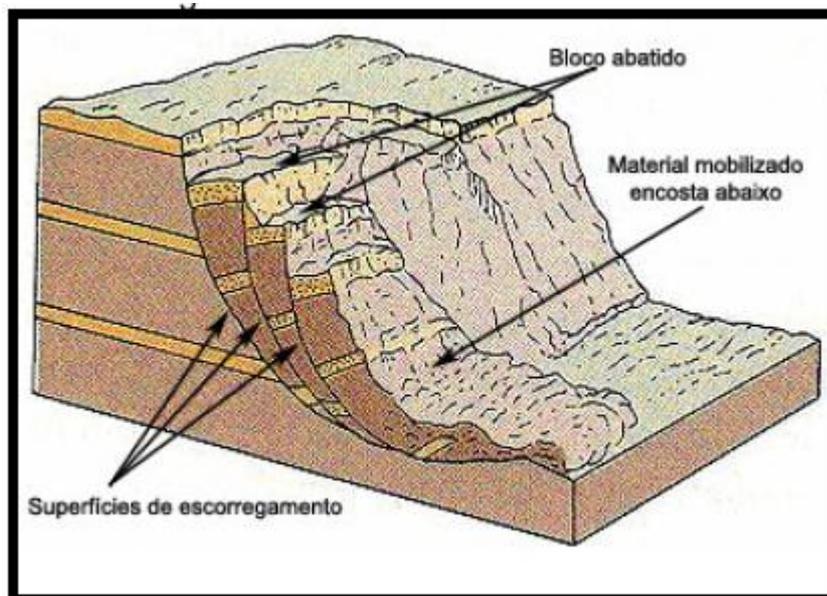
➤ Escorregamentos que são classificados em planares (translacionais), figuras 5.1 e 5.2 e circulares (ou rotacionais), mostrados na figura 5.3. Os deslizamentos do tipo circular, também chamados de rotacionais, são caracterizados pela ruptura tridimensional que ocorre geralmente em taludes de material inconsolidado, como solos e depósitos de sedimentos inconsolidados. Os escorregamentos do tipo planar podem ser simples, quando a ruptura ocorre sobre um único plano, sendo comum no contato entre rochas e materiais inconsolidados, além de rochas que apresentam-se foliadas; e do tipo em cunha, quando a ruptura ocorre na intersecção entre planos. Os escorregamentos são movimentos rápidos (m/h e m/s) e apresenta poucos planos de deslocamento;



**Figura 5.1** - Escorregamento Planar. Fonte: [http://digilander.libero.it/paololitico/tipo\\_3frana.htm](http://digilander.libero.it/paololitico/tipo_3frana.htm). Acessado em julho de 2018.

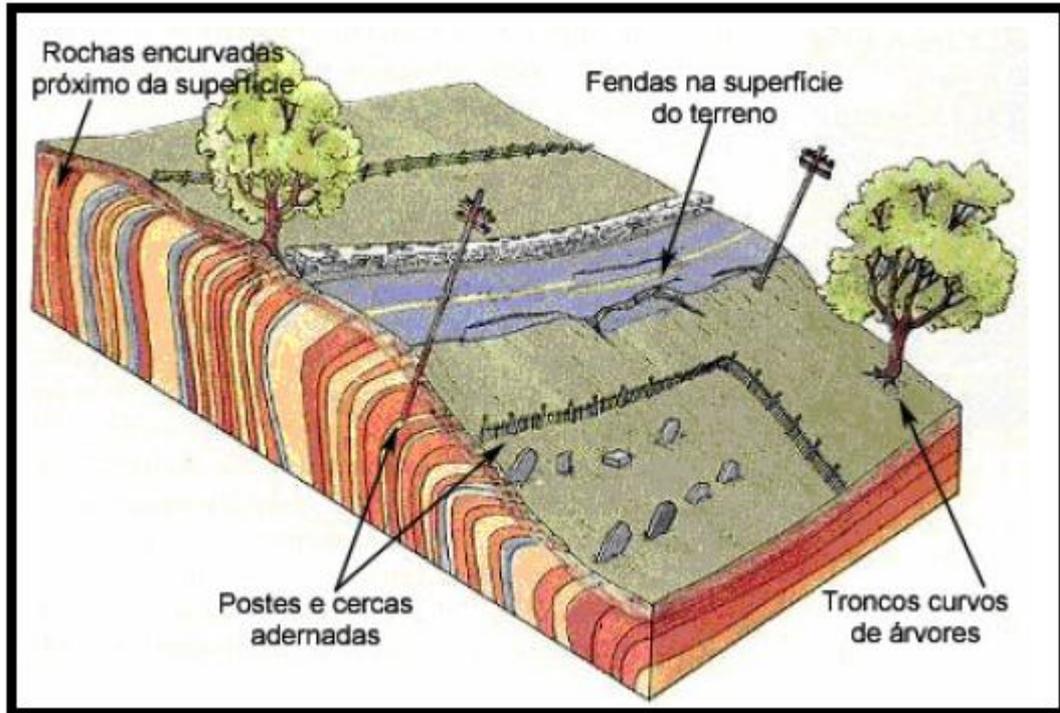


**Figura 5.2** - Escorregamento em Cunha. Fonte: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09d.html>). Acessado em julho de 2018.



**Figura 5.3-** Escorregamento rotacional. Fonte: [www.earthsci.org/geopro/massmov/massmov.html](http://www.earthsci.org/geopro/massmov/massmov.html). Acessado em julho de 2018.

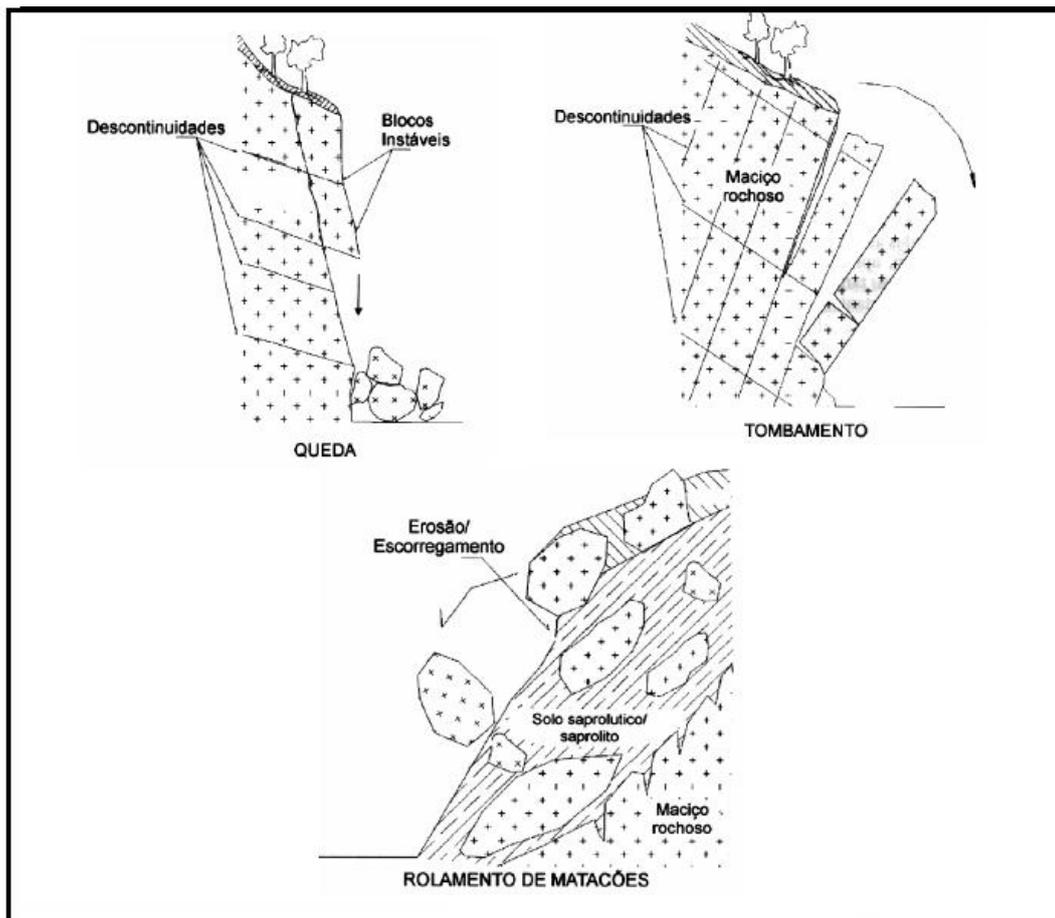
➤ Rastejo (*creep*), onde ocorre movimentação do terreno sobre vários planos de ruptura, de maneira lenta (cm/ano), em intervalos contínuos ou intermitentes, comum em materiais inconsolidados, como mostrado na figura 5.4;



**Figura 5.4-** Desenho de vertente sofrendo rastejo. Fonte: [www.earthsci.org/geopro/massmov/massmov.html](http://www.earthsci.org/geopro/massmov/massmov.html). Acessado em julho de 2018.

➤ Tombamento de blocos: movimento de rotação de blocos rochosos, condicionado por estruturas geológicas sub-verticais no maciço rochoso, figura 5.5;

➤ Queda de blocos: blocos de rochas que se desprendem do maciço e se deslocam em queda livre encosta abaixo, podendo ocorrer em volumes e litologias diversas, figura 5.5;



**Figura 5.5-** Queda, tombamento e rolamento de blocos rochosas, segundo Oliveira & Brito, 1998.

➤ Fluxos ou corridas: movimentos gravitacionais na forma de escoamento rápido, envolvendo grandes volumes de materiais. Caracterizados pelas dinâmicas da mecânica dos sólidos e dos fluidos, pelo volume de material envolvido e pelo extenso raio de alcance que possuem, chegando até alguns quilômetros, apresentando alto potencial destrutivo, exemplificado na figura 5.6. Considerando as características do material mobilizado, as corridas podem ser classificadas em três tipos básicos: corrida de Terra (*earth flow*) - fluxo de solo com baixa quantidade de água, apresentando baixa velocidade relativa; corrida de Lama (*mud flow*) - fluxo de solo com alto teor de água, apresentando média velocidade relativa e com alto poder destrutivo; e corrida de Detritos (*debris flow*) - material predominantemente, grosseiro, constituído por blocos de rocha de vários tamanhos, apresentando um maior poder destrutivo.



**Figura 5.6-** Corrida de massa ao longo de canal fluvial. Fonte: <http://www.meioambiente.pro.br/baia/mov.htm>. Acessado em julho de 2018.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS

Os maciços rochosos podem ser definidos como “massas rochosas constituídas por um ou mais tipos litológicos, localizadas num determinado contexto espacial e estando afetadas por descontinuidades que conferem ao conjunto anisotropia”. A esta definição poder-se-á acrescentar a possível presença da água, como fator de grande incidência geotécnica. O material que forma os blocos constitui a matriz do maciço rochoso, também denominada rocha intacta, e as superfícies que os limitam, as descontinuidades. Os maciços rochosos são essencialmente heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos, e a sua complexidade resulta da evolução geológica a que foram submetidos. É a escala da porção do maciço analisado, em relação à obra considerada, que define a validade de se admitir o meio homogêneo ou heterogêneo, isotrópico ou anisotrópico, contínuo ou descontínuo, no âmbito de um estudo qualquer (Oliveira & Brito 1998).

É importante a ideia de que um mesmo maciço rochoso pode reagir de maneira diferenciada, conforme as solicitações que lhe são impostas. Estas, por sua vez, dependem do tipo, das dimensões e

particularidades da obra. Assim, para a previsão do comportamento do maciço, devem-se avaliar as suas características em função da obra a ser implantada (Vallejo *et al.* 2002).

Ainda segundo Oliveira & Brito (1998), partindo de que os maciços diferem de local para local, em função dos eventos geológicos sofridos na área, é necessário evidenciar os aspectos do meio rochoso, que condicionam o seu comportamento ante as solicitações impostas pela obra em questão. Tal procedimento denomina-se caracterização geológico-geotécnica ou geológico-geomecânica do maciço rochoso. A caracterização objetiva, portanto, o levantamento das características de uma realidade para sua posterior classificação.

O ato de hierarquizar estas características, organizá-las individualmente em grupos ou classes, às quais se possa associar comportamentos diferenciados do meio rochoso, para as condições de solicitação consideradas, denomina-se classificação geomecânica do maciço. Segundo Vallejo *et al* (2002), as classificações geomecânicas são utilizadas para caracterizar os maciços rochosos através de um conjunto de propriedades identificadas por observação direta e ensaios realizados *in situ* ou em amostras recolhidas em sondagens. O interesse destas classificações consiste também em sistematizar o conjunto de elementos geotécnicos que interessa caracterizar num determinado maciço rochoso.

De um modo geral, as características mais visadas no estudo do comportamento dos meios rochosos dizem respeito à deformabilidade, à resistência, à permeabilidade (em especial, no caso de obras hidráulicas e certas obras de escavação), e ao estado de tensões naturais (sobretudo, no caso de obras subterrâneas profundas). Tais características compreendem as feições geológicas e os parâmetros geotécnicos - obtidos através da caracterização geológico-geotécnica do maciço rochoso e os índices e propriedades físicas, determinados por meio de ensaios *in situ* e laboratoriais.

Numa fase inicial de estudos, diante das poucas informações disponíveis, torna-se imprescindível uma classificação do maciço rochoso. Várias metodologias (quadro 5.1) de classificação foram desenvolvidas e basicamente se busca obter informações a respeito da resistência, disposição do sistema de faturamento, características da presença de água, estado de alteração, entre outros fatores que caracterizam o maciço rochoso. Na realidade funciona como um *check-list* para assegurar que todas informações relevantes estão sendo consideradas. De uma forma geral, é feito um setorização do maciço onde características semelhantes são individualizadas. A essas características são atribuídos “pesos”, e no final divide-se o maciço em classes, possibilitando dessa forma, obter dados quantitativos, orientações para projeto, além de fornecer uma base para que os diversos profissionais tenham a mesma percepção a respeito de um mesmo maciço rochoso. É ressaltado que no presente trabalho optou-se por utilizar o sistema de classificação geomecânica RMR, classificação proposta por Bieniawski (1973) e que é de fácil obtenção de resultados.

