



UFOP
Universidade Federal
de Ouro Preto

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



ESCOLA DE MINAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE DETALHE E CARACTERIZAÇÃO
TIPOLOGICA DO EXTREMO SUL DA MINA ALEGRIAL SUL**

Patrícia Catarina Fernandes Nunes Coelho

MONOGRAFIA nº 406

Ouro Preto, agosto de 2021

**MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE DETALHE E
CARACTERIZAÇÃO TIPOLOGICA DO EXTREMO SUL DA
MINA ALEGRIA SUL**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

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

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Ms. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 406

MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE DETALHE E CARACTERIZAÇÃO TIPOLOGICA DO EXTREMO SUL DA MINA ALEGRIA SUL

Patrícia Catarina Fernandes Nunes Coelho

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Cristiane Castro Gonçalves

Co-Orientador

Rodrigo Ponciano Gomes – Geólogo Samarco Mineração S.A.

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 2020/2.

OURO PRETO

2021

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: Patrícia Catarina Fernandes Nunes Coelho

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C672m Coelho, Patricia Catarina Fernandes Nunes.

Mapeamento geológico de detalhe e caracterização tipológica do extremo sul da Mina Alegria Sul. [manuscrito] / Patricia Catarina Fernandes Nunes Coelho. - 2021.

72 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Cristiane Paula Castro Gonçalves. Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Mapeamento geológico. 2. Quadrilátero Ferrífero (MG). 3. Minério de ferro - Itabirito. I. Gonçalves, Cristiane Paula Castro. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 552.4.051

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

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TÍTULO: MAPEAMENTO GEOLÓGICO DE DETALHE E CARACTERIZAÇÃO
TIPOLOGICA DO EXTREMO SUL DA MINA ALEGRIA SUL.**

AUTOR: Patrícia Catarina Fernandes Nunes Coelho

ORIENTADORA: Cristiane Castro Gonçalves

Aprovado em: 23 de Agosto de 2021

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Cristiane Castro Gonçalves  _____ Degeo/UFOP

Profa. Dra. Alice Fernanda de Oliveira Costa  _____ Degeo/UFOP

Prof. Dr. Lucas Pereira Leão  _____ Degeo/UFOP

Ouro Preto, 23/08/2021

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus, por me acalmar em minhas orações e me ajudar a ter saúde mental e física para passar por tantas dificuldades nos últimos meses, principalmente em tempos de pandemia.

À Prof. Cristiane Castro Gonçalves, por não ter deixado de me orientar neste trabalho quando as circunstâncias não foram favoráveis. Sua força é um exemplo.

À Samarco Mineração S.A. por todo apoio técnico. Aos geólogos Rodrigo Ponciano, Leonardo Bonfioli, Rafael Rodrigues e Fabrício Miranda pelos ensinamentos repassados, discussões, apoio e dicas.

À toda equipe do Planejamento de Mina, principalmente Viviane Borges e Adriano Campos, pela convivência e experiências diárias, me proporcionando um grande crescimento profissional. Aos estagiários amigos e companheiros Bruna, Gabriel e Melaine, pelo companheirismo nessa caminhada.

À minha mãe, Maria Cristina, por todo amor, paciência e apoio. Ao meu pai, pelas conversas e apoio a distância. Ao Pedro e Ana, por não saírem do meu lado nunca.

Aos familiares, principalmente Giovanna, Vinicius e Júlia, e amigos que estiveram em algum momento dando aquela força.

Obrigada a todos!

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ix
SUMÁRIO	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xvi
RESUMO	xviii
INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	1
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 JUSTIFICATIVA.....	3
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS	4
1.5.1 Revisão bibliográfica	4
1.5.2 Trabalho de campo.....	4
1.5.3 Trabalho de escritório	5
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	7
2.1 INTRODUÇÃO.....	7
2.2 ESTRATIGRAFIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	8
2.2.1 Complexos Metamórficos	9
2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas.....	9
2.2.3 Supergrupo Minas	10
2.2.4 Supergrupo Estrada Real.....	11
2.2.5 Rochas Intrusivas	12
2.2.6 Unidades Cenozoicas	12
2.3 METAMORFISMO	13
2.4 ARCABOUÇO ESTRUTURAL E EVOLUÇÃO TECTÔNICA	13
2.5 FORMAÇÃO FERRÍFERA BANDADA.....	15
2.5.1 Itabiritos	16
3 MINÉRIO DE FERRO SAMARCO E O COMPLEXO ALEGRIA	19
3.1 INTRODUÇÃO.....	19
3.2 MINÉRIO DE FERRO.....	20
3.3 GEOLOGIA DO COMPLEXO ALEGRIA	21
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO DO COMPLEXO ALEGRIA	24

3.4.1	Tipologia dos Minérios de Ferro do Complexo Alegria.....	24
3.4.2	Compacidade das Tipologias do Complexo Alegria.	26
3.5	PROCESSO DE PRODUÇÃO DA SAMARCO MINERAÇÃO S.A.	27
4	CARACTERIZAÇÃO TIPOLÓGICA DOS LITOTIPOS AFLORANTES NA CAVA SUL.	30
4.1	INTRODUÇÃO	30
4.2	CARACTERIZAÇÃO TIPOLÓGICA DOS ITABIRITOS DA CAVA SUL	31
5	DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
	Apêndice(s)	
	Anexo(s)	

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1 – A) Imagem de satélite da região central de Minas Gerais que abrange Belo Horizonte a Mariana, com destaque para a localização da área que está localizada a empresa Samarco Mineração S.A. B) Imagem de satélite da região de Minas Gerais que está localizada a empresa Samarco, com destaque para a Mina Alegria Sul. (Imagens retiradas do Google Earth).	2
Figura 2.1 - a) Localização do Quadrilátero Ferrífero no contexto do Cráton São Francisco (Alkmim & Marshak 1998); b) Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo <i>et al.</i> 2019a).	7
Figura 2.2 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo <i>et al.</i> 2019b).....	8
Figura 2.3 – a) Evolução tectônica do sul do Cráton São Francisco em quatro estágios entre 2400 e 2050 Ma (Aguilar <i>et al.</i> 2017, Figura 8, p. 108). b) Articulação das nappes Curral e Ouro Preto (Endo <i>et al.</i> 2005).	15
Figura 3.1 – 1) Mapa geológico do QFe com destaque para a região pertencente à Samarco Mineração (Ferreira 2013). 2) Área da Samarco Mineração subdivida em Complexo Alegria e Germano. (Imagem de satélite do Google Earth, extraídas e modificadas de relatórios internos da empresa Samarco Mineração S.A., 2013).....	19
Figura 3.2 - a) Mapa de distribuição das unidades morfotectônicas do QFe, com destaque para a região do Sinclinal Alegria, onde se encontra a área de estudo. (Endo <i>et al.</i> 2019a). b) Recorte do Mapa Geológico do QFe para exibir com maiores detalhes a área de estudo (extraído de Endo <i>et al.</i> 2019a).	23
Figura 3.3 – Furo de sondagem de um IG com feições de estalactites (foto autoral 2020). ...	25
Figura 3.4 - Foto de furos de Sondagem evidenciando as diferentes compacidades. (Rodrigues, 2016).....	26
Figura 3.5 – Fluxograma ilustrativo do processo produtivo integrado da Samarco Mineração S.A. (extraído da apresentação institucional aos acionistas da empresa).....	27
Figura 3.6 - Fluxograma do Concentrador 3 da Samarco Mineração S.A. (Rodrigues, 2016)	28