Nome	Autor	Origem	Aplicações
Carga no suporte	Terzaghi, 1946	USA	Túneis com cimbres
Período auto-portante	Lauffer, 1958	Áustria	Túneis
NATM	Pacher et al, 1964	Áustria	Túneis
RQD	Deere et al, 1967	USA	Sondagens, túneis
RSR	Wickham et al, 1972	USA	Túneis
<u>RMR</u>	Bieniawski, 1973	África do Sul	Túneis, taludes, minas, fundações
Q-System	Barton et al, 1974	Noruega	Túneis, cavernas
Manuel Rocha	Manuel Rocha, 1976	Portugal	Túneis

**Quadro 5.1** - Principais classificações geomecânicas.

### 5.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS POR BIENIAWSKI

Uma das classificações de maciços rochosos mais utilizadas em todo o mundo é a classificação de Bieniawski, também conhecida por classificação RMR. Essa classificação atribui pesos a 6 parâmetros considerados fundamentais no comportamento geomecânico dos maciços rochosos, o somatório dos pesos atribuídos a cada um desses parâmetros constitui um índice denominado “RMR” que corresponde uma das cinco classes de qualidade do maciço. Os parâmetros utilizados são:

- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta:

A resistência do material rochoso é um parâmetro fundamental, utilizado nos principais sistemas de classificação de um maciço. Os ensaios menos onerosos mais comuns são o ensaio de resistência à compressão puntiforme, realizado em laboratório e o ensaio como Martelo de Schmidt, que pode ser realizado in situ. Ambos apresentam índices correlacionáveis a resistência a compressão uniaxial da rocha. Pode-se mencionar ainda, uma faixa de valores de resistência das rochas estimada pela

Gomes, G. A. M., 2018, Classificação de Maciço Rochoso...

International Society Rock Mechanical - ISRM (1981) partir de simples testes de campo com o martelo do geólogo (tabela 5.1).

**Tabela 5.1** - Resistência à compressão uniaxial estimada a partir de testes de campo com o martelo do geólogo. (Modificado de ISRM, 1981).

Grau	Característica	Resistência Compressão Uniaxial (MPa)	Descrição em campo
R6	Extremamente resistente	> 250	Material rochoso é somente lascado sob repetidos golpes de martelo.
R5	Muito resistente	100 - 250	Requer várias batidas de martelo para quebrar a rocha intacta gerando fragmentos com bordas cortantes; Não é riscável pelo canivete;
R4	Rochas resistentes	50 - 100	Espécies quebradas por alguns golpes de martelo; superfície dificilmente riscável pelo canivete; Escavável a fogo.
R3	Rochas mediantemente resistentes	25 - 50	Golpe firme com o martelo de geólogo quebra a rocha; o canivete apenas risca a superfície. Escavável a fogo.
R2	Rochas brandas	5 - 25	Quebra-se com um único golpe de martelo; As bordas dos fragmentos podem ser quebradas pela pressão dos dedos. O canivete corta o material. Escavação mecanizada.
R1	Rochas muito brandas	1 - 5	Esfarelamento sobre um golpe firme com o martelo de geólogo, pode ser conformado pelo canivete; Desplacamentos ao longo da foliação sob pressão dos dedos; Escavação mecanizada.
Grau	Característica	Resistência Compressão Uniaxial (MPa)	Descrição em campo
R0	Solos Estruturados á rochas muito brandas	0.25 - 1	Penetrada pela ponta do dedo polegar; moldada pelas mãos; facilmente penetrada pelo canivete e martelo de geólogo; Escavada por equipamento manual.

➤ *Rock Quality Designation* - R.Q.D.:

Avalia a qualidade do maciço frente ao fraturamento e é dada pela razão entre o somatório dos segmentos não fraturados maiores que 10cm em um testemunho de sondagem e o comprimento total do mesmo; ou então de forma expedita, através da observação do espaçamento entre as descontinuidades de suas respectivas famílias ( $S_n$ ), e aplicação da relação  $R.Q.D. = 115 - 3,3J_v$ , onde  $J_v = 1/S_1 + 1/S_2 + 1/S_3 + 1/S_n$  (Palmstrom 1982);

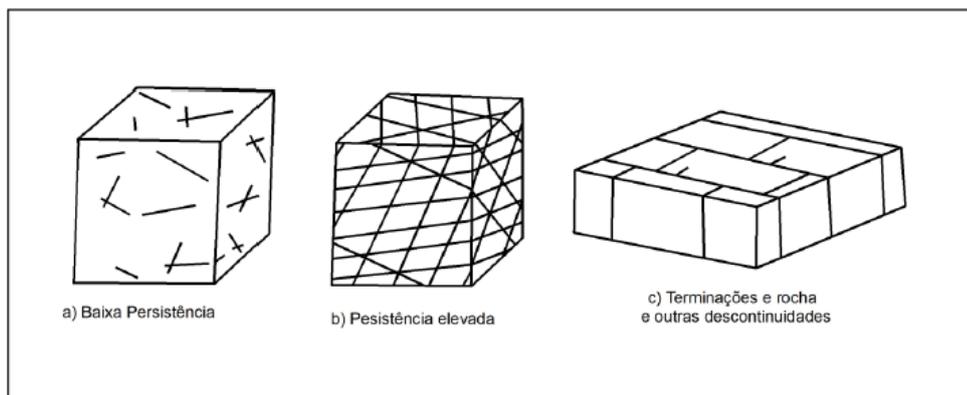
- Espaçamento das descontinuidades:

Diz respeito ao espaçamento médio entre as descontinuidades de uma mesma família;

- Condição das descontinuidades:

*Persistência:*

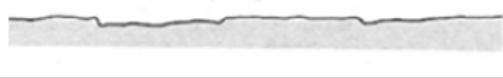
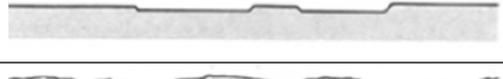
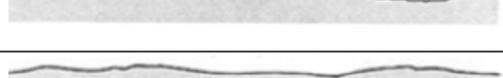
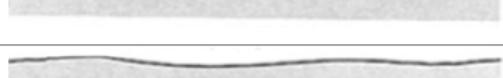
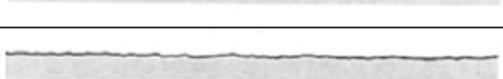
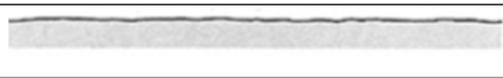
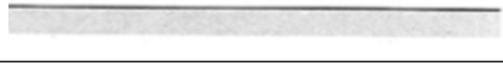
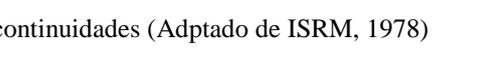
A persistência está ligada a sua extensão em área ou dimensão. Pode ser estimada pelo comprimento dos traços de descontinuidades nas faces expostas de maciços rochosos, como talude, túneis e galerias. É um dos mais importantes parâmetros dos maciços rochosos, porém é de difícil quantificação, posto que seu valor depende da orientação e da dimensão da superfície rochosa na qual se expõe. A avaliação da persistência das diversas famílias de descontinuidades é fundamental na investigação da ruptura potencial de taludes rochosos (figura 5.7) (Azevedo & Marques 2002).



**Fig. 5.7-** Aspectos da formação de blocos em função da interseção de juntas (ABGE, 2013).

*Rugosidade e ondulação:*

A rugosidade corresponde a ondulações nas superfícies (quadro 5.2) das discontinuidades e influencia especialmente na resistência ao cisalhamento, sobretudo quando se trata de discontinuidades não preenchidas, conferindo um incremento ao ângulo de atrito, até um nível de tensões a partir do qual se verifica a sua ruptura (Oliveira & Brito 1998).

Classe	Descrição	Perfis
I	Rugosa ou irregular, indentada	
II	Lisa, indentada	
III	Espelhada, indentada	
IV	Rugosa ou irregular, ondulada	
V	Lisa, ondulada	
VI	Espelhada, ondulada	
VII	Rugosa ou irregular, planar	
VIII	Lisa, planar	
IX	Espelhada, planar	

**Quadro 5.2** - Classificação e perfis de rugosidade das discontinuidades (Adptado de ISRM, 1978)

A rugosidade das paredes das discontinuidades pode ser medida através de comparação visual destas com perfis padrão de rugosidade (ISRM 1978). Estes perfis permitem classificar as paredes das discontinuidades primeiramente indentadas, onduladas e planares e, a uma menor escala, em rugosas, lisas ou espelhadas, sendo esta última utilizada apenas quando houver sinais evidentes de deslizamentos prévios. A ondulação pode ter uma maior ou menor influência na resistência ao deslizamento das discontinuidades na análise da estabilidade de um talude, dependendo da sua dimensão relativa comparativamente com a da superfície potencial de deslizamento.

*Abertura:*

A distância entre as paredes de uma descontinuidade corresponde à sua abertura. É um dos parâmetros mais relevantes no Sistema RMR.

*Preenchimento:*

Segundo Azevedo & Marques (2002), o preenchimento tem influência notável nos parâmetros geotécnicos de uma descontinuidade. É evidente a diferença de comportamento, quanto à resistência ao cisalhamento e à deformabilidade, entre uma descontinuidade preenchida por material argiloso mole ou por material duro, por vezes, mais resistente e menos deformável que o próprio material que constitui o maciço rochoso. É também evidente a diferença de comportamento, em termos hidráulicos, de uma descontinuidade preenchida por um material poroso e permeável, de outra preenchida por material impermeável. Nas falhas, o material de preenchimento corresponde, em geral, ao material rochoso esmagado pelo processo tectônico que as originou, podendo-se encontrar em fases mais ou menos avançadas de alteração.

A caracterização do preenchimento deve conter, além da espessura, a descrição da natureza dos seus constituintes, mineralogia, textura, cor e outras informações que se mostrem relevantes.

➤ *Influência da água:*

É um parâmetro que avalia se o maciço está desde completamente seco até chegar no outro extremo da escala que discrimina uma quantidade expressiva de água subterrânea o que vai tornando a situação de estabilidade do maciço, pior.

➤ *Orientação das descontinuidades:*

Avaliação do maciço transversal e longitudinalmente a um túnel, fundação ou talude quanto ao traçado em relação ao declive / aclive da encosta, podendo a obra ser planejada no sentido do aclive ou no sentido inverso.

Os parâmetros da Classificação RMR são apresentados no quadro 5.3.

Parâmetros de classificação									
1	Resistência do material rochoso intacto	Resistência à compressão uniaxial (MPa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	<1
		Valores ponderais	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)	Valores ponderais	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25		
			20	17	13	8	3		
3	Descontinuidades (m)	Valores ponderais	>2	0,6 - 2	0,2 - 0,6	0,06 - 0,2	<0,06		
			20	15	10	8	5		
4	Condições das descontinuidades	Comprimento descontinuidade (m)	<1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	>20		
		Valores ponderais	6	4	2	1	0		
		Abertura (mm)	Nenhuma	<0,1	0,1 - 1	1 - 5	>5		
		Valores ponderais	6	5	4	1	0		
		Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Ligeiramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Valores ponderais	6	5	3	1	0		
		Preenchimento (mm)	Nenhuma	Duro <5	Duro > 5	Mole <5	Mole > 5		
		Valores ponderais	6	4	2	2	0		
		Meteorização	Inalterada	Ligeiramente alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Decomposta		
		Valores ponderais	6	5	3	1	0		
5	Presença de água	Condições gerais do maciço	Seco	Ligeiramente e húmido	Húmido	Escorridos	Fluxo abundante		
		Valores ponderais	15	10	7	4	0		

Quadro 5.3 - Parâmetros de Classificação dos Maciços Rochosos (Adaptado de Bieniawski,1973).

O sexto parâmetro que poderia eventualmente estar inserido no quadro 5.3 é a direção e o mergulho das descontinuidades que para facilitar o entendimento é apresentado no quadro 5.4.

Direção das descontinuidades perpendicular ao eixo do túnel				Direção das descontinuidades paralela ao eixo do túnel		Qualquer
Avanço do túnel no sentido do pendor		Avanço do túnel no sentido inverso ao pendor		Inclinação		Inclinação
45-90°	20-45°	45-90°	20-45°	45-90°	20-45°	0-20°
Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável
Orientação das descontinuidades		Muito favoráveis	Favoráveis	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Valor ponderativo para ajuste de RMR	Túneis	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Quadro 5.4- Parâmetro relacionado à orientação das descontinuidades (adaptado de Bieniawski, 1989).

A partir da atribuição relativa dos pesos, procede-se a classificação do maciço rochoso pelo somatório dos pesos, obtendo-se dessa maneira, o chamado “RMR” (*Rock Mass Rating*). Uma vez obtido o índice “RMR” pela somatória dos pesos, identifica-se qual a classe do maciço rochoso conforme visualizado na tabela 3. Está inserido nesta tabela, dois parâmetros de resistência amplamente utilizados no âmbito da mecânica das rochas que é a coesão (que é a parcela de estabilidade dada pelas ligações dos elementos que compõe o maciço) e o ângulo de atrito (está ligado à parte física de entrosamento / encaixe / atrito entre os elementos como os grãos), além da definição do “*stand-up time*”. Ou seja, o tempo de auto sustentação de um determinado trecho escavado que pode permanecer sem suporte (quadro 5.5).

Peso Global	81 a 100	61 a 81	41 a 60	21 a 40	<21
Classe	I	II	III	IV	V
Caracterização do maciço	Muito bom	Bom	Razoável	Fraco	Muito fraco
Tempo médio para sustentação sem suporte	20 anos para 15m de vão	1 ano para 10m de vão	1 semana para 5m de vão	10 horas para 2,5m de vão	30 minutos para 1m de vão
Coesão do maciço rochoso	>400	300 a 400	200 a 300	100 a 200	<100
Ângulo de atrito do maciço rochoso	>45	35 a 45	25 a 35	15 a 25	<15

**Quadro 5.5** - Classe do maciço rochoso com valores de coesão e ângulo de atrito (Adaptado de Bieniawski, 1989)

## CAPITULO 6

### PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EM OURO PRETO

Ouro Preto é uma cidade com um histórico considerável de movimentos de massa. Grande parte dos registros anteriores à década de 90 são apenas fotográficos e/ou com poucas informações. Muitos trabalhos foram realizados com estes registros, trabalhos de campos e outras análises de maioria qualitativa, mas não houve muita evolução técnico-científica nestes trabalhos acadêmicos devido a não padronização das informações em um banco de dados único, de domínio público e também devido à dispersão dos dados catalogados em diferentes secretárias, empresas e Bancos de Dados de diferentes autores (quadro 6.1), cujo acervo foi montado pela Coordenadoria Municipal de Defesa Civil - COMDEC Ouro Preto.

Tabela Registro Histórico de Ocorrências na cidade de Ouro Preto - MG			
Ano	Nº de Mortes	Nº de Ocorrências	Locais das Ocorrências
1989	32	3	Bairros São Cristovão, Padre Faria, Taquaral, Piedade e Areas que no futuro se tornaram o Bairro Santa Cruz
1991	32	*	Bairros São Francisco, Antonio Dias, Pilar, Alto da Cruz, Piedade e Padre Faria
1992	54	2	Bairros São Francisco, Piedade, Alto da Cruz, Padre Faria e Santa Cruz
1995	40	3	Bairros São Cristovão, Piedade, Padre Faria, Santa Cruz, Antonio Dias, Agua Limpa, Bauxita e Nossa Senhora das Dores
1997/97	23	13	Bairros Taquaral, São Cristovão, São Francisco, Alto da Cruz, Piedade, Padre Faria, Santa Cruz e Vila Aparecida
2001/2003	100	*	Bairros São Cristovão, Alto da Cruz, Piedade, Padre Faria, Santa Cruz e Morro Santana
2005	54	*	Bairros São Francisco São Cristovão, Alto da Cruz, Padre Faria, Santa Cruz, Morro Santana, Taquaral, Bauxita e Nossa Senhora das Dores
2006/2007	312	*	Bairros São Francisco, São Cristovão, Piedade, Padre Faria, Santa Cruz, Morro Santana e Taquaral
2008	193	*	Bairros São Francisco, São Cristovão, Piedade, Padre Faria, Santa Cruz, Morro Santana e Taquaral
2009	89	*	Bairros São Francisco, São Cristovão, Piedade, Padre Faria, Santa Cruz, Morro Santana e Taquaral

**Quadro 6.1** - Registro Histórico de Ocorrências na cidade de Ouro Preto de 1989 até 2009, dados da COMDEC Ouro Preto.

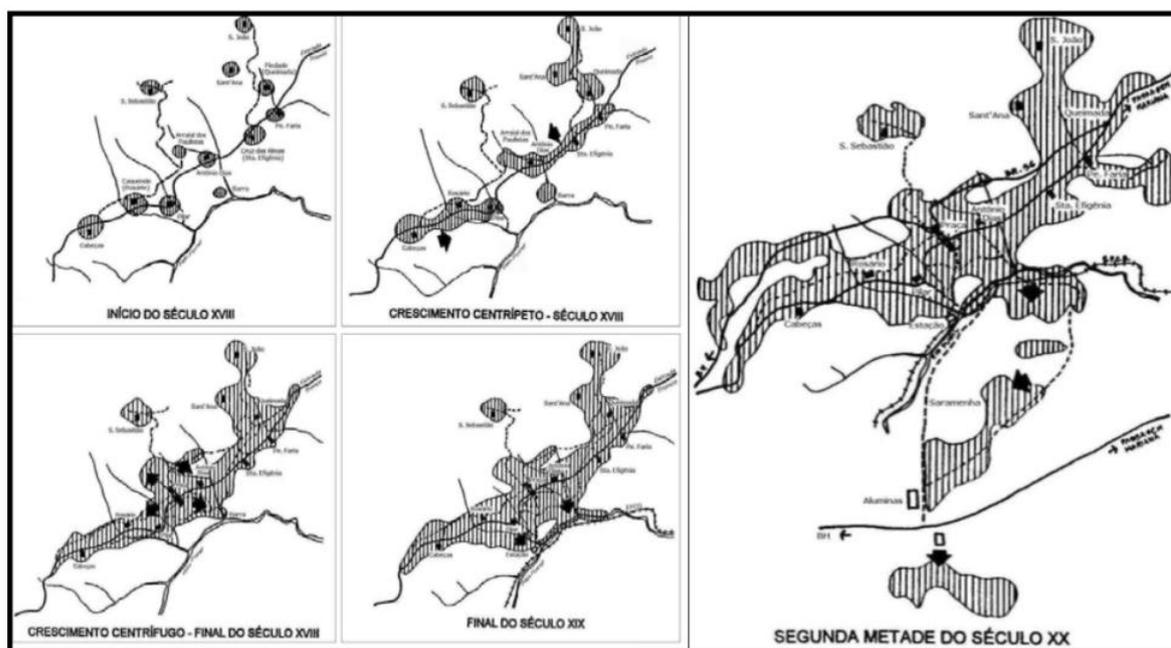
O primeiro registro oficial de um movimento de massa em Ouro Preto foi feito em 1814 por um alemão, já mencionado, conhecido como Barão de Eschwege. Ele descreveu um movimento de massa que causou o soterramento do proprietário de uma lavra e todos os seus escravos. A cata, onde se minerava ouro, foi soterrada pela encosta do morro que deslizou, destruindo outras casas e parte da estrada que interligava as cidades de Ouro Preto e Mariana. A atividade mineira não parou ao longo dos anos, e diferente de Serra Pelada, que era uma grande mina a céu aberto, Ouro Preto também tinha a mineração subterrânea, associado a estas atividades, cortes e aterros irregulares culminaram com uma diversificada faixa de tipos de deslizamentos ao longo dos anos. Deslizamentos rotacionais, em cunha, rolamentos, queda de blocos, solapamentos...Bonuccelli (1999) realizou um levantamento, junto ao

corpo de bombeiros, relativo aos movimentos gravitacionais de massa e processos associados em Ouro Preto, como discriminado na distribuição do quadro 4.1.

Tipos de processos	Nº de feições	Área atingida/ área com processos (%)	Área atingida/ área urbana total (%)
Escorregamento	79	3,7	0,09
Escorregamento translacional	54	6,6	0,16
Queda e rolamento de blocos	78	5,5	0,14
Escoamento rápido ou corridas	10	0,7	0,02
Erosões	88	20,6	0,51
Erosão de grandes dimensões	11	7,5	0,19
Inundação e assoreamento	6	4,4	0,11
Complexos	31	36	0,89
Escorregamento e corrida	12	1,1	0,03
Escorregamento e erosão	14	3,2	0,08
Escorregamento translacional e corrida	31	5,8	0,15
Corridas e rolamentos de blocos	25	4,5	0,11
Inundação e erosão fluvial	3	0,2	0,01

**Quadro 6.2** - Número de feições e porcentagem relativa (em área) dos tipos de movimentos gravitacionais de massa e processos correlatos (Bonuccelli 1999).

As características geológicas e climáticas associadas à ocupação histórica desordenada da cidade (figuras 6.1, 6.2 e 6.3), torna Ouro Preto altamente problemática do ponto de vista geotécnico.



**Figura 6.1** - Evolução da ocupação da área urbana de Ouro Preto do século XVIII ao XX (Castro 2006).

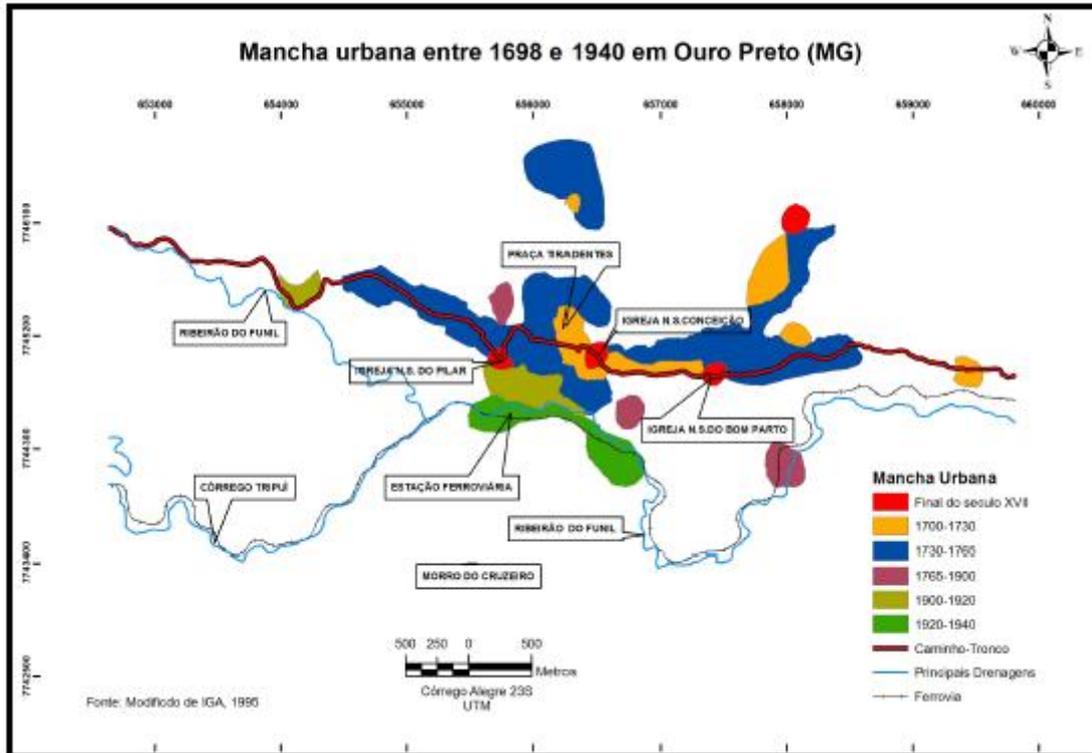
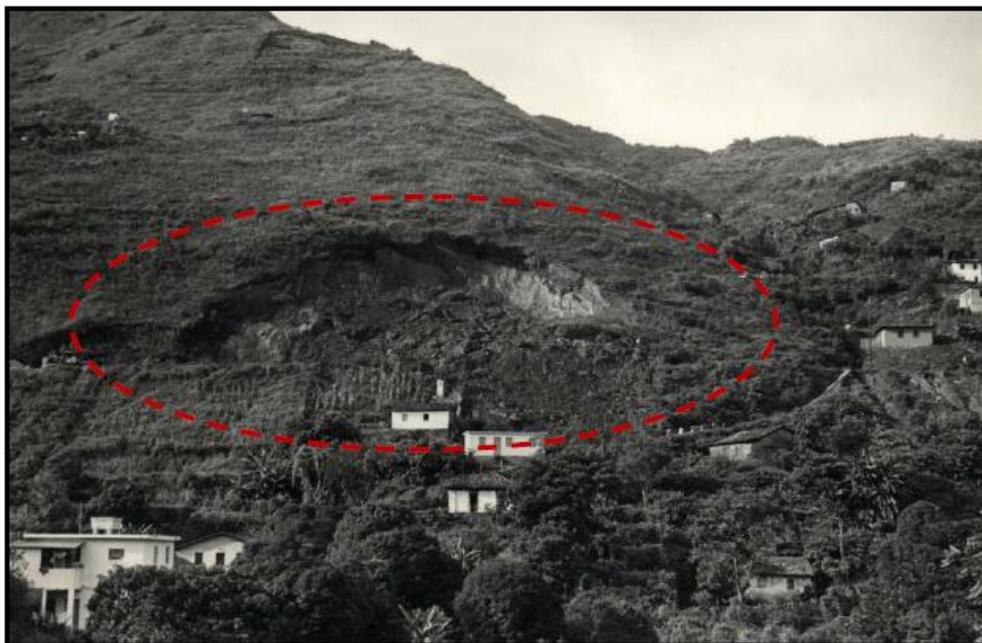


Figura 6.2 - Ocupação urbana em Ouro Preto entre 1698 e 1940, adaptado de IGA (1995b).



Figura 6.3 - Evolução da ocupação da encosta no bairro Jardim Alvorada. Fonte: Banco de dados COMDEC Ouro Preto.

Em 1979 o elevado índice pluviométrico (1216 mm) resultou em movimentos em série em toda a área urbana. Diversos monumentos históricos foram atingidos, dentre eles a Igreja São Francisco de Assis e a igreja de Igreja São José. Segundo registros, ocorreram diversos deslizamentos ao longo da Rua Padre Rolim, rua onde se situa o terminal rodoviário de Ouro Preto (figura 6.4). Em 2012, novo escorregamento ocorre nesta rua (figura 6.5).



**Figura 6.4** - Escorregamento na Rua Padre Rolim em 1979 (IPHAN 1979).



**Figura 6.5** - Movimento de massa que atingiu a rodoviária da cidade de Ouro Preto no dia 3 de janeiro de 2012. Imagens do banco de dados de COMDEC Ouro Preto.

Abaixo é apresentada, conforme Silva (1990), uma descrição geral (quadro 6.2) de alguns parâmetros geotécnicos (escavação, perfuração, infiltração, escoamento superficial, erodibilidade e estabilidade da encosta) das litologias encontradas em Ouro Preto.

DESCRIÇÃO GERAL DE ALGUNS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS						
	Escavação	Perfuração	Infiltração	Escoamento superficial	Erodibilidade	Estabilidade da encosta
Canga	Muito difícil, geralmente requer o uso de dinamites	Muito difícil	Moderadamente rápido para muito rápido	Devagar para moderado	Muito devagar	Pobre para boa. Estabilidade controlada pelas fraturas e tipo de material subjacente. É arriscado fazer cortes que exponha o itabirito friável ou outro material de baixa capacidade de carga
Xisto Sabará	Fácil a moderadamente difícil	Fácil	Insignificante na rocha ou nas fraturas	Moderado para rápido	Moderadamente resistente	Se o material estiver intemperizado ele pode suportar estruturas leves. Estruturas pesadas devem assentar sobre a rocha sã.
Filito Barreiro	Geralmente fácil	Fácil	Devagar na rocha e fraturas	Rápido	Moderadamente erodível	Pobre a normal e controlada pela posição da foliação e grau de intemperismo. Há risco quando a foliação mergulha no corte, ou quando a rocha é muito fraturada ou muito intemperizada
Quartzito Taboões	Muito fácil	Fácil a moderadamente difícil	moderado a rápido na rocha e nas fraturas	moderado a devagar	muito erodível	Muito pobre devido a alta friabilidade dessa rocha.
Filito Fecho do Funil	Fácil	Fácil	Insignificante na rocha ou nas fraturas	Rápido a moderado	Moderadamente erodível	Pobre a boa. Controlado pela direção da foliação e das fraturas.
Filito e quartzito Cerdaninho	Difícil	Moderadamente difícil a muito difícil	Moderado a rápido	moderado a devagar	Moderadamente erodível	Apresenta risco devido ao alto grau de fraturamento dessas rochas
Dolomito Gaudarech	Difícil, geralmente requer explosivos	Muito difícil	Insignificante na rocha, devagar nas fraturas	Rápido	Muito resistente	Boa a excelente, controlado pela direção dos estratos e fraturas.
Itabirito Cautê	Fácil com equipamento adequado quando o itabirito está friável. Caso contrário, a escavação é muito difícil e requer explosivos	Fácil para o itabirito friável, difícil para o itabirito são.	moderado a rápido através das fraturas	moderado a devagar	Geralmente muito erodível quando friável	Pobre a boa. Controlado pela direção da foliação, fraturas e friabilidade. É potencialmente perigoso quando a camada superficial mergulha na direção do corte, ou quando a rocha é muito fraturada ou friável.
Filito Batatal	Quebra facilmente paralelo a foliação	Fácil	Devagar próximo a superfície através de fraturas insignificante em profundidade.	Moderado a rápido.	Erodível quando intemperizado, moderadamente resistente quando a rocha é nova.	Pobre a boa. Controlado pela direção da foliação, fraturas e grau de intemperismo. Oferece risco quando a foliação mergulha no corte ou quando a rocha é muito fraturada ou intemperizada.
Quartzito Moeda	Difícil com rippers e scrapers no quartzito são. Requer explosivos nesse caso.	Muito difícil	Moderado a rápido	Moderado a devagar	Resistente	Boa a excelente para o quartzito são. Nesse caso, alto fraturamento na rocha e encostas íngremes podem causar a queda de blocos.
Xisto Nova Lima	Quebra facilmente paralelo a foliação, escavação fácil a moderadamente difícil	Fácil a moderadamente difícil	Insignificante na rocha ou nas fraturas	Rápido a moderado	Moderadamente erodível a muito erodível	Normal a arriscado; moderado a alto risco de escorregamentos. Salvo onde o ângulo de corte na encosta é controlado pela direção da foliação e fraturas.