Figura 4.1- Mapa tipológico de Alegria Sul com destaque para a área de mapeamento, o extremo sul da Cava Sul, quem contém as tipolias IG (Itabirito Goethítico), IM (Itabirito Martítico), IME (Itabirito Martítico-Especularítico) e IAM (Itabirito Anfibolítico-Martítico) (Retirado de relatórios internos da empresa Samarco Mineração S.A.)	30
Figura 4.2 - Mapa Geológico Tipológico de Detalhe do Extremo Sul da Mina Alegria Sul (Cava Sul).	31
Figura 4.3 – Foto com orientação W-E de afloramento de Itabirito Martítico (IM) apresentando forte estrutura bandada e coloração cinza escuro fosco.....	32
Figura 4.4 – A) Foto tirada em campo do afloramento de Itabirito Martítico-Goethítico (IMG) que mostra a coloração castanha da goethita. B) Foto tirada em campo do afloramento de Itabirito Martítico-Especularítico (IME) com estrutura dobrada.	32
Figura 4.5 - Foto tirada em campo do afloramento de Itabirito Especularítico-Martítico (IEM) com forte marcação da foliação e dos planos de interseção, que formam “chapinhas”.	33
Figura 4.6 - Foto tirada em campo do afloramento de Itabirito Goethítico-Martítico (IGM) de coloração castanho amarronzado.	34
Figura 4.7 - Amostras de afloramento de Itabirito Goethítico com textura botrioidal.	35
Figura 4.8 - Foto de afloramento de Itabirito Anfibolítico-Martítico (IAM) de coloração marrom forte e material friável.	35
Figura 4.9 - Foto de afloramento com presença de rocha metabásica (destacada no retângulo vermelho) na Cava Sul, sendo multicolorida e pulverulenta com fácil desagregação ao toque.	36
Figura 4.10 - Foto tirada da porção leste da área de mapeamento da Cava Sul, em que é observada a predominância do cinza amarronzado escuro característico dos Itabiritos Martíticos e manchas de cinza azulado que representam a presença de Itabiritos Especularíticos.	37
Figura 4.11 - Foto tirada com vista para norte do extremo oeste da área de mapeamento da Cava Sul, possibilitando observar o antifforme formado na presença de materiais mais pulverulentos de IM, IME e CHERT.	38
Figura 4.12 - Estereograma das medidas geológicas (foliações) feitas na Cava Sul. (<i>Orient</i>)	38

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Resultado Químico da Amostra de Rocha Metabásica enviada pelo laboratório interno da Samarco Mineração S.A.	36
--	----

Resumo

Este trabalho de mapeamento geológico de detalhe, em escala 1:10.000, foi realizado no extremo sul da Mina Alegria Sul da Samarco. O local é identificado como “Cava Sul” por sua utilização como cava para depósito do rejeito resultante do processo produtivo da Samarco. Embora a rocha mais comumente observada na área seja o itabirito, há uma sub-classificação em tipologias de acordo com as concentrações de hematita especular, hematita porosa (martita), goethita e magnetita e, ainda, a ocorrência de corpos intrusivos metabásicos. Com o trabalho de campo atualizou-se o banco de dados com maior variedade de tipologias de itabirito, na escala de interesse. Como suporte para definição das variações tipológicas e entendimento do padrão das estruturas, foi utilizado o banco de dados da empresa que contém a descrição de furos de sondagem de até 600m de profundidade. A relação entre o mapa produzido e o banco de dados gerado, proporciona melhor entendimento geológico da área da Cava Sul, o que é fundamental para sua melhor utilização, seja tendo-se como foco questões de segurança, seja o processo produtivo da Samarco, desde a caracterização geológica até o resultado do concentrado.

Palavras chave: Quadrilátero Ferrífero (QFe), Complexo Alegria, Sinclinal Alegria, Mina Alegria Sul, Cava Sul, itabirito, minério de ferro.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O presente trabalho de conclusão de curso apresenta o mapeamento geológico de detalhe, realizado em escala 1:10.000, da área localizada no extremo sul da Mina de Alegria Sul do Complexo Alegria, pertencente à Samarco Mineração S.A. O local é identificado como “Cava Sul” devido à sua utilização como cava para depósito de rejeito resultante do processo produtivo da empresa.

Embora a rocha mais comumente observada na área seja o itabirito, há uma subclassificação em tipologias, de acordo com as concentrações de hematita especular, hematita porosa (martita), goethita e magnetita e, ainda, a ocorrência de corpos metabásicos intrusivos. A partir da coleta de dados em campo, identificaram-se as variações tipológicas do itabirito, representadas em mapa, bem como estruturas geológicas e suas orientações principais.

Diante do cenário pandêmico iniciado em março de 2020 que dificultou o trabalho de campo durante a realização do mapeamento, fez-se necessária a utilização do banco de dados da empresa. Utilizou-se da descrição de furos de sondagem de até 600 metros de profundidade como suporte para a definição das variações tipológicas e entendimento dos padrões de estruturas geológicas.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A Cava Sul está localizada no extremo sul da Mina de Alegria Sul do Complexo Alegria na porção leste do Quadrilátero Ferrífero - MG. A área pertence às reservas da Samarco Mineação S.A. e se encontra na Unidade Germano, situada no norte do município de Mariana - MG. Geograficamente, a área está compreendida a norte do distrito de Antônio Pereira e a Sul/Oeste da Serra do Caraça, mais precisamente sendo bordejada no extremo leste pelo Rio Piracicaba e a norte pelas demais instalações e minas do Complexo Alegria pertencentes à Samarco Mineração S.A. (Figura 1.1a,b).

A região está a aproximadamente 24,5km da cidade de Mariana e 13km do distrito de Antônio Pereira e o acesso é realizado a partir da rodovia MG-129 (Rodovia Samarco-Mariana de acordo com o DNITGeo), no sentido Mariana - Catas Altas. Na altura do marco do km 113 aproximadamente da MG-129, encontra-se a rotatória que dá acesso à portaria de entrada da Samarco, onde é possível se direcionar à Mina Alegria Sul.

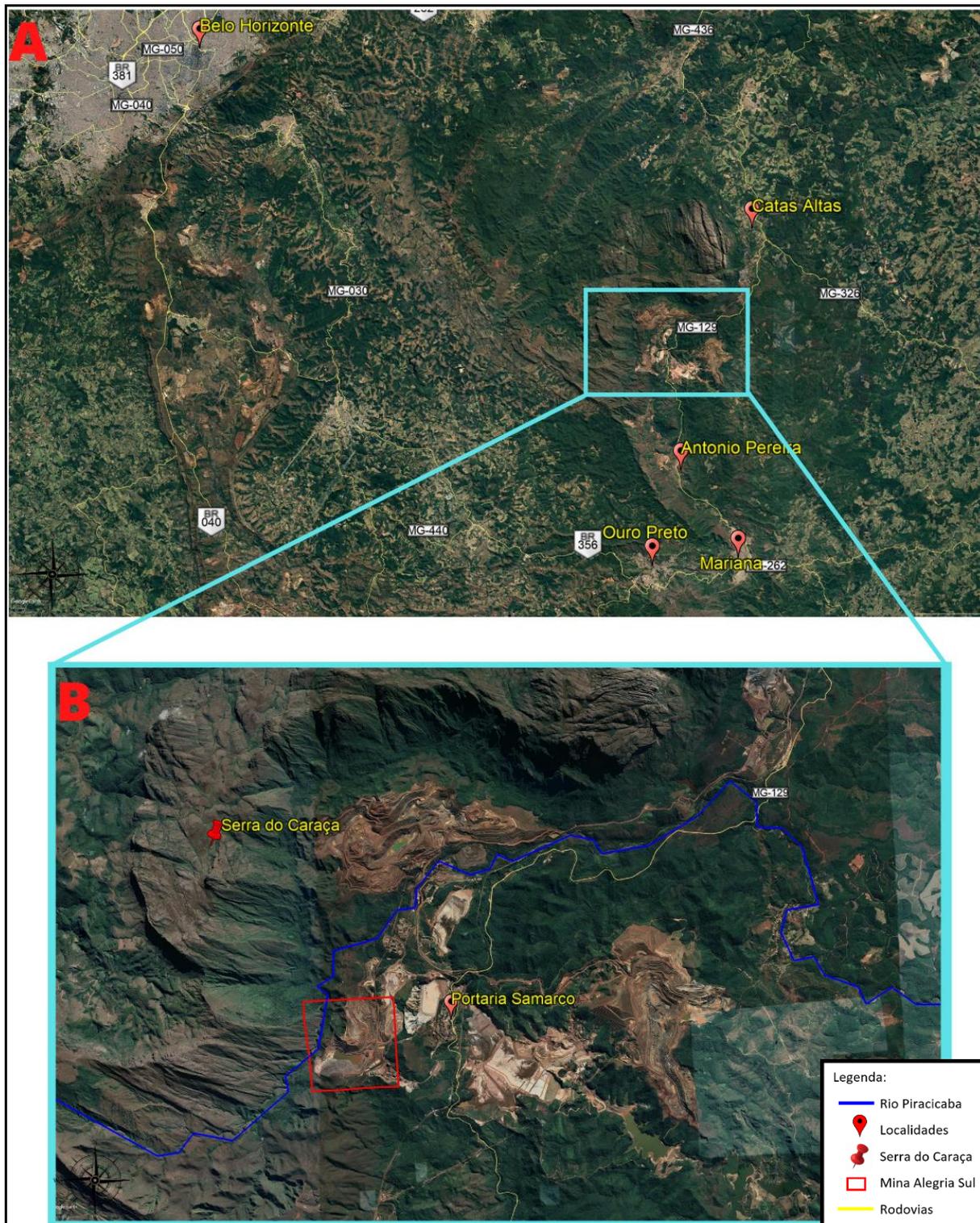


Figura 1.1 – A) Imagem de satélite da região central de Minas Gerais que abrange Belo Horizonte a Mariana, com destaque para a localização da área que está localizada a empresa Samarco Mineração S.A. B) Imagem de satélite da região de Minas Gerais que está localizada a empresa Samarco, com destaque para a Mina Alegria Sul. (Imagens retiradas do Google Earth).