Quadro 6.3 - Parâmetros geotécnicos da cidade de Ouro Preto, adaptado de Silva (1990).





## 7.1 ASPECTOS GERAIS

Pelas observações realizadas nos trabalhos de campo em conjunto com os dados bibliográficos levantados, são notáveis cinco unidades estratigráficas que, da base para o topo, são respectivamente: xisto (Grupo Nova Lima), quartzito (Formação Moeda), filito (Formação Batatal), itabirito (Formação Cauê) e filito (Formação Cercadinho).

O xisto aflora na porção marginal nordeste da cidade e suas informações não contribuem neste trabalho. Porém, cabe ressaltar que aparece muito alterado nos cortes da estrada de terra que liga o bairro Morro Santana ao distrito de Antônio Pereira. Esta sequência faz parte do núcleo exposto do Anticlinal de Mariana.

Exposições naturais de quartzito afloram pontualmente nos bairros Piedade e Morro da Queimada, bem como, no limite entre o bairro Alto da Cruz e Lajes. No Morro da Queimada é encontrado mais alterado (friável) devido às infiltrações de água encanada incorretamente para abastecer a comunidade. Aparece nas clareiras da vegetação e está altamente fraturado, mas não é a litologia do maciço estudado neste trabalho, logo é mencionado para constar na sucessão estratigráfica local da zona leste da cidade de Ouro Preto.

O filito (Formação Batatal) aparece ora em contato com o itabirito, ora em contato com o quartzito. Suas exposições estão muito alteradas, mas são observadas feições, como escorregamento planar, que indicam seu contato com o itabirito, mas que devido o crescimento de vegetação do solo desenvolvido *in situ*, as poucas evidências da presença desta litologia é observada no bairro Piedade.

O itabirito é a litologia analisada no maciço em investigação, e sua predominância na área alcança 95%. É encontrado alterado em todo o maciço. Contudo, no bairro Taquaral, estão expostas as porções menos alteradas e de melhor percepção da parte estrutural. Além das descontinuidades, são observados veios de quartzo e feições assimétricas nos veios indicando cinemática, ficando apenas como menção, pois não são utilizados como parâmetros de classificação geomecânica de maciços.

O filito (Formação Cercadinho) está exposto nas porções mais elevadas do bairro Morro Santana em contato com o Itabirito, nas proximidades da Fazenda Campo Grande. Encontra-se muito alterado e com intercalações de meta-arenito ferruginoso friável. Na maioria das exposições é observado o solo oriundo da litologia em questão com fragmentos da mesma, que certamente deve tratar-se do horizonte C, ou seja, o Saprólito.

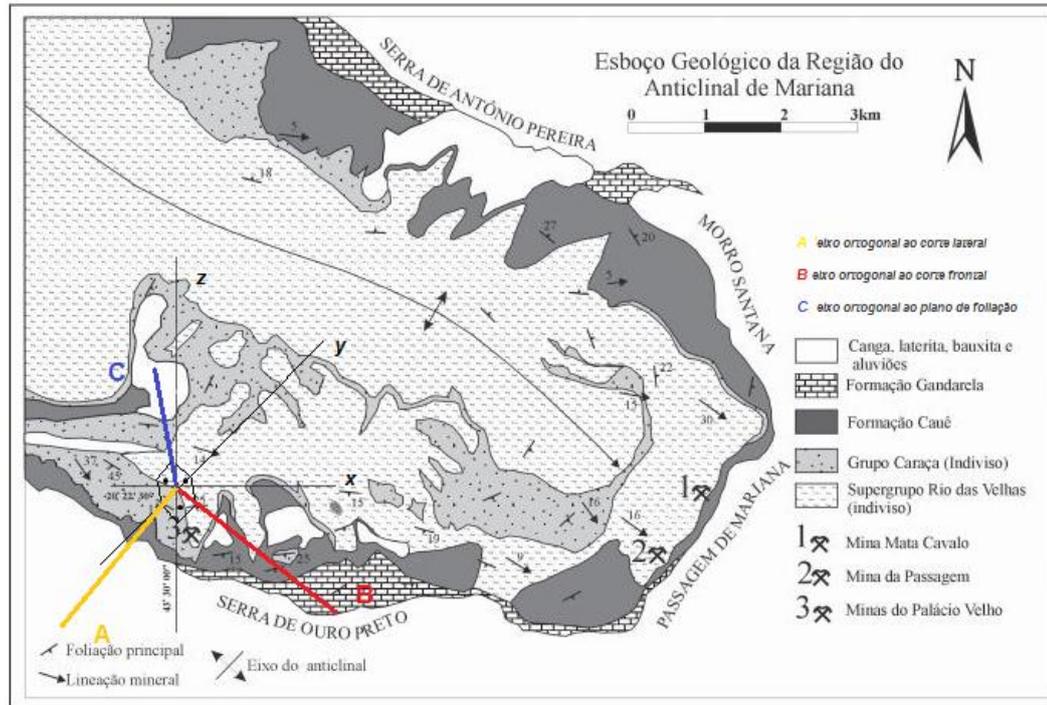
No topo da sucessão estratigráfica são observadas as coberturas sedimentares recentes que são representadas pelas carapaças de canga ferrífera detrítica sobre o itabirito, pelo solo residual nos filitos e quartzito, e pelos colúvios com solos misturados do itabirito e filitos e a presença marcante de matacos métricos de itabirito e canga. Este material nas meias-encostas e sopé dos taludes caracterizam Depósitos de Talus.

Em suma, a sucessão estratigráfica local é uma homoclinal clássica do Supergrupo Minas, no domínio do Flanco S/SW do Anticlinal de Mariana, cuja medida média da atitude da foliação observada em campo é  $N50^{\circ}W / 25^{\circ}SW$ . A figura 7.2 apresenta o mapa geológico da cidade.

No mapa são notadas várias direções de lineamentos de empurrão, sobretudo, nos contatos geológicos entre itabirito e filitos / xistos e entre quartzito e filitos / xistos, o que implica que a estruturação se deu no contraste de competência geomecânica entre as litologias envolvidas. Ressalta-se que as feições assimétricas de quartzo nos veios, certamente, devem indicar a cinemática desses lineamentos de empurrão nas rampas oblíquas como é o caso da Serra de Ouro Preto.



A figura 7.3, o Anticlinal de Mariana com a esquematização dos três eixos investigados (eixos ortogonais ao: plano de foliação; corte lateral da Serra de Ouro Preto; e corte frontal à mesma) para a classificação geomecânica do maciço, que serão descritos à frente.



**Figura 7.3-** Anticlinal de Mariana com os eixos de investigação geomecânica (A, B e C: ortogonais, respectivamente, ao corte lateral e frontal do maciço e à foliação). Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/260979835\\_fig1\\_Figura-1-Mapa-geologico-simplificado-do-Anticlinal-de-Mariana-com-detalhe-da-area-urbana](https://www.researchgate.net/figure/260979835_fig1_Figura-1-Mapa-geologico-simplificado-do-Anticlinal-de-Mariana-com-detalhe-da-area-urbana). Acessado em julho de 2018.

A seguir são apresentadas feições e litologias encontradas nos trabalhos de campo (figuras 7.4, 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8):



**Figura 7.4** - Carapaça de canga ferrífera detrítica sustentando a Serra de Ouro Preto. (Obsevação em P5 no mapa de pontos apresentado na figura 7.1)



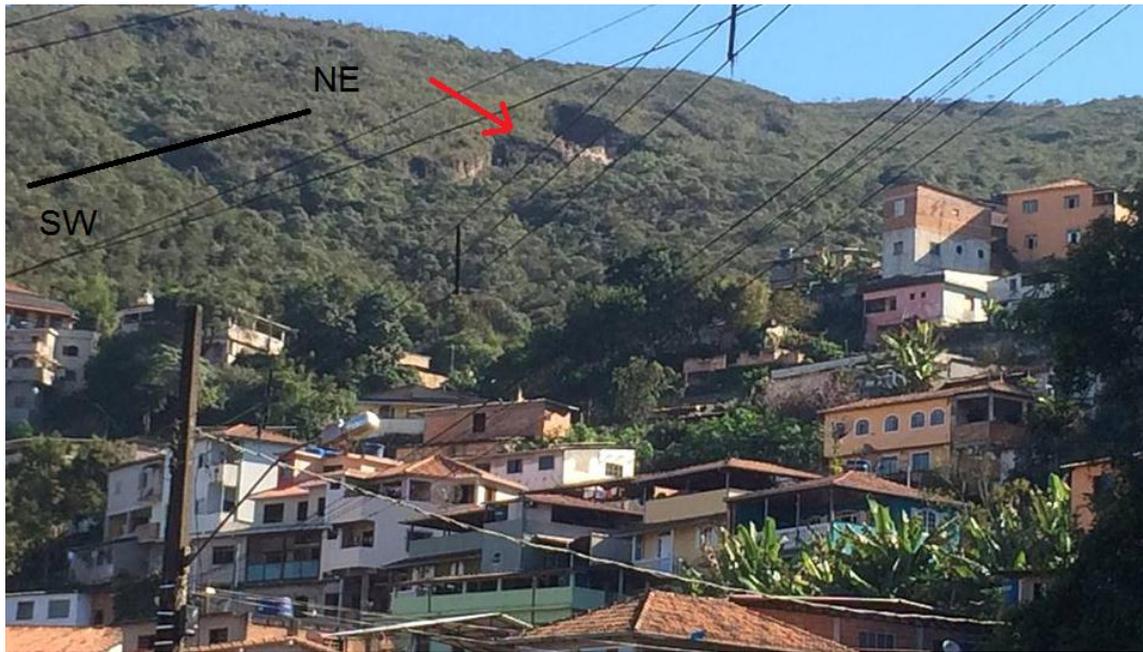
**Figura 7.5** - Afloramento de itabirito alterado próximo à rua Águas Férreas. (Observação em P1 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 7.6** - Feição estrutural com quartzo em afloramento da figura anterior exibindo cinemática. (Observação em P1 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 7.7** - Afloramento de quartzito apresentando foliação bem definida no bairro Piedade. (Observação em P3 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 7.8** - Quartzito em meio ao itabirito e canga ferrífera no bairro Morro da Queimada sustentando a Serra de Ouro Preto. (Observação em P4 no mapa de pontos – Fig 7.1)

# CAPITULO 8

## ANÁLISE GEOFÍSICA

---

### 8.1 MAGNETOMETRIA

#### 8.1.2 Metodologia

Os métodos geofísicos envolvidos nesse estudo foram a magnetometria, e a radiometria. Os dados magnetométricos e radiométricos da área de estudo foram disponibilizados, com finalidades acadêmicas, à Profa. Dra. Maria Sílvia C. Barbosa - Degeo / EM / UFOP que, por sua vez, os disponibilizou para realização deste estudo. Os dados em arquivo ASCII foram importados para o *software Oasis Montaj 7.01* (Geosoft 2008), gerando o arquivo “gdb”. Através da rotina WINXY, foram processados de forma a utilizar apenas os dados da área em estudo. Os dados do campo magnético anômalo, corrigido do *International Geomagnetic Reference Field - IGRF* foram interpolados, através de mínima curvatura, em uma malha regular de 300m. Os mapas georreferenciados foram cartografados, com o auxílio do *software ArcGis 10.0* (Esri 2010). Em relação aos dados aerolevantados tratam-se de dados extraídos da Área 2 que, por sua vez, é subdivida em dois blocos: leste e oeste. A área de estudo insere-se no Bloco Leste. Para ambos os métodos a altura e velocidade de vôo foi 100 m e 200 km / h, o espaçamento entre as linhas de vôo foi de 250 m, o espaçamento entre as linhas de controle foi de 2.500 m, a direção das linhas de vôo foi N 30° W, e a direção das linhas de controle foi N 60° E. A velocidade de levantamento magnetométrico foi de 10 medidas / s e o instrumental utilizado foi o magnetômetro com sensor do tipo vapor de césio, *GEOMETRICS G-822A*, com resolução de 0,001 nT.

Foram investigados na magnetometria, o Campo Anômalo e seus produtos de derivação (Gradiente Vertical / 1ª e 2ª derivada em z para análise de anomalias mais superficiais / residuais, Gradientes Horizontais / 1ª derivada em x para análise de anomalias estruturadas na direção N-S e 1ª derivada em y para análise de estruturação E-W) e a Amplitude do Sinal Analítico no qual se tem a análise das anomalias ao entorno do corpo que lhe deu origem.

Tratamentos estatísticos-estruturais foram realizados com o *software RosePlot*, por meio de rosas de lineamentos e projeção estereográfica.

Os lineamentos magnéticos regionais e as outras considerações geofísicas implicaram em dar uma prévia aos trabalhos de campo, na tentativa da busca e correlação das discontinuidades em campo.

#### 8.1.3 Apresentação de Resultados

Primeiramente é discriminado o fluxograma dos mapas temáticos gerados pelo processamento dos dados aéreos magnetométricos. Assim, da parte da Magnetometria foi gerado o mapa primordial

que é o Campo Anômalo, o qual apresenta as anomalias sempre com um par conjugado de cores mostrando seu caráter dipolar. A partir dele foram criados os mapas Amplitude do Sinal Analítico - ASA, Gradiente Vertical (1ª Derivada em Z) e Mapa Residual (2ª Derivada em Z), e Gradientes Vertical (Derivada em X) e Horizontal (Derivada em Y).

Todos os mapas temáticos geofísicos foram editados e interpretados no ambiente GIS de forma que, como estão georreferenciados, foram sobrepostos uns aos outros para se chegar aos resultados que se seguem. Portanto, reforçar-se no tocante à metodologia da utilização da Geofísica em Classificação Geomecânica que os resultados envolvem dois parâmetros de suporte à avaliação do maciço que são as fáceis e os lineamentos geofísicos.

No presente trabalho são discriminadas morfofáceis magnetométricas e radiométricas. As morfofáceis magnetométricas foram definidas de acordo com a Amplitude de onda, ou seja, a magnitude da anomalia, que nos mapas colorpédicos se dá em proporção às cores quentes. As cores mais quentes como vermelho e magenta representam as anomalias mais altas. Assim, sobrepondo os mapas ASA aos gradientes verticais, chegou-se à definição das morfofáceis que vão de 1 a 4.

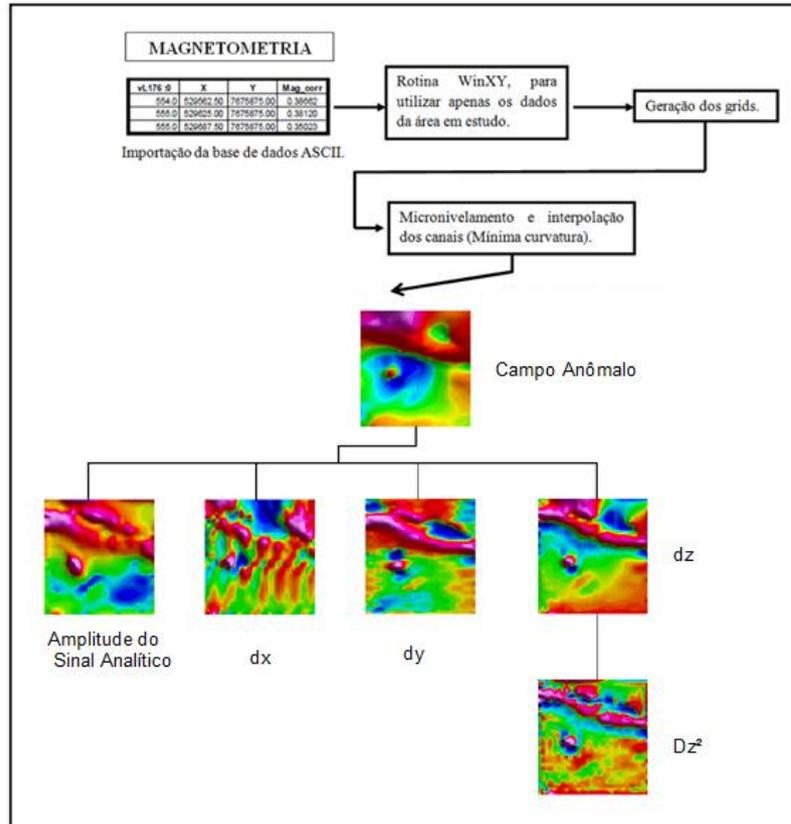
As morfofáceis foram discriminadas de acordo com quatro domínios geomorfológicos: 1) Domínio da Serra Norte (Serra de Ouro Preto / Flanco do Anticlinal de Mariana); 2) Domínio do Núcleo do Anticlinal de Mariana; 3) Domínio do Fundo dos Vales, e 4) Domínio da Serra Sul (Serra do Itacolomi).

Os lineamentos magnéticos foram interpretados pelos mapas magnetométricos, considerando a sobreposição entre eles e, inclusive, os contatos entre as anomalias e a ênfase das estruturas NS e EW, como no caso dos gradientes em X e em Y. As interpretações magnéticas no tocante à discriminação das fáceis e dos lineamentos são apresentadas no mapa ASA. A escolha pelo mapa ASA é devido ao fato de nele estar a superposição de anomalias de várias profundidades.

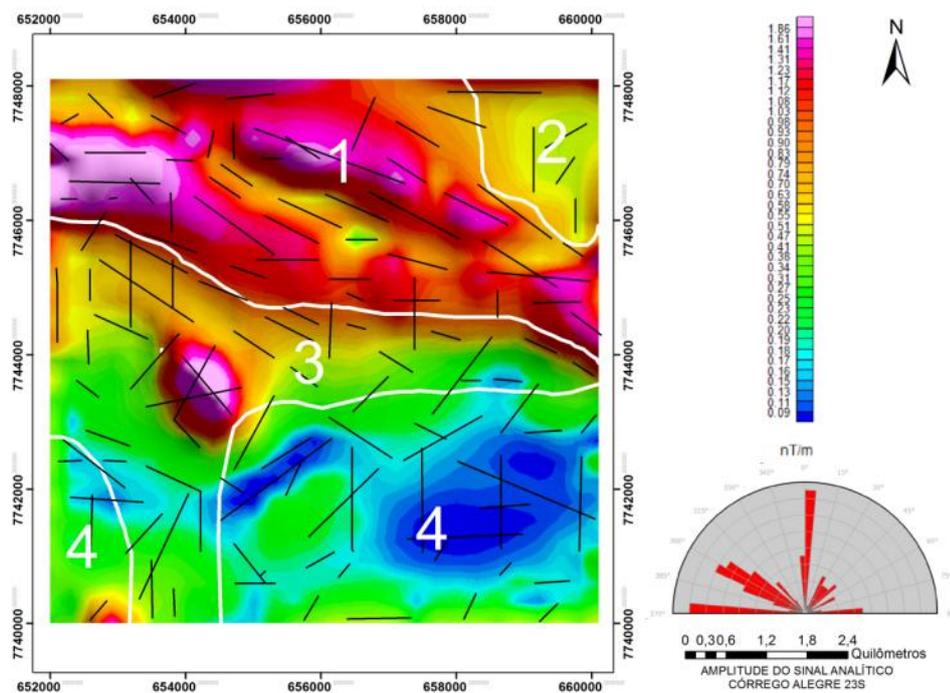
São apresentadas rosas de lineamentos para esboçar a distribuição estatística das direções dos lineamentos magnéticos interpretados para posterior discussão frente aos dados observados em campo.

A figura 8.1 apresenta o fluxograma das etapas de processamento dos dados magnetométricos, bem como, os mapas temáticos. A figura 8.2 apresenta as morfofáceis magnetométricas e lineamentos magnéticos sobrepostos ao mapa ASA. São apresentadas rosas de lineamentos para a percepção da distribuição espacial dos lineamentos interpretados.

O quadro 8.1 apresenta, o campo de variação dos valores de campo magnético na definição das morfofáceis magnetométricas.



**Figura 8.1** - Fluxograma e apresentação dos mapas temáticos magnetométricos obtidos através do banco de dados Área 2 CODEMIG, CPRM.



**Figura 8.2** - Mapa temático de Amplitude do sinal analítico, sendo apresentadas as morfocfaces magnetometricas 1,2,3 e 4 e os lineamentos magnéticos regionais. Obtida através do banco de dados Área 2 CODEMIG, CPRM.

MORFOFÁCEIS	DOMÍNIO GEOMORFOLÓGICO	CLASSIFICAÇÃO	CORES EM MAPA ASA	VALORES [nT/m]
1	Serra de Ouro Preto (a Norte)	Alto	Vermelho ao Magenta	0.47 a 1.86
2	Núcleo do Anticlinal de Mariana	Intermediário a Alto	Amarelo	0.41 a 0.47
3	Fundo dos vales de Ouro Preto	Intermediário	Verde	0.27 a 0.41
4	Serra do Itacolomi (a Sul)	Baixo a Intermediário	Azul ao Verde	0.9 a 0.27

**Quadro 8.1** - Campos de variação para as morfofaceis magnetométricas definidas no mapa ASA.

## 8.2 RADIOMETRIA

### 8.2.2 Metodologia

Os dados radiométricos foram levantados analogamente ao levantamento magnetométricos. Assim sendo, na radiometria a velocidade de levantamento foi de 1 medida / s e o instrumental utilizado foi o gamaespectrômetro *EXPLORANIUM GR-820*, de 256 canais espectrais (LASA, 2001).

Na radiometria analisaram-se os canais de Th, U e K, as razões U / Th, U / K, Th / K, Contagem Total e Fator F (comparação dos radioelementos de dois a dois entre os três para comparar a ocorrência de um radioelemento em relação a outro e favorecer a percepção de alterações nas rochas, como hidrotermalismo, e determinação de idade relativa pela relação do conteúdo de elementos pais e filhos), comparando e integrando as anomalias entre os mapas temáticos para se ter um modelo que distingue as litologias da área e identifique traços geoestruturais.

Tratamentos estatísticos-estruturais foram realizados com o *software* RosePlot, por meio de rosas de lineamentos e projeção estereográfica.

Os lineamentos radiométricos regionais integrados aos magnéticos e as outras considerações geofísicas implicaram em dar uma prévia aos trabalhos de campo, na tentativa da busca e correlação das discontinuidades em campo.

### 8.2.3 Apresentação de Resultados

Analogamente ao método magnetométrico, é discriminado o fluxograma dos mapas temáticos gerados pelo processamento dos dados aéreos radiométricos. Assim, da parte da Radiometria foram gerados os canais separados de Tório, Urânio e Potássio, Contagem Total, Razões isotópicas e Fator F.

Os mapas temáticos radiométricos foram editados e interpretados no ambiente GIS de forma que, como estão georreferenciados, foram sobrepostos uns aos outros para se chegar aos resultados que se seguem, visando a discriminação de morfofaceis radiometricas e os lineamentos radiométricos.

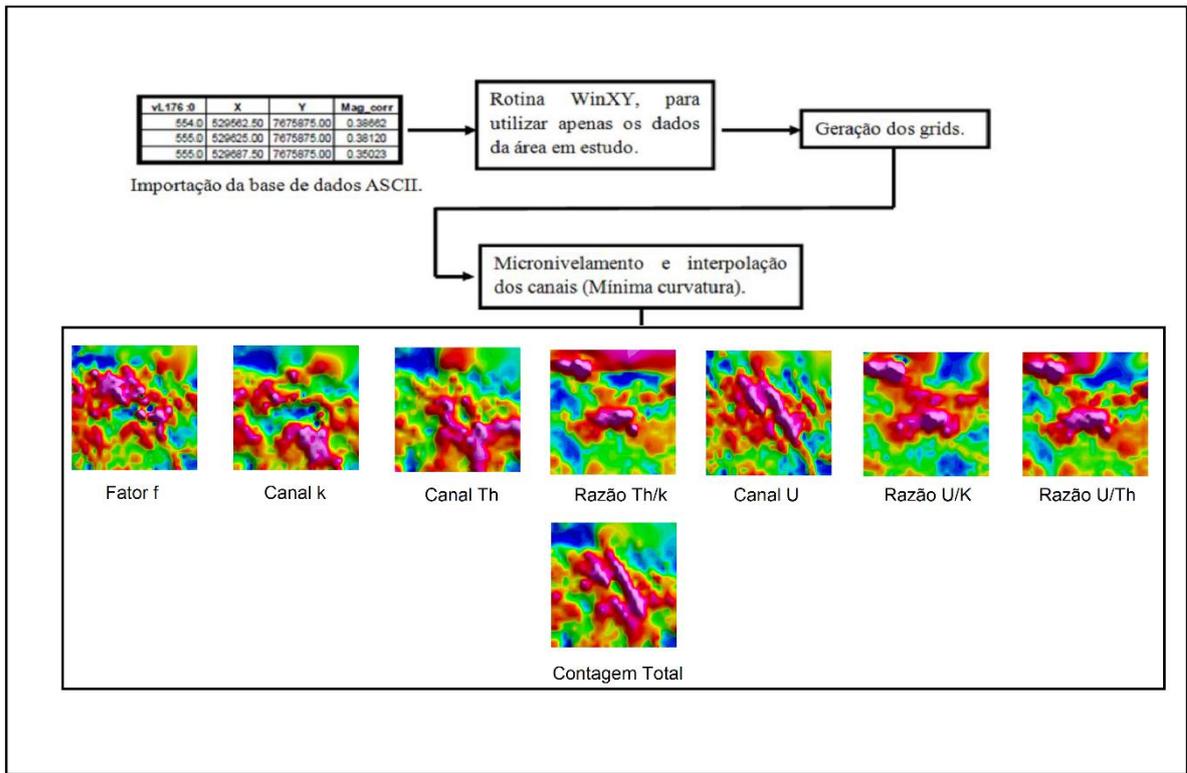
As morfofaceis radiometricas (que também vão de 1 a 4) foram definidas pelo conteúdo energético da combinação de radioelementos em cada domínio geomorfológico supracitado.

Os lineamentos radiométricos foram interpretados pelos mapas radiométricos, considerando a sobreposição dos mapas e, inclusive, os contatos entre as anomalias. As interpretações radiométricas, que incluem a discriminação das fáceis e dos lineamentos, são apresentadas no mapa de Canal de Tório. A escolha pelo mapa Canal de Tório é devido ao fato de ele ser, entre os outros radioelementos considerados neste trabalho, o mais resistente física e quimicamente às intempéries, considerando as condições extremas de intemperismo em Ouro Preto.

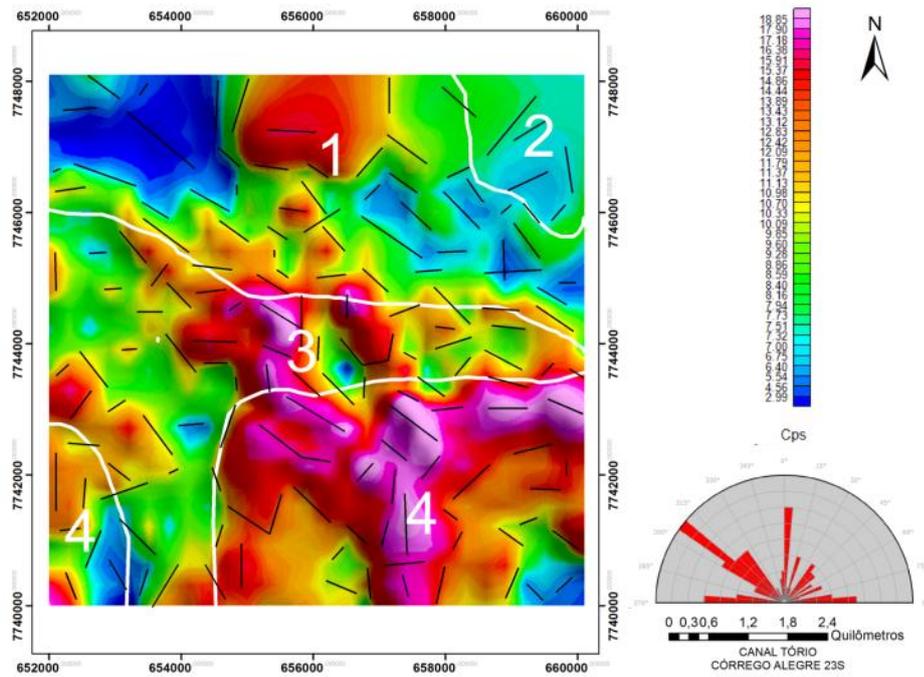
São apresentadas rosas de lineamentos para esboçar a distribuição estatística das direções dos lineamentos radiométricos interpretados para posterior discussão frente aos dados observados em campo.

A figura 8.3 apresenta o fluxograma das etapas de processamento dos dados radiométricos, bem como os mapas temáticos. A figura 8.4 apresenta as morfofaceis radiometricas e lineamentos radiométricos sobrepostos ao mapa Canal de Tório. São apresentadas rosas de lineamentos para a percepção da distribuição espacial dos lineamentos interpretados.