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral a confecção de um mapa geológico de detalhe em escala 1:10.000 do extremo sul da Mina de Alegria Sul da Samarco, a Cava Sul. Propõe-se nesse sentido os seguintes objetivos específicos:

- ⇒ levantamento de dados geológicos em campo;
- ⇒ amostragem;
- ⇒ caracterização petrográfica e tipológica;
- ⇒ melhoramento do banco de dados da empresa e refinamento do mapa existente, baseado em dados de furo de sondagem.

A relação ente o mapa produzido e o banco de dados gerado, que envolve caracterização petrográfica, tipológica, química e estrutural, visa melhor entendimento geológico da área da Cava Sul, o que é fundamental para sua melhor utilização e aproveitamento, seja tendo-se como foco questões de segurança, seja no processo produtivo da Samarco, desde a caracterização geológica até o resultado do concentrado.

1.4 JUSTIFICATIVA

A área de mapeamento escolhida para a realização deste trabalho, Cava Sul, está inserida em uma região de grande interesse econômico em Minas Gerais, o Quadrilátero Ferrífero, estando localizada em sua porção leste, área de intensa atividade mineradora e, portanto, com geração de grande volume de rejeito. Nesse contexto, diante do atual cenário legislativo brasileiro, que, de acordo com o Art. 3º da Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 (Brasil 2020), proíbe a construção ou alteamento de barragem de mineração pelo método a montante, que é a metodologia construtiva de barragem em que os diques de contenção se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançado e depositado, a empresa optou por depositar parte do rejeito gerado pelo seu processo produtivo na Cava Sul. Essa seria a solução para dar continuidade às suas atividades operacionais.

Contudo, embora exista uma densa literatura a respeito de todo o Quadrilátero Ferrífero, dados geológicos de detalhe da região da Cava Sul são escassos. Apesar dos levantamentos realizados pela empresa Samarco Mineração S.A., não há ainda um mapa geológico de detalhe que forneça um amplo banco de dados sobre a Cava Sul. Nesse sentido, o trabalho de obtenção e arquivamento de dados sobre a área, que permitirá o refinamento e detalhamento do banco de dados da empresa, se justifica, uma vez que tal levantamento se tornará impossível, com a designação do local para cava de rejeito, o tornando inacessível. O conhecimento detalhado da mina permite determinar as variações tipológicas presentes em escala de detalhe, o que não é possível somente a partir da caracterização dos furos de

sondagem existentes. A malha de sondagem é mais espaçada, o que leva a maiores inferências acerca de estruturas e contatos geológicos. Tem-se, portanto, a possibilidade de adensamento do banco de dados existente e, de modo geral, melhor entendimento acerca dos aspectos geológicos da área.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em três etapas, conforme descrito nos itens a seguir.

1.5.1 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica teve como foco trabalhos que versam sobre aspectos geológicos do Quadrilátero Ferrífero (QFe), o Complexo Alegria e o processo produtivo da Samarco, com ênfase na etapa sob responsabilidade da equipe de geologia. Dos trabalhos consultados sobre a região do QFe, do Complexo Alegria e sobre o minério de ferro da área de estudo, foram usados, principalmente, os de Dorr (1969), Maxwell (1972), James (1983), Chemale Jr. *et al.* (1991, 1994), Endo & Chemale Jr. (1992), Alkmim & Marshak (1998), Costa *et al.* (1998), Veríssimo (1999), Rosière & Chemale Jr. (2000), Rosière *et al.* (2001), Rocha (2008) e Endo *et al.* (2019a,b). Além disso, o banco de dados da empresa possui diversos relatórios, apresentações e trabalhos que foram consultados, dando destaque ao trabalho de Rodrigues (2016).

1.5.2 Trabalho de campo

A coleta de dados foi realizada através de atividade de campo na área da Cava Sul, sob supervisão do geólogo Rodrigo Ponciano. Realizou-se um caminhamento ao longo dos taludes, descrevendo-se pontos com um distanciamento de aproximadamente 10 metros, mas que serão apresentados em escala de 1:10.000. Ajustes de espaçamento entre os pontos foram necessários com a função de destacar a alternância das características da rocha e/ou presença de estruturas geológicas marcantes. Foram coletadas amostras para descrição petrográfica e análise química em laboratório, nos pontos em que as rochas estavam muito alteradas e a descrição macroscópica era dificultada.

As tipologias presentes foram definidas por caracterização macroscópica. As estruturas geológicas foram medidas com o uso de uma bússola Clar-Freiberger utilizando a notação do método Clar, e as coordenadas UTM registradas por GPS. Para o tratamento das direções medidas em campo e criação do estereograma apresentado, foi utilizado o programa *Orient*.

Com o propósito de ter as informações obtidas em campo de forma organizada e padronizada, utilizou-se uma planilha criada especificamente para esse trabalho, com capacidade para 10 pontos em cada folha impressa (Apêndice 1).

1.5.3 Trabalho de escritório

A partir das informações coletadas no trabalho de campo, utilizou-se o *software* ArcGis versão 10.8 para confecção do mapa e armazenamento dos dados coletados. Primeiramente, fez-se necessária a migração dos dados da planilha de campo para a planilha Excel vinculada ao arquivo de criação do mapa no ArcGis. As únicas informações de campo alteradas foram as coordenadas geradas pelo GPS, para as quais realizou-se a conversão de UTM para coordenada local, denominada STEP, de modo que o projeto tivesse um georreferenciamento fiel e correto.

O processo de tratamento de dados no ArcGis teve como foco a confecção do mapa em escala 1:10.000, dando destaque às principais estruturas e sendo o mais fiel possível aos contatos entre as tipologias distintas. Para tratar as diferentes medidas estruturais feitas em campo, foi utilizado o programa *Orient*.

A partir do suporte do Laboratório de Controle de Processos da empresa, foi possível obter a análise química de uma amostra de rocha coletada durante o trabalho de campo. A análise química realizada utilizou os métodos de dicromatometria para o Fe e XRF (fluorescência de raio-x) para os demais elementos.

2.1 INTRODUÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QFe) abrange uma área de aproximadamente 7.000 km² situada na porção central do estado de Minas Gerais, com abundante ocorrência de formação ferrífera (Dorr 1969). Localizado no extremo sul do Cráton São Francisco (CSF) (Figura 2.1 a,b), o QFe constitui uma área de rochas Arqueanas a Paleoproterozoicas que registra a complexa superposição de eventos deformacionais do Paleoproterozoico e possivelmente Neoproterozoico (Almeida 1977), e é circundado por cinturões orogênicos brasileiros com vergência para seu interior (Alkmim & Marshak 1998).

O CSF é uma grande unidade tectônica circundada por faixas de dobramento desenvolvidas durante o evento orogênico Brasileiro, sendo a Faixa Araçuaí a leste e a Faixa Brasília a oeste (Almeida 1977), permanecendo estável após o evento Brasileiro (Alkmim & Marshak 1998). O extremo sul da Mina de Alegria Sul encontra-se no contexto geológico da borda leste do QFe, em área pertencente à empresa Samarco Mineração S.A. e está localizado na estrutura geológica Sinclinal Alegria.