O quadro 8.2 apresenta o campo de variação dos valores de campos de variação no conteúdo de radioelementos para cada morfofaceis radiometricas considerada.



**Figura 8.3** - Fluxograma e apresentação dos mapas temáticos radiométricos. Obtidos através do banco de dados Área 2 CODEMIG, CPRM.



**Figura 8.4** - Mapa temático canal Th, sendo apresentadas as morfofaçeis radiométricas 1,2,3 e 4 além dos lineamentos principais. Obtida através do banco de dados Área 2 CODEMIG, CPRM.

MORFOFÁCEIS	DOMÍNIO GEOMORFOLÓGICO	Conteúdo Relativo de Radioelementos		
		$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{238}\text{U}$
1	Serra de Ouro Preto (Norte)	Baixo a Intermediário	Baixo a Intermediário	Baixo a Intermediário
2	Núcleo do Anticlinal de Mariana	Baixo a Intermediário	Intermediário	Intermediário
3	Fundo dos vales de Ouro Preto	Alto	Baixo a Alto	Alto
4	Serra do Itacolomi (Sul)	Intermediário a Alto	Intermediário a Alto	Baixo a Intermediário

**Quadro 8.2** - Campos de variação relativa concentração de isótopos para morfofaçeis radiométricas definidas nos mapas de canal Th, K e U.



# CAPITULO 9

## ANÁLISE GEOMECÂNICA

---

### 9.1 METODOLOGIA

Adotou-se neste trabalho uma sistematização para a classificação geomecânica que consiga definir a situação mais fiel à condição real do maciço rochoso que é a classificação individualizada em relação aos três eixos ortogonais ao mesmo e a posterior comparação ao quesito isotropia e anisotropia, parâmetros que dizem respeito à similaridade da condição do maciço nas três direções.

No caso do maciço estudado, os planos de investigação seriam: o eixo ortogonal ao corte frontal do maciço; o eixo ortogonal ao corte lateral do mesmo, e o eixo ortogonal ao plano da foliação. Assim, seguem os detalhes de campo de cada uma das condições que serão discriminadas a seguir.

### 9.2 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

#### 1) *Eixo ortogonal ao corte frontal do maciço:*

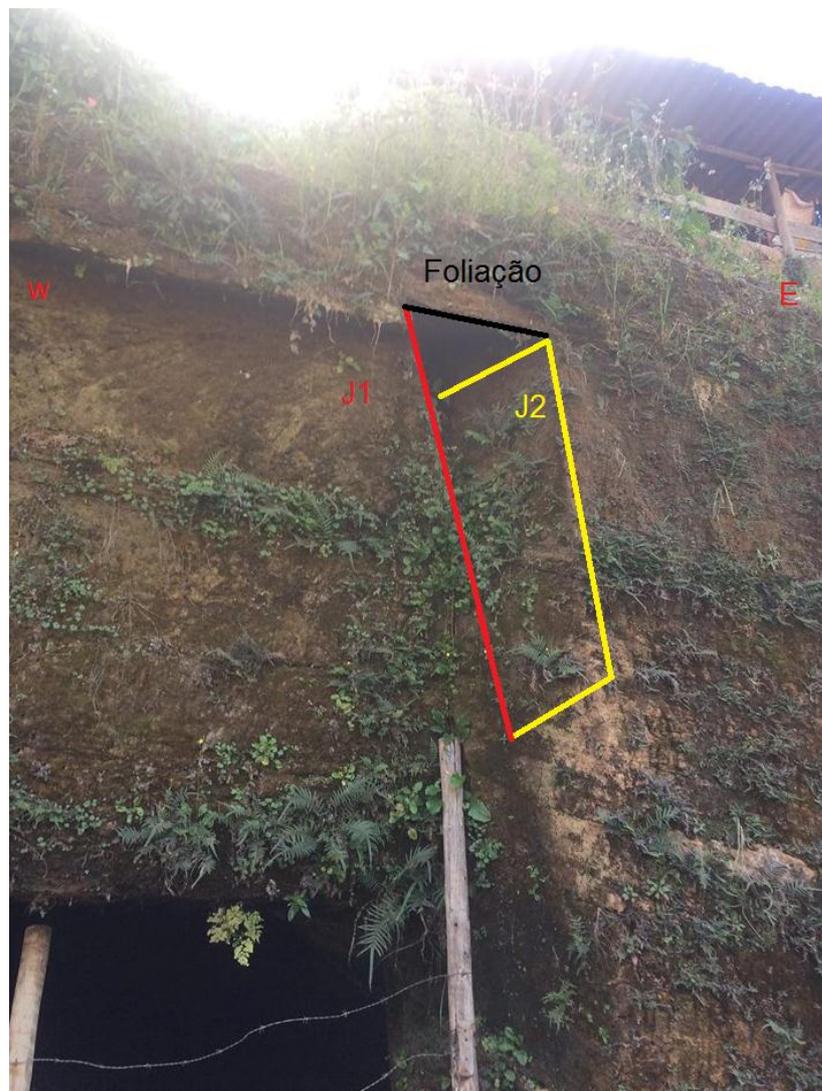
➤ Este é o eixo em que há o maior número de afloramentos no maciço. Os afloramentos cujas estruturas estão mais visíveis estão nas ruas Maciel e Águas Férreas no bairro Taquaral. Há afloramentos mais alterados nas exposições da Rua Quinze de Agosto no bairro Morro Santana;

➤ Nestes afloramentos são observadas duas famílias de descontinuidades, que são J1 e J2, que apresentam atitude média, respectivamente, N65°E / 70°SE e N10°E / 85°NW. São perceptíveis inúmeras feições centimétricas a métricas de escorregamento em cunha devido à intersecção entre essas famílias;

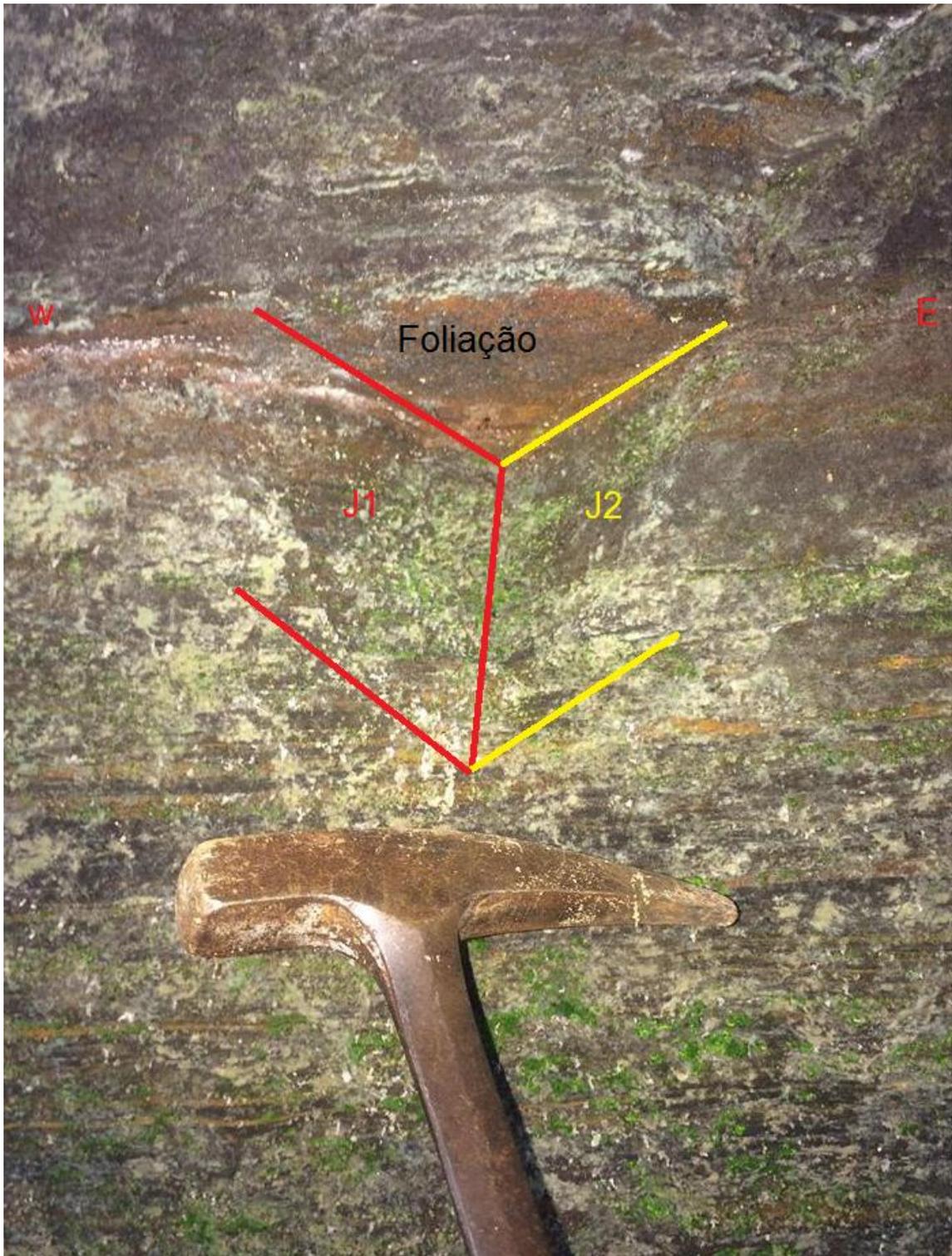
➤ O espaçamento médio entre as descontinuidades da família J1 e J2 (figuras 9.1, 9.2 e 9.3), são respectivamente, 3,5m e 3m. A separação / abertura das descontinuidades de ambas variam, mas predominam descontinuidades contínuas com aberturas entre 1 e 5mm, com a ocorrências de algumas maiores que 5mm (figura 9.4), sem enchimento;

➤ O maciço está em condição hidrogeológica úmida, mas há escorrimentos pontuais pelo despejo de água de dejetos (encanamentos com vazamento) maciço adentro pelas residências. A Resistência à Compressão Uniaxial pelo Método do Martelo é classificada como resistente, pois o itabirito, neste eixo, é quebrado por alguns golpes de martelo, e é dificilmente riscável pelo canivete, logo, RCU = 50 a 100MPa;

➤ O R.Q.D. foi definido via relação matemática empírica se chegando ao valor em torno de 100%. Em relação ao parâmetro orientação são notáveis várias galerias de exploração de ouro abandonadas desenvolvidas no sentido inverso ao mergulho da foliação, e adicionalmente, as fundações das casas estão sendo desenvolvidas também neste mesmo sentido.



**Figura 9.1** - Feições de deslizamento em cunha em itabirito. Os planos de fratura das famílias J1 e J2 em conjunto com a foliação principal favorecem este tipo de movimento de massa. (Observação em P1 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 9.2** - Feições de movimento em cunha no interior de cavidade no afloramento de itabirito. (Observação em P1 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 9.3** - Feição de movimento em cunha descrito na imagem anterior observado lateralmente. (Observação em P1 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 9.4** - Ocorrência pontual de espaçamento entre descontinuidades maior que 5mm em afloramento de itabirito. (Observação em P1 no mapa de pontos – Fig 7.1)

2) *Eixo ortogonal ao corte lateral do maciço:*

- Neste eixo, a investigação foi realizada, observando as feições pelos cortes laterais no aclave e declive da serra. Os poucos afloramentos possíveis de fazer as observações estão na travessa que liga as ruas 13 de Maio e Maciel;
- Foram detectadas mais quatro famílias de juntas definidas como J3, J4, J5 e J6 (figuras 9.5, 9.6 e 9.7), cujas atitudes médias são  $N40^{\circ}E/60^{\circ}NW$ ,  $N75^{\circ}E/70^{\circ}NW$ ,  $EW/70^{\circ}N$  e  $N65^{\circ}W/35^{\circ}NE$ . Ressalta-se que dessas famílias, a única que é possível observar o espaçamento entre suas juntas é a J4, com o espaçamento médio de 1m, mesmo assim, o espaço linear de amostragem é pequeno (10m), o que torna essa informação pouco confiável. Outro destaque é para a família J6, que é a de menor mergulho, cuja abertura é muito maior que 5mm, bem como, apresenta a direção mais similar à direção da foliação, porém a direção de seu mergulho é inverso à direção ao mergulho da mesma;
- A Resistência à Compressão Uniaxial pelo Método do Martelo é classificada como resistente, pois o itabirito, neste eixo, é quebrado por alguns golpes de martelo, e é dificilmente riscável pelo canivete, logo,  $RCU = 50$  a  $100Mpa$ ;
- Vale ressaltar que uma única junta da família J3 aparece no eixo ortogonal ao corte frontal e por isso não foi considerada para a classificação geomecânica em relação a este eixo.



**Figura 9.5** - Afloramento de itabirito com foliação e plano de fratura da família J3 bem definidos. (Observação em P1 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 9.6** - Foliação e famílias de juntas J3, J4 e J5 em afloramento de itabirito. (Observação em P2 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 9.7** - Fratura da família J6 apresentando baixo mergulho vista em corte lateral do maciço. (Observação em P6 no mapa de pontos – Fig 7.1)

3) *Eixo ortogonal ao plano da foliação:*

- Há grandes dificuldades na coleta de informações neste eixo devido à ocupação urbana (figura 9.8) inadequada sobre os planos de foliação que controlam estruturalmente as encostas onde estão assentadas as casas sobre o maciço;
- Outra situação são as coberturas de sedimentos recentes sobre os planos de foliação também. Assim, a única informação que foi obtida em campo neste eixo foi a Resistência à Compressão Uniaxial pelo Método do Martelo, que é classificada como medianamente resistente: golpe firme com o martelo de geólogo quebra o itabirito, neste eixo, e o canivete apenas risca a superfície, logo, RCU = 25 a 50MPa.



**Figura 9.8** - O sobrepeso gerado pela ocupação urbana é fator condicionante para caracterizar a estabilidade do maciço rochoso, além disso, a existência das residências dificulta a caracterização e estudo do maciço no eixo ortogonal ao plano da foliação. (Observação em P7 no mapa de pontos – Fig 7.1)

São observadas evidências de encanamento indevido potencializando infiltração no maciço (figura 9.9) e, em relação a movimentos de massa, queda de blocos (figuras 9.10 e 9.11) e depósito de Tálus (figura 9.12), escorregamento planar (figura 9.13) e em cunha (figura 9.14). Outras observações de campo são as evidências encontradas de injeção de calda de cimento em juntas do bairro do Morro

Santana, inadequadamente, pelos próprios moradores (figura 9.15). Ressalta-se uma galeria antiga de exploração de ouro desenvolvida a partir da estruturação da família J2 (figura 9.16) perto da bifurcação que separa os bairros Alto da Cruz e Morro Santana (início da rua Quinze de Agosto).