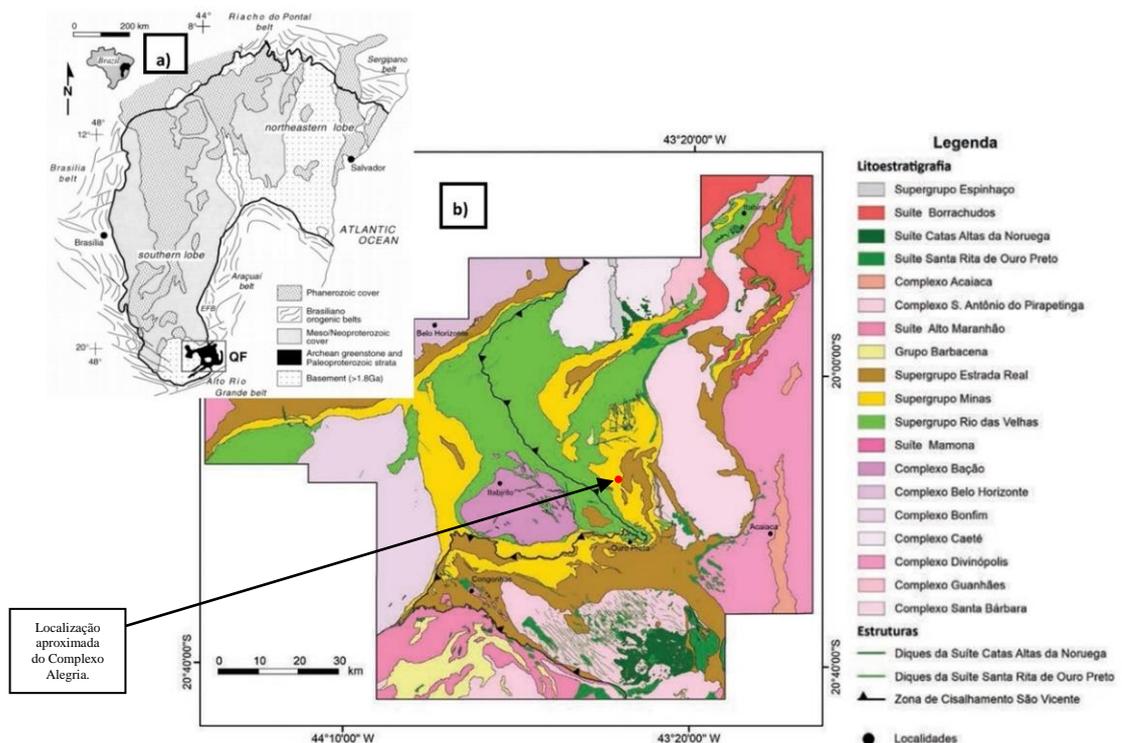


Figura 2.1 - a) Localização do Quadrilátero Ferrífero no contexto do Cráton São Francisco (Alkmim & Marshak 1998); b) Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2019a).

2.2 ESTRATIGRAFIA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Abaixo é apresentada a versão mais recente da coluna estratigráfica do QFe (Figura 2.2) (Endo *et al.* 2019b) e, em seguida, a descrição de suas unidades rochosas.

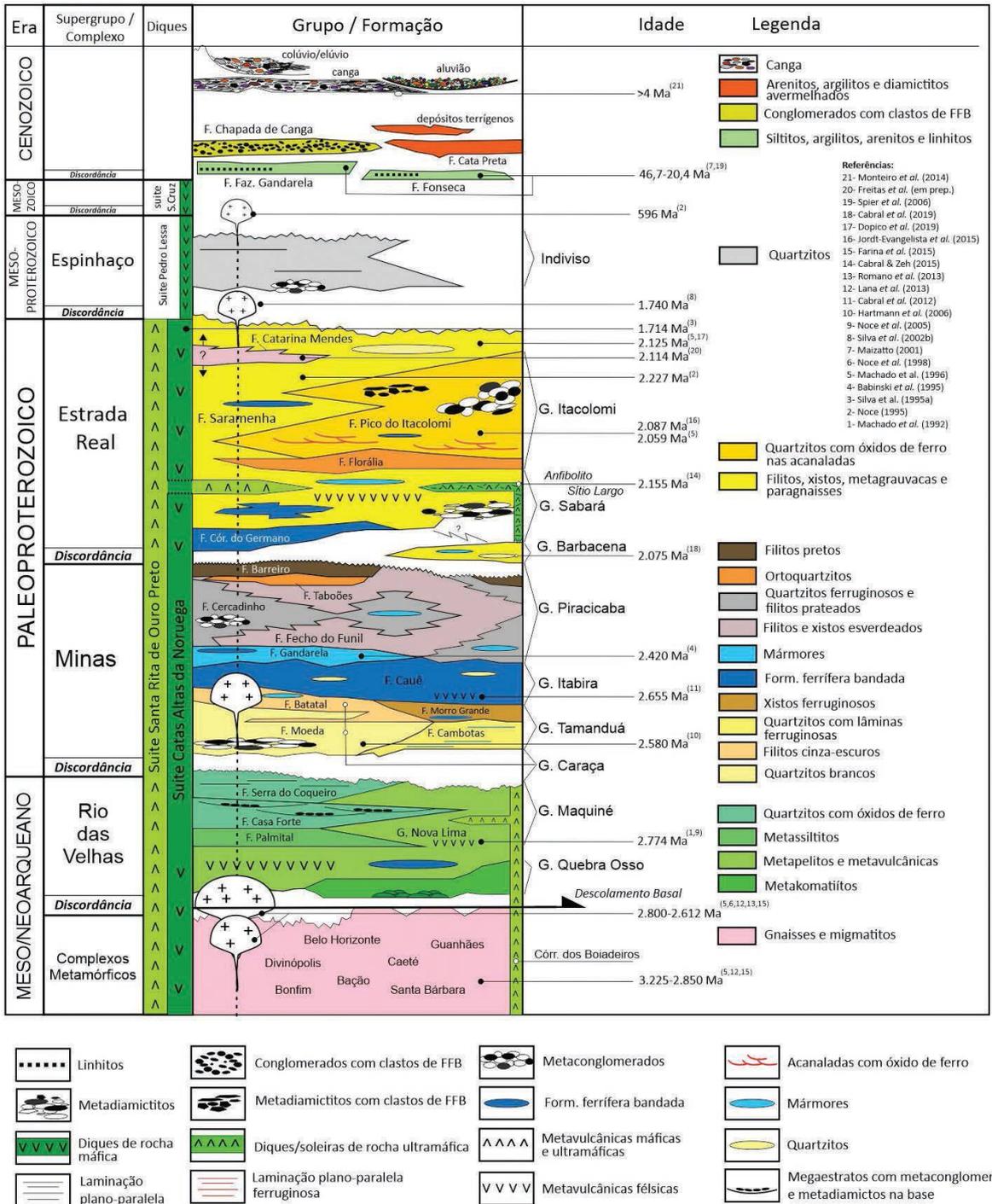


Figura 2.2 – Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Endo *et al.* 2019b).

2.2.1 Complexos Metamórficos

Os Complexos Metamórficos que constituem o embasamento cristalino da região são terrenos de idade Arqueana e estruturados em forma dômica, discriminados como Complexo Bonfim a oeste (Machado & Carneiro 1992), Complexo Belo Horizonte a noroeste (Machado & Noce 1993), Complexo Caeté ao norte, Complexo Santa Bárbara a leste e Complexo Bação na região central (Figura 2.2) (Machado *et al.* 1992). Estes complexos são formados por rochas de composição tonalítica a granítica (Tonalito-Trondhjemitó-Granito) com intrusões máficas a ultramáficas e bordas cisalhadas (Evangelista & Muller 1986). Apresentam idade entre 3.2 a 2.7 Ga que compreendem três eventos tectono-magmáticos (Santa Bárbara, Rio das Velhas I e Rio das Velhas II) (Lana *et al.* 2013).

2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas (SGRV) é uma sequência de rochas metavulcânicas e metassedimentares de idade Arqueana do tipo *greenstone belt* (Dorr 1969). De acordo com Zuchetti & Baltazar (1996), não é possível elaborar um empilhamento estratigráfico clássico para o SGRV devido a processos deformacionais, alto grau de intemperismo, elevada extensão da bacia de deposição, que resultaram na repetição e/ou omissão de unidades geológicas e dificuldade na observação de contatos e intercalações.

Como apresentado por Endo *et al.* (2019b) (Figura 2.2), esta unidade é composta, da base para o topo, por: Grupo Quebra Osso, constituído por metakomatiólitos, metabasaltos toleíticos e metariólitos (Schorscher 1978); Grupo Nova Lima, que compreende rochas metassedimentares de composição carbonática, siliciclástica e formações ferríferas bandadas do tipo Algoma (Dorr 1969); e o Grupo Maquiné, composto por níveis metaconglomeráticos na base, quartzitos maciços e sericíticos, sericita-quartzo xistos, metaconglomerados oligomíticos e polimíticos e filitos, que ocorrem, em discordância erosiva, sobreposto ao Grupo Nova Lima (Maxwell 1972).

O Grupo Maquiné ainda é subdividido em Formação Palmital na base, composta por quartzitos sericíticos e filitos quartzosos, sendo sobreposta por rochas mais quartzosas e menos sericíticas da Formação Casa Forte (Dorr 1969). Posteriormente, proposto por Angeli (2015), há uma faixa de quartzitos laminados, a Formação Serra do Coqueiro, que ocorre na serra do Batatal e continua no flanco ocidental da serra do Caraça em discordância angular com os quartzitos da Formação Moeda, sobreposta.