**Figura 9.9** - Encanamento mal acondicionado próximo ao afloramento de itabirito mostra influência antrópica como fator condicionante para as condições de estabilidade do maciço. (Observação em P1 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 9.10** - Matações caracterizam movimentos de massa do tipo queda de blocos no topo da serra. Na figura são observados famílias de juntas que promovem o movimento. (Observação em P8 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 9.11** - Matações no Morro da Queimada.(Observação em P8 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 9.12** - Depósito de Talus. É evidente a inclinação  $\phi$  gerada no muro de arrimo devido ao movimento dos matações e material de alteração de itabirito e filito. (Observação em P9 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 9.13**- Filito alterado exposto por escorregamento planar de itabirito e material alterado no bairro Piedade. Há evidências pouco sólidas sobre o movimento combinado de escorregamento rotacional. ( Observação em P10 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 9.14** - Feição de movimento em cunha em maior escala, caracterizado pelas famílias J1, J2 e pelo plano de foliação. As cunhas são de aproximadamente 10m no itabirito, bairro Morro Santana. (Observação em P11 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 9.15** - Evidências de ação antrópica. Injeção de caldas de cimento indevidamente em juntas para estabilização parcial de maciço em local onde é observada residência assentada sobre as estruturas no bairro Morro Santana. (Observação em P11 no mapa de pontos – Fig 7.1)



**Figura 9.16** - Corte de antiga galeria para extração do ouro feito acompanhando a família J2. (Observação em P12 no mapa de pontos – Fig 7.1)

Considerando a falta de informação nas direções dos eixos ortogonais ao plano de foliação e ao corte lateral do maciço, o contorno é realizar a classificação geomecânica do maciço apenas na direção do eixo ortogonal ao corte frontal do mesmo, e deixar a sugestão para a realização de trabalhos posteriores que obtenham informações das continuidades na extensão do maciço nas vizinhanças como no corte lateral no maciço na ladeira que liga a Praça Tiradentes ao Morro São Sebastião e a ladeira que liga a Rua Padre Rolim ao Morro do Piolho. Neste sentido, ficam registrados neste trabalho o apanhado das famílias J3, J4, J5 e J6 para serem verificados os espaçamentos de suas juntas, principalmente.

Portanto, no eixo ortogonal ao corte frontal, considerando os valores descritos no quadro 9.1, o maciço obteve valores de 64 tanto para a família de fraturas J1 quanto para a família J2. Assim sendo, considerando os valores descritos no quadro 5.5, pode-se classificar o maciço como bom, tendo valores estimados de coesão na faixa de 300 a 400kPa e ângulo de atrito variando de 35 a 45°.

Pesos		
Parâmetros	J1	J2
Resistencia material rochoso intacto	7	7
RQD(%)	20	20
Descontinuidades(m)	20	20
Condições das Descontinuidades	15	15
Presença de água	7	7
Correção devido orientação das descontinuidades	-5	-5
<b>TOTAL</b>	<b>64</b>	<b>64</b>

**Quadro 9.1** - Avaliação dos parâmetros e resultados obtidos.



## CAPITULO 10

### INTEGRAÇÃO DA GEOFÍSICA À GEOMECÂNICA

---

A escolha da geomorfologia como referência para balizar as fáceis geofísicas tem uma grande implicação para este trabalho. Em se tratando de região montanhosa com uma expressiva variedade de litotipos polideformados combinada ao clima úmido e pré-disposição de movimentações de massa, a erosão diferencial é intensa no Distrito Sede do Município de Ouro Preto. Assim, a primeira colocação é a de distribuição areal, por erosão diferencial, dos itabiritos e quartzitos sustentando as serras e os xistos e filitos encaixando os fundos de vale. Pela análise das morfofáceis magnetométricas e das morfofáceis radiométricas chega-se a este modelo geomorfológico plausivelmente. A argiloidade dos litotipos metassedimentares geram anomalias radiométricas (tório e potássio altos) bem contrastantes ao entorno, bem como, as altas anomalias magnéticas do itabirito contrastam do entorno também.

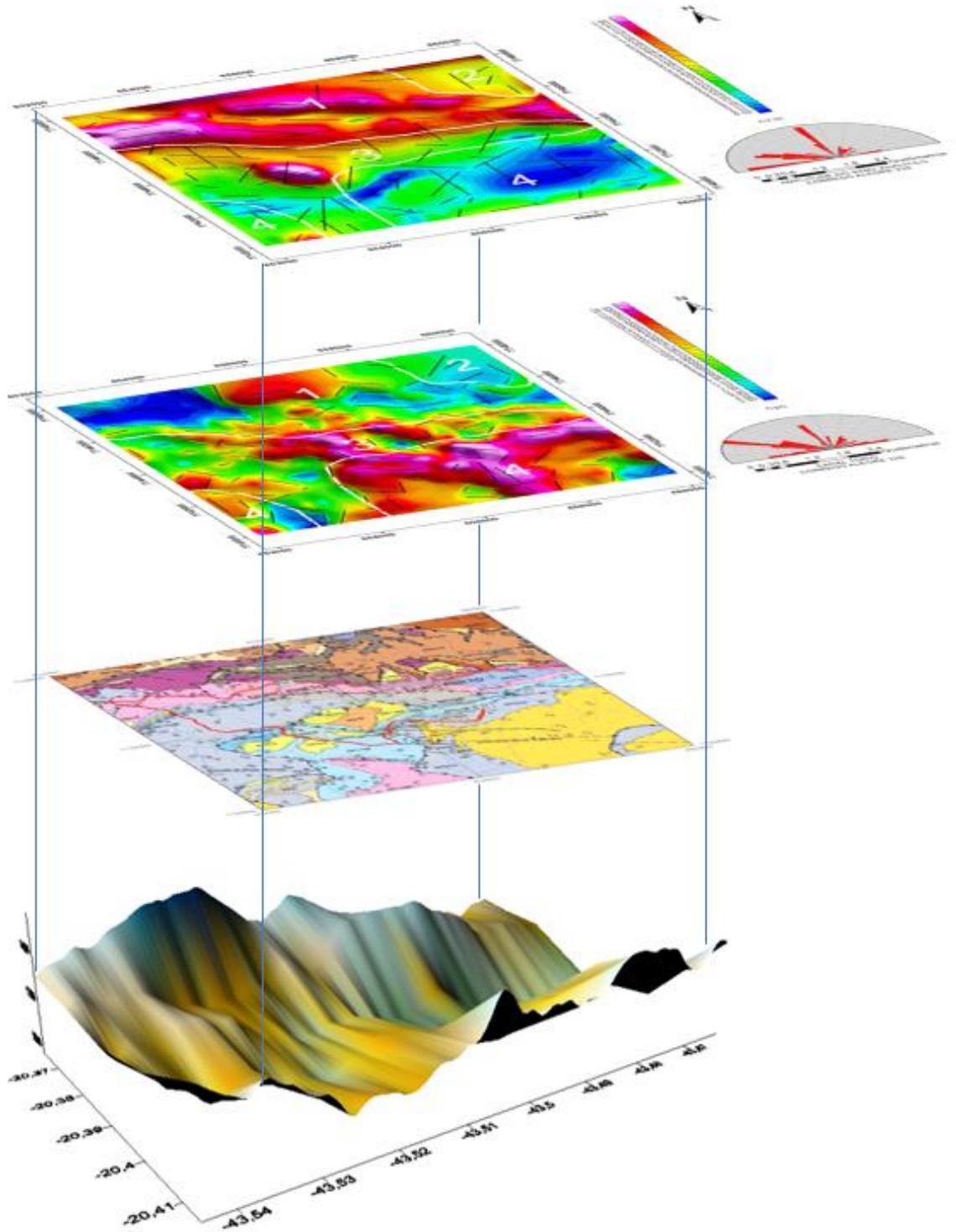
Todos os mapas geofísicos exibem um mesmo padrão estrutural regional de *trend* noroeste o que implica ser a direção da foliação metamórfica que condiz com os dados aferidos no campo, em que a atitude média de foliação fora mencionada anteriormente.

A razão U/Th, no qual se verifica baixos valores (mais radioelementos filhos que pais) no domínio do núcleo do anticlinal, porção nordeste da área, significa a presença de litotipos relativamente mais antigos, e altos valores (mais radioelementos pais que filhos) no domínio do flanco, significando o governo de litotipos relativamente mais recentes. Isto implica na presença dos xistos do Supergrupo Rio das Velhas (Arqueano) na porção nordeste, e a distribuição das litologias do Supergrupo Minas no restante da área, as quais são litologias mais recentes (Proterozóico).

Em relação ao Fator F, a título de informação adicional, é notada alta anomalia no domínio do flanco e do vale, onde, respectivamente, podem significar o hidrotermalismo (enriquecimento secundário de potássio) evidenciado pelos veios hidrotermais quartzosos auríferos minerados no Ciclo do Ouro (séc. XVII e XVIII) na região, e a mobilização de material fraturado, incluindo os veios, para os vales. Além disso, outra informação referente à parte econômica da região são as altas anomalias de urânio que podem estar atreladas aos depósitos de uraninita do quartzito da Formação Moeda.

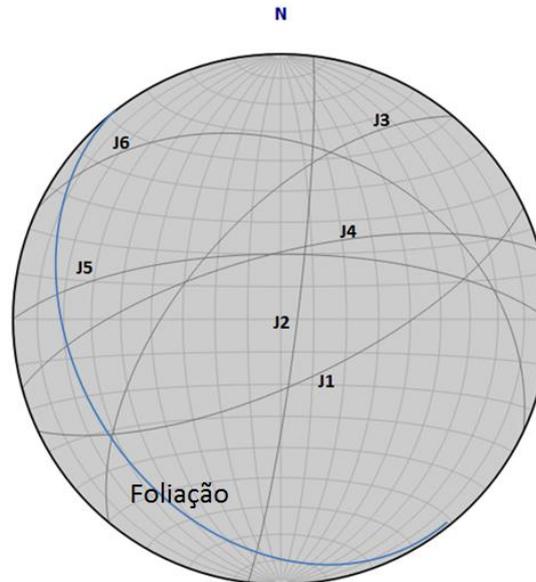
Analisando a rosa de lineamentos magnetométricos e os radiométricos, observam-se quatro feições principais: F1, F2, F3 e F4. Desta forma, F1 diz respeito à estruturação de direção média N60°W; F2, N30°E; F3 tem direção aproximadamente NS a N05°E, e F4, EW. Além delas, há duas feições com baixa expressividade nos mapas geofísicos que são F5 e F6 cujas direções médias são, respectivamente, N60°E e N75°E. Neste sentido, por meio da figura 10.1, é observada a correlação entre a sobreposição dos mapas geofísicos interpretados sobre a geologia e a topografia (superfície gerada pelo software

*Surfer*), facilitando assim, a compreensão dos domínios geomorfológicos e a sua relação com os aspectos litoestruturais em estudo.



**Figura 10.1** - Correlação entre a sobreposição dos mapas geofísicos interpretados sobre a geologia e a topografia.

A representação das atitudes médias das seis famílias observadas em campo foram plotadas em projeção estereográfica (figura 10.2).



**Figura 10.2** - Projeção estereográfica das atitudes das famílias de juntas observadas em campo: J1, J2, J3, J4, J5 e J6, e a foliação metamórfica.

Comparando-as com os lineamentos geofísicos, há as seguintes implicações:

- A feição geofísica F1 exprime correspondência à família J6;
- A feição geofísica F2 exprime correspondência à família J3;
- A feição geofísica F3 exprime correspondência à família J2;
- A feição geofísica F4 exprime correspondência à família J5;
- A feição geofísica F5 exprime correspondência à família J1;
- A feição geofísica F6 exprime correspondência à família J4.

Dos lineamentos referenciados na literatura, conforme Nalini Jr (1993), dois foram verificados em campo e na geofísica, que correspondem respectivamente, às famílias J5 (E/W) e J1, J3 (NE). A relação entre os lineamentos geofísicos e os observados em campo mostra que a análise geofísica serviu como grande suporte à prospecção das estruturas, logo, percebe-se o efetivo respaldo dos levantamentos geofísicos conduzindo à prévia dos trabalhos de campo. A respeito das expressões de empurrão do mapa, alguns lineamentos geofísicos podem exibir correspondência, como nas direções N/S e NW, mas não foram observadas evidências cinemáticas suficientes para tal discussão.



## CAPÍTULO 11

### CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

O objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho foram alcançados, com a limitação de se chegar à classificação geomecânica do maciço de forma parcial, devido não ter sido possível, com as razões discutidas, analisar os três eixos considerados. Assim, seguem as seguintes conclusões:

- Foram gerados mapas geofísicos temáticos magnetométricos: Campo Anômalo, Amplitude do Sinal Analítico, Mapas de gradiente vertical e horizontal em x e y, e mapa residual;
- Foram gerados mapas geofísicos temáticos radiométricos: Canais de Urânio, Tório e Potássio, razões entre os radioisótopos, Contagem Total e Fator F;
- Foram interpretados os mapas magnetométricos dividindo-os em quatro morfofaces magnetométricas para delimitar o maciço de itabirito e discriminando os lineamentos magnéticos regionais, representando-os em diagrama estatístico - rosa de lineamentos;
- Foram interpretados os mapas radiométricos dividindo-os em quatro morfofaces radiométricas, definindo diferentes combinações dos três radioisótopos correlacionáveis a uma determinada litologia, e discriminando os lineamentos radiométricos, representando-os em diagrama estatístico - rosa lineamentos;
- Todos os mapas geofísicos exibem um mesmo padrão estrutural regional de *trend* noroeste o que implica ser a direção da foliação metamórfica que condiz aos dados aferidos no campo, em que a atitude média de foliação é N50°W / 25°SW;
- As morfofaces magnetométricas e radiométricas podem ser balizadas de acordo com a geomorfologia da cidade de Ouro Preto, onde os domínios são: 1) Domínio da Serra Norte (Serra de Ouro Preto / Flanco do Anticlinal de Mariana); 2) Domínio do Núcleo do Anticlinal de Mariana; 3) Domínio do Fundo dos Vales, e 4) Domínio da Serra Sul (Serra do Itacolomi);
- Analisando a rosa de lineamentos magnetométricos e os radiométricos, observam-se quatro feições principais: F1, F2, F3 e F4. Desta forma, F1 diz respeito à estruturação de direção média N60°W; F2, N30°E; F3 tem direção aproximadamente NS a N05°E, e F4, EW. Além delas, há duas feições com baixa expressividade nos mapas geofísicos que são F5 e F6 cujas direções médias são, respectivamente, N60°E e N75°E;

- Os dados de campo levantados tem grande relação aos lineamentos geofísicos. Desta forma os lineamentos F1, F2, F3, F4, F5 e F6, exprimem correspondência, respectivamente, às famílias J6, J3, J2, J5, J1 e J4;
- Conforme os parâmetros definidos no Sistema de Classificação Geomecânica RMR, o eixo ortogonal ao corte frontal do maciço de itabirito considerado foi avaliado pelo valor 64, que se refere a maciço bom, tendo valores estimados de coesão na faixa de 300 a 400kPa e ângulo de atrito variando de 35 a 45°;
- Há várias evidências de movimentos de massa em Ouro Preto: escorregamento em cunha (feições observadas nas intersecções entre as famílias J1 e J2), planar (nos contatos entre filito e itabirito) e rotacional (material inconsolidado), rastejo e queda de blocos (inclusive, com matacões métricos).
- Embora a cidade tenha o histórico de inúmeras ocorrências de movimentos de massa no maciço de itabirito, por meio deste trabalho concluiu-se que o maciço é classificado parcialmente (eixo ortogonal ao corte frontal da Serra de Ouro Preto) como bom. Esperava-se um resultado ruim, mas, em alguns pontos da cidade verifica-se que a estabilidade do maciço é controlada pela relação de corte, inclusive, em litologias menos competentes como os filitos. Nota-se que cortes de estrada como observado nas partes da cidade, Volta do Vento e Morro da Forca, os maciços de filito não apresentam movimentos de massa expressivos. Por outro lado, é razoável que o maciço de itabirito não seja tão ruim, pois caso contrário, não haveria tanta galeria abandonada de exploração de ouro intacta, decorridos 3 a 4 séculos.