2.2.3 Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas, uma sequência metassedimentar de idade paleoproterozoica, é disposto em discordância estratigráfica e estrutural sobre o Supergrupo Rio das Velhas por rochas que constituem uma sucessão continental-marinha de pelo menos 3.424 metros de espessura de sedimentos (Dorr 1969), cuja estratigrafia é composta por xistos, quartzitos, dolomitos e formações ferríferas (Derby 1906). Seu desenvolvimento se deu durante a fase extensional do Tranzamazônico (Alkmim & Marshak 1998) e representa um dos estágios de evolução de uma bacia de margem passiva (Alkmim & Martins Neto 2012).

Dorr (1969) propõe uma coluna estratigráfica para a região do QFe subdividindo o Supergrupo Minas em quatro grupos: dois inferiores formados por formações clásticas, separados por uma provável discordância erosional; um grupo gradacionalmente sobreposto, composto por duas formações de origem predominantemente química ou bioquímica; e um grupo superior composto de cinco formações clásticas, sendo a superior bastante diferente no ambiente geral das outras formações desta unidade. Estes grupos são, respectivamente, Grupo Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba.

Posteriormente, uma nova subdivisão das unidades paleoproterozoicas do QFe é proposta por Endo *et al.* (2019a), versão adotada neste trabalho, em que, diferente de Dorr (1969), a formação superior do Grupo Piracicaba, Formação Sabará, é elevada a Grupo Sabará (Renger *et al.* 1994) e passa a pertencer ao Supergrupo Estrada Real.

2.2.3.1 Grupo Tamanduá

O Grupo Tamanduá é constituído por quartzitos, xistos quartzosos e argilosos, e itabiritos filíticos e dolomíticos (Simmons & Maxwell 1961). Segundo Dorr (1969), este grupo compõe um pacote rochoso com espessura de 1.037 metros e é subdividido em duas formações, a Formação Cambotas na base e a Formação Morro Grande nomeada por Endo *et al.* (2014).

A Formação Cambotas é composta quartzitos e quartzitos com lâminas ferruginosas, enquanto a Formação Morro Grande compreende xistos ferruginosos com camadas de formação ferrífera (Endo *et al.* 2019b).

2.2.3.2 Grupo Caraça

O Grupo Caraça (Dorr *et al.* 1957) inclui as rochas clásticas que estão em contato discordante sobre o Supergrupo Rio das Velhas e abaixo dos sedimentos químicos do Grupo Itabira, sendo subdividido por Dorr (1969) em Formação Moeda, na base, e Formação Batatal, no topo.

A Formação Moeda é predominantemente de composição quartzítica, incluindo filitos, metaconglomerados e quartzitos sericiticos, e a Formação Batatal é constituída de filitos, filitos sericiticos, formação ferrífera e níveis subordinados de metacherts (Dorr 1969).

2.2.3.3 Grupo Itabira

O Grupo Itabira, predominantemente composto por sedimentos químicos, é a unidade mais importante da região do ponto de vista econômico devido às suas grandes reservas de minério de ferro. É subdividido em duas formações intergradacionais: a Formação Cauê na base, representada pelas formações ferríferas, e a Formação Gandarela no topo, em grande parte composta por rochas carbonáticas de vários tipos (Dorr 1969).

A Formação Cauê é composta por itabiritos, itabiritos dolomíticos, itabiritos anfibolíticos, e pequenas lentes de filitos e mármore, enquanto a Formação Gandarela é formada por dolomitos, filitos dolomíticos, dolomitos ferruginosos, mármore e finas camadas de itabirito (Dorr 1969).

Segundo Spier *et al.* (2007), as rochas da Formação Cauê foram submetidas a pelo menos dois eventos tectônicos - intrusão de rochas graníticas e máficas e metamorfismo para fácies xisto verde - resultando na transformação das formações ferríferas bandadas nos itabiritos que constituem os depósitos de minério de ferro paleoproterozoicos do QFe. Trata-se de depósitos de origem marinha em margens passivas, definido por Gross (1980) como depósitos do tipo Lago Superior.

2.2.3.4 Grupo Piracicaba

O Grupo Piracicaba apresenta sedimentação siliciclástica subdividida nas formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro, compostas essencialmente por quartzitos, filitos carbonáceos e ferruginosos, dolomitos e mármore (Dorr 1969).

2.2.4 Supergrupo Estrada Real

O Supergrupo Estrada Real é formado pelos grupos Sabará e Itacolomi (Teixeira da Costa 1961). Ocorre por meio de discordância erosiva em contato com o Grupo Piracicaba e representa uma sequência do tipo *flysch* e molassa sin-tectônicas (Dorr 1969).

O Grupo Sabará é subdividido em Formação Saramenha, caracterizada por intercalações de metadiamicititos, metapelitos, metarritmitos, metarenitos, xistos e filitos negros (Almeida *et al.* 2005), Formação Córrego do Germano, composta por formações ferríferas e quartzitos ferruginosos (Endo *et*

al. 2019a,b), e Formação Catarina Mendes, constituída por biotita-quartzo xistos, quartzitos e filitos (Freitas *et al.* 2019). Correlativo ao Grupo Sabará, tem-se as unidades do Grupo Barbacena (Figura 2.2), indiviso, que ocorrem na porção meridional do QFe (Cabral *et al.* 2019).

O Grupo Itacolomi é composto pelos ortoquartzitos e níveis de seixos de formação ferrífera da Formação Florália (Endo *et al.* 2019) e a Formação Pico do Itacolomi, descrita por Dorr (1969) como Grupo Itacolomi, que é constituída por quartzitos, metaconglomerados, filitos, quartzitos ferruginosos e formações ferríferas.

2.2.5 Rochas Intrusivas

Rochas intrusivas se manifestam em todo o Quadrilátero Ferrífero e são consideradas por Alkmim & Marshak (1998) como rochas pós-Minas. Segundo Silva *et al.* (1995), há três eventos de magmatismo básico com características próprias que afetaram a região: o mais antigo tem idade de 1.7 a 1.5 Ga, gerou diques com direção N-S, que ainda exibem textura ígnea preservada, relacionando-se a abertura da bacia do Espinhaço; posteriormente, há os diques com idade de aproximadamente 906 Ma e direções NW e NE, relacionados aos primeiros estágios do evento Panafricano-Brasiliano; e as intrusões mais recentes com idade de 120 Ma, que se apresentam em direções variáveis e se relacionam à fragmentação do Supercontinente Gondwana.

2.2.6 Unidades Cenozoicas

O QFe apresenta diversos depósitos sedimentares de idade cenozoica em seu território, sendo alguns definidos como: Formação Fonseca, que são depósitos fluviais contendo arenitos, pelitos, linhitos e conglomerados (Gorceix 1884, Dorr 1969); Formação Fazenda do Gandarela, composta por arenitos, pelitos e linhitos (Gorceix 1884, Endo *et al.* 2019a) e fácies sedimentares associadas a depósitos lacustres e de fluxos de detritos (Maizatto 2001); Formação Chapada de Canga, representada por depósitos de leques aluviais compostos por conglomerados com seixos de itabirito (Sant'anna 1994); Formação Cata Preta, constituída por arenitos avermelhados, pelitos, conglomerados e diamictitos (Castro *et al.* 1998a,b); e Formação Gongo Soco, que consiste em sedimentos formados por fluxos de detritos associados a leques aluviais, como diamictitos, itabiritos e arenitos fragmentados (Maizatto 1993, Endo *et al.* 2019a).

Além das formações citadas, ocorrem os materiais arredondados e cascalhosos de depósitos aluvionares, coluvionares e eluvionares e também as cangas, que são originadas principalmente por intemperismo da formação ferrífera.

2.3 METAMORFISMO

O QFe registra diversos eventos deformacionais, sendo a orogenia Transamazônica (2,1 – 2,0 Ga), superposta pela orogenia Brasiliana (0,8 – 0,6 Ga), a principal responsável por sua atual estruturação regional (Chemale Jr. *et al.* 1994). Associado a essa evolução tectônica, um zoneamento metamórfico caracterizado pelo aumento da temperatura de oeste para leste (Herz 1978, Rosière *et al.* 2001, Gonçalves & Lagoeiro 2013) é acompanhado por um gradiente de deformação que segundo Rosière *et al.* (2001) permite caracterizar um domínio ocidental de baixa deformação, e um domínio oriental de alta deformação. O embasamento, representado pelos complexos metamórficos, os terrenos *greenstone belts*, além das intrusões graníticas, registra evento de idade U/Pb de 2,7 Ga, que atingiu condições metamórficas no limite de fácies anfíbolito-granulito (Gomes 1986), associado à orogênese Rio das Velhas (Carneiro 1992). Segundo Herz (1978), no entorno dos complexos metamórficos do QFe, observa-se um zoneamento metamórfico que registra fácies xisto-verde, enquanto nos terrenos granito-gnáissicos registram metamorfismo de alto grau, fácies anfíbolito a granulito, sendo retrometamorfisados para fácies xisto-verde.

Recentemente, baseado em idades metamórficas disponíveis nos estudos que definem as idades dos eventos magmáticos no QFe, Aguilar *et al.* (2017) determinaram quatro fases de metamorfismo para a região. Primeiramente, durante o Paleoproterozoico, duas fases atingiram as sequências vulcanossedimentares: a primeira, entre 2.250 e 2.190 Ma, atingiu fácies anfíbolito de baixo a médio grau e a segunda, entre 2.131 e 2.100 Ma, atingiu fácies xisto-verde para anfíbolito inferior. Ainda no Paleoproterozoico, entre 2.098 e 1.989 Ma, a terceira fase afetou os ortognaisses arqueanos e *greenstone belts* e atingiu fácies anfíbolito. Por fim, a quarta fase que afetou as unidades do QFe, entre 630 e 490 Ma, está associada ao evento Brasileiro Neoproterozoico e atingiu metamorfismo de fácies xisto-verde.

2.4 ARCABOUÇO ESTRUTURAL E EVOLUÇÃO TECTÔNICA

Diante da complexidade e peculiaridade relacionadas à evolução estrutural do QFe, com superposição de eventos deformacionais, serão apresentadas a seguir as interpretações dos principais trabalhos que desenvolveram modelos geotectônico para a região.

Dorr (1969) descreve três episódios de deformação no QFe: o primeiro foi responsável pela deformação das rochas do Supergrupo Rio das Velhas e nomeado como Pré-Minas; o segundo, Pós-Minas e Pré-Itacolomi, deformou as unidades do Supergrupo Minas gerando o arqueamento e soergimento de suas estruturas; o terceiro e último, Pós-Itacolomi, caracterizou-se como responsável

pela atual morfologia do QFe devido à alta intensidade de deformação compressiva, afetando todas as sequências pré-existentes.

Segundo Ladeira & Viveiros (1984), a estruturação do QFe é sintetizada em seis eventos. O primeiro evento, limitado às rochas do Supergrupo Rio das Velhas, gerou dobras vergentes de SW para NE. Do segundo ao quarto evento, foram registradas zonas de cisalhamento e dobramentos de orientação E-W com vergência para norte. O quinto evento foi descrito como compressional, gerando dobras e falhas de orientação N-S e que, posteriormente, foram soerguidas pelo sexto evento, de característica rúptil, registrado por fraturas com elevado ângulo de mergulho.

Para Chemale Jr *et al.* (1994), a evolução geológica da região é definida em duas etapas principais. A primeira, durante o evento extensional transamazônico, resultou no surgimento dos complexos metamórficos e formação dos sinclinais regionais. E a segunda, durante o Brasiliano, trata-se de episódios de compressão que geraram um sistema de dobramentos e empurrões.

Endo (1997) apresenta um modelo de evolução tectônica com dez fases deformacionais ao longo da superposição dos eventos Jequié, Transamazônico e Brasiliano. A primeira fase, Pré-Rio das Velhas (2.920 Ma), foi caracterizada por deformação dúctil sinistral N-S e foi sucedida, durante a orogênese Jequié (2.780 - 2.555 Ma), por três fases transpressionais distintas, Rio das Velhas I, II e III. Posteriormente, no intervalo de 2.250 a 1.900 Ma durante a orogênese Transamazônica, ocorreram duas fases compressionais e duas fases extensionais. Por fim, no evento Brasiliano, duas fases de regime transpressional envolveram a região do QFe.

Diferentemente do autor supracitado, Alkmim & Marshak (1998) propõem que o QFe apresenta uma arquitetura em “domos e quilhas”, resultante de dois eventos deformacionais durante a orogênese Transamazônica (Figura 2.3a). O primeiro evento, de caráter compressional, é resultado do fechamento de uma bacia de margem passiva responsável pela geração de dobras e falhas de empurrão com vergência para NW. Logo após, o segundo evento, de caráter extensional, foi marcado pelo colapso das sequências supracrustais, sendo responsável pelo soerguimento dos complexos arqueanos sob a forma de domos e a formação de grandes sinclinais, circundando os domos, sob a forma de calhas (quilhas).

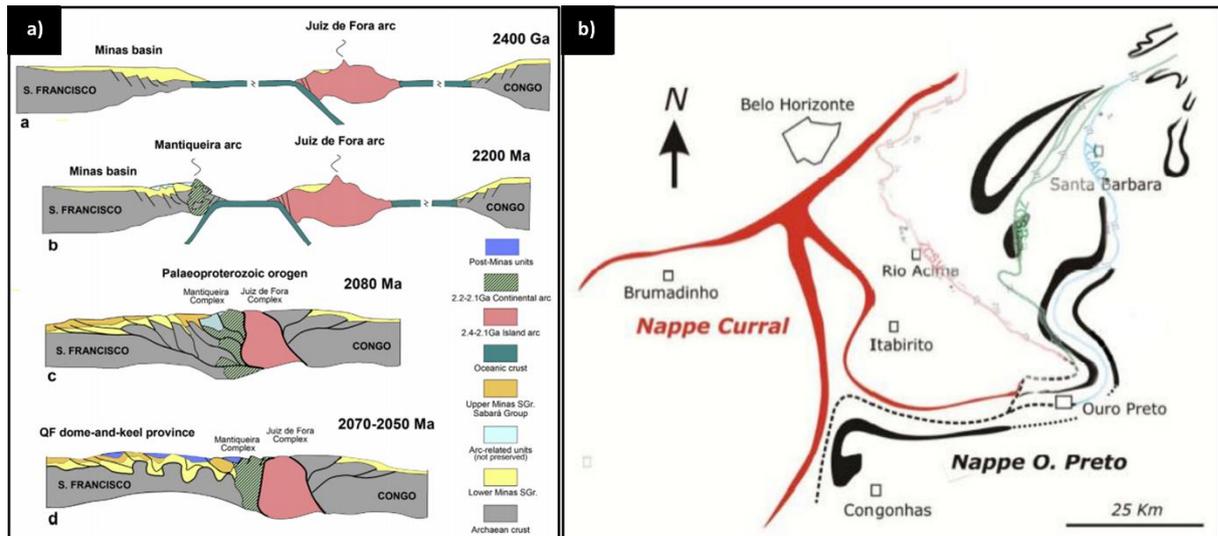


Figura 2.3 – a) Evolução tectônica do sul do Cráton São Francisco em quatro estágios entre 2400 e 2050 Ma (Aguilar *et al.* 2017). b) Articulação das nappes Curral e Ouro Preto (Endo *et al.* 2005).

A mais recente contraposição à hipótese anterior é apresentada por Endo *et al.* (2005, 2019b) e Almeida (2004). Esses autores sugerem que o arcabouço estrutural do QFe seja resultado da superposição de duas *nappes* deformadas durante três gerações de eventos tectônicos atuantes na região (Figura 2.3b). A primeira geração originou a *Nappe Curral*, uma megadobra alóctone vergente para norte. A segunda geração originou a *Nappe Ouro Preto*, com vergência para SW e sobreposta à *Nappe Curral*. E a terceira geração redobrou e amplificou as estruturas anteriores.

2.5 FORMAÇÃO FERRÍFERA BANDADA

Definidas por James (1983), as formações ferríferas bandadas, ou *BIF's (Banded Iron Formation)*, são rochas finamente bandadas ou laminadas, que alternam entre camadas de chert (ou seu equivalente metamórfico) e camadas compostas predominantemente por minerais de Fe, essencialmente a hematita, magnetita e silicatos ou carbonatos, e a goethita que é encontrada nas rochas intemperizadas.

As formações ferríferas bandadas são classificadas como do tipo Algoma ou Lago Superior com base nas associações mineralógicas, ambiente de deposição e idades, que datam desde o Arqueano até o Neoproterozoico (Gross 1965, James 1983). Formações ferríferas do tipo Algoma são associadas às rochas vulcânicas e aos *greenstone belts*, enquanto as formações ferríferas do tipo Lago Superior, estão relacionadas às rochas sedimentares de plataformas continentais.