Quanto às considerações finais, sugere-se aos trabalhos posteriores realizar a avaliação da estabilidade de taludes via métodos tradicionais e integração de geofísica local como os métodos de Eletrorresistividade e *Ground Penetration Radar* - GPR, dos quais podem se tirar informações razoavelmente precisas quanto à análise estrutural mais acurada (como a definição dos contatos entre filito e itabirito, nível freático e sentido de fluxo) de partes pontuais do maciço.

Outros parâmetros que o sistema RMR não considera e que é preciso considerar é o sobrepeso das residências no talude, a solicitação de novos campos de tensão frente aos cortes no sopé do talude, o tráfego intenso de veículos, a neotectônica, os dejetos líquidos despejados pelos moradores, dentre outros.

A coesão e o ângulo de atrito interno do maciço foram estimados de forma expedita pela classificação geomecânica via RMR, visto que para convergir aos valores reais, são recomendados testes laboratoriais de cisalhamento simples e ensaio triaxial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABGE. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 2013. Ensaio de Permeabilidade em Solos: orientações para a sua execução no campo. 4.ed. São Paulo.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. 2013. Koppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728.

ALKMIM, F.F. & MARSHAK, S. 1998. Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. Precambrian Research, v. 90, n.1-2, p.29-58.

ALKMIM, F.F. & NOCE, C.M. 2006. The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton. IGCP 509 Field workshop, Bahia and Minas Gerais, Brazil. Field Guide & Abstracts, 114 p.

AZEVEDO, I.C.D.; MARQUES, E.A.G. 2002."Introdução à Mecânica das Rochas". Cadernos Didáticos 85, Editora UFV, 361p.

BARTON, N. 1974. Estimating the shear strength of rock joints. Proc. of 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech. Advances in rock mechanics, Denver, Vol. IIA: 219-220.

BIBLIOTECA NACIONAL. 1973. Ouro Preto: sesquicentenário de elevação de Vila Rica à categoria de Imperial cidade de Ouro Preto, 1823-1973. Rio de Janeiro: Biblioteca Nacional.

BIENIAWSKI, Z.T. 1973, Engineering classification of jointed rock masses: Transaction of the South African Institution of Civil Engineers, v. 15, p. 335-344.

BIENIAWSKI, Z. T. 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses, Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng., 15, pp. 335-344 Bieniawski, Z.T. 1989. Engineering rock mass classifications. New York: Wiley.

BONUCCELLI T. 1999. Estudos dos movimentos gravitacionais de massa e processos erosivos com aplicação na área urbana de Ouro Preto (MG), na escala 1:10.000. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 191 p.

CALÓGERAS J.P. 1904. As minas do Brasil e sua legislação. Companhia Editora Nacional, Rio de Janeiro, 508p.

CARNEIRO M. A. & BARBOSA M. S. C. 2008. Implicações Geológicas e Tectônicas da Interpretação Magnetométrica da Região de Oliveira, Minas Gerais. Revista Brasileira de Geofísica, vol.26 no.1 São Paulo.

CARDOSO, L. H. 2016. Investigação Geofísica na Prospecção de Cavidades Naturais em Litotipos Ferríferos na Região de Mariana, Sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Brasil. Dissertação de mestrado apresentada na Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 82 p.

CARVALHO, E.T. 1987. Carta Geotécnica de Ouro Preto. Tese de mestrado apresentada a Universidade Nova de Lisboa, 53p.

CARVALHO L. M. M. 2006. *Integração de dados de geofísica aérea aplicada à geologia e à prospecção mineral no Distrito Esmeraldífero de Itabira-Ferros, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 178p.

CARNEIRO M.A., CARVALHO JÚNIOR, I.M., TEIXEIRA W. 1998a. Petrologia, Geoquímica e Geocronologia dos diques máficos do Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero) e suas implicações na evolução crustal do Craton do São Francisco Meridional. *Rev Bras Geo* 28(1): 29-44.

CASTRO, J. M. 2006. Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Ouro Preto: UFOP.

CIDADES HISTÓRICAS BRASILEIRAS. Ouro Preto: História. Disponível em: Acesso em: 20/03/2018.

CAVALCANTI, J. A D. 1999. Mineralização Aurífera de Lages- Antônio Dias, Ouro Preto (Dissertação de Mestrado) UNICAMP, Campinas.

CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento do Estado de Minas Gerais. 1995. <http://www.codemig.com.br/mineracao-e-geologia>.

COMDEC - COORDENADORIA MUNICIPAL DE DEFESA CIVIL DE OURO PRETO. Banco De Dados.

CPRM. 2012. Geoparques do Brasil - Propostas: Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG). Úrsula Ruchkys de Azevedo, Maria Márcia Magela Machado, Paulo de Tarso Amorim Castro, Friedrich Ewald Renger, Andréa Trevisol, Décio Antônio Chaves Beato.

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

DELGADO, I. M., SOUZA, J. D., SILVA, L. C., FILHO, N. C. S., SANTOS, R. A., PEDREIRA, A. J., GUIMARÃES, J. T., LUIZ A. A., VASCONCELOS, A. M., GOMES, I. P., FILHO, J. V. L., VALENTE, C. R., PERROTTA, M. M., HEINECK, C. A., 2003. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: BIZZI, L. A., SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (Eds.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília: CPRM.

DERBY O.A. 1906. The Serra do Espinhaço, Brazil. *J. Geol.*, 14(5): 374-401.

DORR, J.V.N.; GAIR, J.E.; POMERENE, J.B.; REYNEARSON, G. A. 1957. Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero. Trad. A. L.M. Barbosa. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. 33 p.

DORR, J.V.N.II. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 641-A*. Geological Survey, pp. 1-110.

DRUMMOND, G.M.; MARTINS, C.S.; MACHADO, A.B.M.; SEBAIO, F.A. & ANTONINI, Y. 2005. Biodiversidade em Minas Gerais, um atlas para sua conservação. 2ª ed. Fundação Biodiversitas, Belo Horizonte. 222p.

ENDO 1.. FONSECA M. A. 1992. Sistema de Cisalhamento Fundão-Cambotas no Quadrilátero Ferrífero, MG: geometria e cinemática. In SBC/Núcleo MG. Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 6. Semana de Estudos da SICEG, 30. Ouro Preto. Anais, 28-31.

ESCHWEGE W.L. 1833. Pluto Brasiliensis. Re-edição 1944, Cia Editora Nacional, São Paulo, 2v.

FERRAND P. 1894. L'ora Minas Geraes. Imprensa Official do Estado de Minas Geraes, Belo Horizonte, v. II, p.22-39.

FONSECA, M.A. & SOBREIRA, F.G. 1997. The Landslide at Piedade Borough, Ouro Preto, Minas Gerais: Instability Processes in Old Mining Áreas. 2<sup>nd</sup> Pan-Am. Symp. Landslides, 2nd COBRAE, Rio de Janeiro, 1997. P. 149-144.

FONSECA M.A. & SOBREIRA, F.G. 1998. *Geologic Risk Resulting From The Land Use of Mining Sites in Piedade Neighborwood*, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

GOMES R.C., ARAÚJO L.G., BONUCCELLI T., SOBREIRA F.G. 1998. Condicionantes Geotécnicos do Espaço Urbano de Ouro Preto/MG. In: ABMS, Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11, Anais, p. 363-370.

HUNGR, O., LEROUEIL, S., PICARELLI, L. 2014. 11: 167. The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, 11, 167- 194.

IGA. 1995. Desenvolvimento ambiental de Ouro Preto - microbacia do Riberirão do Funil Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Minas Gerais/CETEC. 363p.

International Society For Rock Mechanics (ISRM). 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. J. Rock Mechanics Min. Sci. Geomech. abstr., 15, 319-368p.

KEAREY, P., BROOKS, M. & HILL, I. 2002. An Introduction to Geophysical Exploration, 3rd ed.

LAUFFER, H. 1958, Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau: Geology Bauwesen, v. 24, p. 46-51.

LOBATO, L.M.; BALTAZAR, O.F.; REIS, L.B.; ACHTSCHIN, A.B.; BAARS, F.J.; TIMBÓ, M.A.; BERNI, G.V; MENDONÇA, B.R.V. de; FERREIRA, D.V. 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa, Belo Horizonte: CODEMIG. CD-ROM. 2005.

LUIZ, J.G. & SILVA, L.M.C. 1995. Geofísica de Prospecção. v.1. Belém, Universidade Federal do Pará, 311 p.

MACHADO, N.; SCHRANK, A.; NOCE, C.M.; GAUTHIER, G. 1996. Ages of detrital zircon from ArcheanPaleoproterozoic sequences: Implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. Earth and Planetary Science Letters, 141:259-276.

MAXWELL, C. H. 1958. The Batatal Formation. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, 2(7), 60-61.

MENICONI R. O. M.. 2001. A construção da imagem de Ouro Preto: Algumas constatações e muitas incógnitas. Cadernos de Arquitetura e Urbanismo. Belo Horizonte, v. 8, n. 9, p. 103 -113.

MONTEIRO, H.S., VASCONCELOS, P.M., FARLEY, K.A., SPIER, C.A., MELLO, C.L. 2014. (U-Th)/He geochronology of goethite and the origin and evolution of cangas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 131, 267- 289. DOI:10.1016/j.gca.2014.01.036.

NALINI JR. H. A. 1993. Análise estrutural descritiva e cinemática do flanco sul e terminação periclinal do Anticlinal de Mariana e adjacências, região sudeste do Quadrilátero Ferrífero. Minas Gerais, Brasil. Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dissertação de Mestrado, 132p.

OLIVEIRA, T. B. O. 1977. Ouro em Minas Gerais. Simpósio sobre o ouro. XVII Semana de Estudos Geológicos da SIGEC. Escola de Minas. Ouro Preto.

OLIVEIRA, A.M.S & BRITO, S. N. A. 1998. Geologia de Engenharia. São Paulo, ABGE (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia).

PACHER, F., RABCEWICZ, L., AND GOLSER, J. 1974. Zum der seitigen Stand der Gebirgsklassifizierung in Stollen-und Tunnelbau, XXII Geomechanics colloquium: Salzburg, p. 51-58. Palmstrom A., 1982. The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. IAEG Congress, New Delhi. p. 221 - 228.

PALMSTROM A., 1982. The volumetric joint count - A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing. IAEG Congress, New Delhi, p. 221 - 228.

QUEIROZ L. C. 2012. Estudos comparativos de áreas com anomalias geofísicas na região da fazenda Mirabela, sul da Bahia. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Monografia, 54p.

ROCHA, M. 1976. Estruturas Subterrâneas - Túneis, Cavernas e Poços. Edição provisória, 102 p., LNEC, Lisboa. (Manuel Rocha).

ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. O. 2010. Quadrilátero Ferrífero - MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados. *Geonomos*, v. 18, n. 1, p. 33 - 37.

SILVA, J.B.; J. T. & RIBEIRO, A. 1990. Structural Outline. South Portuguese Zone. In: Dallmeyer, R.D. & Martinez Garcia, E. (editors), *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*, Springer-Verlag, pp. 348-362.

SOBREIRA, F. G., ARAÚJO, L. G., BONUCCELLI, T. J. 1990. Levantamento de soluções estruturais para a contenção de encostas em Ouro Preto. Relatório técnico. Convênio IPHAN/UFOP, Ouro Preto, MG, 91p.

SOBREIRA, F. G. 1991. Riscos geológicos: definição de pontos críticos em Ouro Preto. *Revista da Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 44, n. 3 e 4, p. 213-223.

TAVARES R. B. 2006. Atividades extrativas minerais e seus corolários na bacia do alto ribeirão do Carmo: da descoberta do ouro aos dias atuais. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado. 103p.1987,

TEIXEIRA, W. & FIGUEIREDO, M.C.H. 1991. An outline of early Proterozoic crustal evolution in the São Francisco craton, Brazil. *Precamb. Res.*, 53:1-22. Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., Keys, D.A. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. Cambridge, 770 p.

TERZAGHI, K. 1946. *Rock defects and loads on tunnel supports*. Cambridge: Harvard University, pp. 17-99.

VALLEJO L., FERRER M., ORTUNO L., OTEO C. 2002. *Ingeniería Geológica*. Madrid, Prentice Hall Pearson Educación, 750p.

VARAJÃO, C.A.C. 1988. *Estudo comparativo das jazidas de bauxita do Quadrilátero Ferrífero, MG*. São Paulo. 232 p. (Dissertação de Mestrado, IG/USP).

VASCONCELOS, D. de. 1974. *História antiga das Minas Gerais*. Belo Horizonte: Editora Itatiaia Ltda,

WALLACE, R. M. 1958. The Moeda Formation. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 2(7), 59-60.

WICKHAM, G.E., TIEDEMANN, H.R. AND SKINNER, E.H. 1972. Support determination based on geologic predictions. In *Proc. North American rapid excav. tunneling conf.*, Chicago, (eds K.S. Lane and L.A. Garfield), 43-64. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.

ZIRAVELLO M., SILVA A. M., MACHADO A. R. A., GONÇALVES, B. S., SAGARDOY, W. 1999. *Brasil 500 anos*. Editora Nova Cultural Ltda. ISBN 85 - 12-00888-9. São Paulo, SP.

Certifico que o aluno GUILHERME AUGUSTO MAGALHÃES GOMES, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO EM ZONAS DE RISCO POTENCIAL NA REGIÃO DE OURO PRETO, MINAS GERAIS, efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.



---

Luiz Henrique Cardoso  
Orientador  
Ouro Preto, 01 de novembro de 2018.