No QFe, o itabirito (Eschwege 1822) é o termo designado às formações ferríferas bandadas metamórficas, deformadas e oxidadas (Rosière & Chemale Jr. 2000). Dorr (1964) classificou os itabiritos da Formação Cauê como de fácies óxido e os considerou a rocha mãe de todos os minérios

de ferro em Minas Gerais (Brasil). Ao contrário da maioria das formações ferríferas que possuem uma grande variação mineralógica com presença de sílica, carbonatos e silicatos de ferro (Simonson 1987), os itabiritos presentes no QFe têm como principal óxido de ferro a hematita, podendo estar presente como martita, hematita granoblástica e especularita, originadas em gerações distintas e claramente relacionadas com o grau de metamorfismo e deformação (Rosière *et al.* 2001). Geralmente, a magnetita ocorre como kenomagnetita (Kullerud *et al.* 1969) individualmente na forma de cristais idiomórficos a hipidiomórficos ou constituindo agregados (Rosière & Chemale Jr. 2000).

2.5.1 Itabiritos

Segundo Rosière & Chemale Jr. (2000), os itabiritos do QFe são definidos segundo três tipos composicionais principais (quartzo-itabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfibolítico) que estão condicionados por três fatores: composição original dos sedimentos na bacia, estruturação tectônica e metamorfismo e processos hidrotermais.

Observam-se variações texturais, e por vezes mineralógicas, associadas a metamorfismo, mas também a intenso processo de oxidação e alteração hidrotermal (Rosière & Chemale Jr. 2000), sendo verificado a partir da análise de diferentes domínios estruturais e metamórficos que apresentam, principalmente, as seguintes características mineralógicas (Pires, 1995, Rosière *et al.* 2001): progressiva martitização da magnetita (Rosière 1981), cristais de hematita com morfologia incomum (provável pseudomorfismo em silicatos), itabiritos com dolomita transformada em hematita, existência de bandamento sendo cortado por veios de hematita (Rosière & Chemale Jr. 2000), presença de microestruturas que indicam mobilização sintectônica de Fe (Lagoeiro 1998) e hematita com presença de inclusões fluidas (Rosière *et al.* 2001).

Os itabiritos classificados em tipos composicionais citados anteriormente são descritos por Rosière & Chemale Jr. (2000) da seguinte forma:

- Quartzo Itabirito

Considerado o tipo mais frequente no QFe, corresponde a jaspilitos metamórficos com alternância centimétrica a milimétrica de níveis claros (quartzo) e escuros (óxidos de ferro). Em geral, como resultado da recristalização de chert dos jaspilitos, ocorrem cristais equidimensionais de quartzo. Seus componentes mineralógicos principais são hematita, martita, kenomagnetita e quartzo.

- Itabirito Dolomítico

Esse tipo apresenta bandas claras (carbonatos) e escuras (óxidos de ferro) relacionadas aos dolomitos ferruginosos. Seus principais componentes mineralógicos são martita, hematita, kenomagnetita e dolomita ferroana e os acessórios podem ser calcita, clorita e anfibólios.

- Itabirito Anfibolítico

Representa os itabiritos que contém anfibólios de composição variada, na forma de cristais idiomórficos a hipidiomórficos e possuem variadas orientações cristalográficas. A martita, hematita, kenomagnetita, tremolita, actinolita e quartzo são seus principais componentes mineralógicos.

Itabiritos e minérios xistosos é a descrição dada aos itabiritos cujo o tipo tectônico é caracterizado como Fe-tectonitos, e suas principais características são: foliação bem definida, crescimento de hematita como palhetas (especularita com orientação cristalográfica e textura monocristal), especularita na presença de dobras intrafoliais, isoclinais e sem raiz associadas à intensa deformação em condições dúcteis, trama granoblástica para os carbonatos e quartzo, e anfibólios com cristais orientados (Rosière & Chemale Jr. 2000).

MINÉRIO DE FERRO SAMARCO E O COMPLEXO ALEGRIA

3.1 INTRODUÇÃO

A Samarco Mineração S.A. é uma empresa produtora e exportadora de pelotas de minério de ferro, tendo como principal objeto de lavra os itabiritos de diversos tipos que serão apresentados posteriormente neste trabalho.

Suas jazidas estão localizadas geologicamente no contexto do Complexo Alegria, que abrange os municípios de Mariana e Ouro Preto, e faz parte da estrutura tectônica do Sinclinal Alegria. A parte que pertence à Samarco Mineração S.A. do Complexo Alegria é subdividida em Alegria Norte, Centro e Sul, e Germano (Figura 3.1).

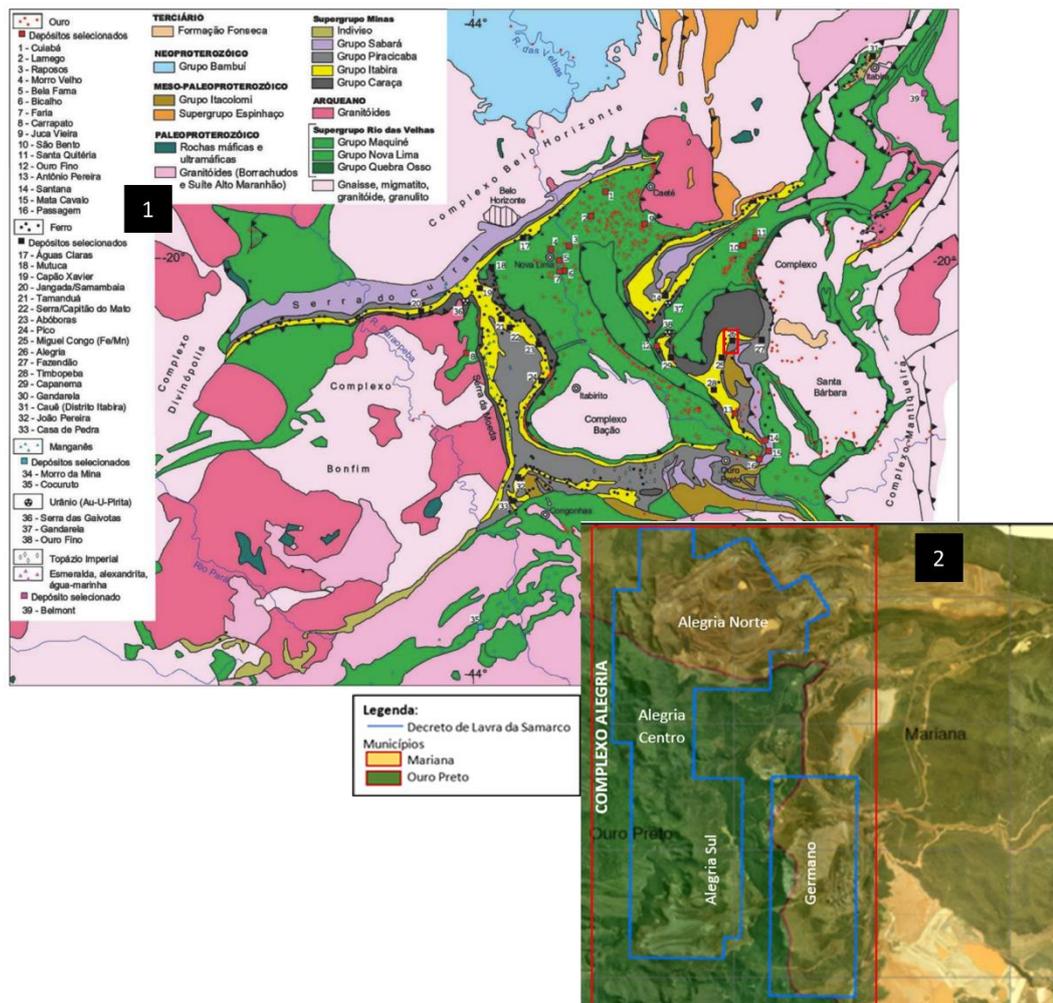


Figura 3.1 – 1) Mapa geológico do QFe com destaque para a região pertencente à Samarco Mineração (Ferreira 2013). 2) Área da Samarco Mineração subdividida em Complexo Alegria e Germano. (Imagem de satélite do Google Earth, extraídas e modificadas de relatórios internos da empresa Samarco Mineração S.A., 2013).

3.2 MINÉRIO DE FERRO

Na crosta terrestre, o ferro encontra-se como o quarto elemento químico de maior abundância, inferior apenas ao oxigênio, alumínio e silício, e ocorre em dois estados de oxidação, como ferroso (Fe^{+2}) e como férrico (Fe^{+3}), produzindo diversos óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos, de composição e estrutura cristalina distintas. Dentre os principais minerais de ferro presentes no Quadrilátero Ferrífero, destacam-se a hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) e goethita (FeOOH).

A hematita corresponde aos minérios ricos, com alto teor de Fe em relação aos outros minerais citados. Cristaliza-se no sistema hexagonal, classe trigonal-escalenoédrica. Apresenta dureza 6, e densidade entre 4.9 e 5.3. Seus cristais são de diferentes morfologias devido às variadas condições de formação, existindo uma forte tendência ao idiomorfismo (Morris 1985). Podem ocorrer sob a forma de placas delgadas agrupadas em forma de rosetas, romboédricas, botrioidais a reniformes com estrutura radiada, micácea e laminada. Possuem brilho metálico e cor azul do aço, sendo opacas as variedades terrosas.

No Complexo Alegria, a hematita é um dos minerais de ferro predominantes, ocorrendo como cristais octaédricos pseudomorfos da magnetita (martita), cristais lamelares ou placóides com brilho metálico (especularita) e em concreções e preenchimento de cavidades (Rocha 2008). A hematita martítica, também conhecida como hematita porosa, pode ter sido originada através de um processo de enriquecimento supergênico nas formações ferríferas, onde ocorreu uma alteração de oxidação da magnetita (Morris 1985), sob diferentes graus de alteração e, conseqüentemente, diferentes graus de porosidade (Rocha 2008). Além da origem supergênica, a geração da martita a partir da magnetita também pode ter ocorrido durante os processos de deformação e metamorfismo, assim como alterações hidrotermais (Gruner 1926; Swaddle & Oltmann 1980), por dissolução da magnetita e conseqüente reprecipitação da hematita (Lagoeiro 1998). A hematita especular com maior ocorrência na jazida corresponde a cristais hipidiomórficos a idiomórficos com 0,02 a 0,3mm de dimensão, orientados paralelamente ou subparalelamente ao plano de foliação principal definindo uma trama lepidoblástica ou milonítica, associada a zonas de alta deformação (Rocha 2008).

A magnetita cristaliza-se no sistema isométrico, classe hexaoctaédrica, com dureza entre 5,5 e 6 e densidade 5,2. Comumente é maciça, mas também ocorre como granular, com granulação grossa ou fina (Dana 1981). Apresenta-se com forte magnetismo, opaca, brilho submetálico preto do ferro com tons variados de marrom ou cinza, e azul de aço em partes intemperizadas. No Complexo Alegria, a magnetita é o óxido de ferro mais antigo e menos expressivo. Ocorre formando agregados com outros minerais de ferro, em níveis ou bandas que se intercalam com bandas quartzosas e, normalmente, encontra-se martitizada apresentando estrutura em treliça (Rocha 2008).

A goethita é cristalizada no sistema ortorrômbico, classe bipiramidal, como cristais de forma acicular, reniforme, maciça, estalactítica e agregados fibrosos radiais. Sua dureza está entre 5 e 5,5 e a densidade é 4,3. Apresenta coloração que varia de castanho amarelado a castanho escuro, e brilho adamantino a opaco, podendo ser sedoso em algumas variedades finas, escamosas ou fibrosas (Klein 1985). Sua ocorrência é comumente como um produto de intemperismo de minerais de ferro, tais como a siderita, magnetita, pirita e outros. Origina-se também por precipitação direta, inorgânica ou biogênica, a partir de águas meteóricas ou marinhas (Deer *et al.* 1997). Nas jazidas do Complexo Alegria, a presença da goethita é tão predominante quanto a da hematita, e geralmente ocorre substituindo a magnetita e martita nos itabiritos (Veríssimo 1999). A principal e mais antiga geração de goethita na jazida é caracterizada substituindo óxidos e silicatos de ferro sem alterar a estrutura original dos itabiritos, e ocorre preferencialmente no centro dos cristais de magnetita, preservando lamelas de hematita martítica (Rocha 2008). Ocorrem ainda diferentes fases de goethita como concreções ou crostas secundárias, apresentando diversas estruturas (fibrorradiada, coliforme, maciça e criptocristalina) originadas através da precipitação de hidróxidos de ferro ao longo de descontinuidades e espaços vazios (Veríssimo 1999). A alumina (Al_2O_3), sílica (SiO_2) e fósforo (P), elementos minoritários do minério de ferro, encontram-se associados principalmente à goethita (Brandão *et al.* 2012).

3.3 GEOLOGIA DO COMPLEXO ALEGRIA

O Complexo Alegria está localizado na porção leste do QFe (Figura 3.1), sendo bordejado de sudoeste a norte pela Serra do Caraça, e possui jazidas de minério de ferro que são pesquisadas e lavradas pela Samarco Mineração S.A. A região faz parte da estrutura tectônica do Sinclinal de Alegria, constituído por rochas do Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas (Dorr 1969).

Maxwell (1972) se refere à região como Distrito Alegria, dividindo-o em terrenos de acordo com a litologia das rochas aflorantes, e descreve como são representadas as unidades menos predominantes. O Grupo Nova Lima aflora como quartzo-sericita xisto, quartzo-clorita xisto e clorita filito. O Grupo Tamanduá é representado pela Formação Cambotas e consiste em conglomerados de seixos, areia, quartzitos e sericita filito quartzoso que se localizam em zona de falha fortemente cisalhada. A Formação Moeda ocorre como quartzito branco de granulação fina e pequenas quantidades de sericita filito, com espessura de 300 metros na parte oriental, 200 metros na parte ocidental e de 0 a 20 metros na parte central do distrito. A Formação Batatal aflora como um argilito grafitoso homogêneo ao longo do córrego Palmital na base da Serra do Caraça, em contato gradacional com a formação ferrífera. As formações Cercadinho, Fecho do Funil e Barreiro ocorrem no aspecto de vales e áreas de relevo mais baixo devido à alta susceptibilidade ao intemperismo e erosão, e são representadas, respectivamente, por quartzito ferruginoso e filito aluminoso, afloramentos com finas

camadas de quartzito e dolomito filitoso e, filito grafitoso preto e argilito (Maxwell 1972). Estão presentes ainda diques e soleiras de rochas básicas, crostas lateríticas e depósitos de tálus (Rodrigues 2016).

A estrutura do Sinclinal de Alegria (Figura 3.2) é resultado da atuação de duas etapas de cisalhamento diferencial distintos de caráter progressivo (Endo & Chemale Jr 1992). A primeira etapa, de movimentos extensionais, se processou em ambiente dúctil durante a geração de estruturas que envolveram a rotação de charneira de dobras, onde as tramas lineares foram rotacionadas dextralmente na aba NE e sinistralmente na aba SW do Sinclinal de Alegria devido à presença de anteparo rígido dos maciços adjacentes. Posteriormente, modificando sua geometria durante a tectônica compressional E-W, a segunda e última etapa ocorreu em ambiente rúptil-dúctil com movimentos ao longo de mesofalhas direcionais sinistrais de alto ângulo com orientação NW-SE. Portanto, o Sinclinal de Alegria é uma estrutura de segunda ordem, cujo eixo apresenta caimento moderado para SE e direção NW-SE (Endo & Chemale Jr 1992).

A maior porção do Complexo Alegria é representada pelas jazidas de ferro que são compostas por rochas da Formação Cauê, Grupo Itabira, Supergrupo Minas, sendo o itabirito o principal objeto de lavra da empresa. Além dos diversos tipos de itabirito, ocorrem eventualmente outros materiais ferruginosos, como hematita friável, hematita compacta, cangas e itabiritos anfíbolíticos estéreis e, associados aos itabiritos, ocorrem veios e vênulas de caulinita, quartzo e de goethita, além de bolsões e faixas de materiais brechóides (Costa *et al.* 1998). Os fenômenos atribuídos à origem da jazida se dão pela atuação de eventos tectono-metamórficos sobre sedimentos ferríferos durante o pré-cambriano, e posterior superposição de processos de enriquecimento supergênico do ferro ocorridos a partir do Cenozoico (Costa *et al.* 1998). A superposição dos processos supergênicos sobre as rochas formadas durante o tectono-metamorfismo (itabiritos magnetíticos, anfíbolíticos e especularíticos, hematitas compactas e material brechóide) gerou itabiritos martíticos e goethíticos, enriquecidos em ferro devido à dissolução e lixiviação do quartzo durante a desestruturação das rochas ferríferas, e provocou uma friabilidade dos materiais que chegam a ser pulverulentos (Costa 2005).

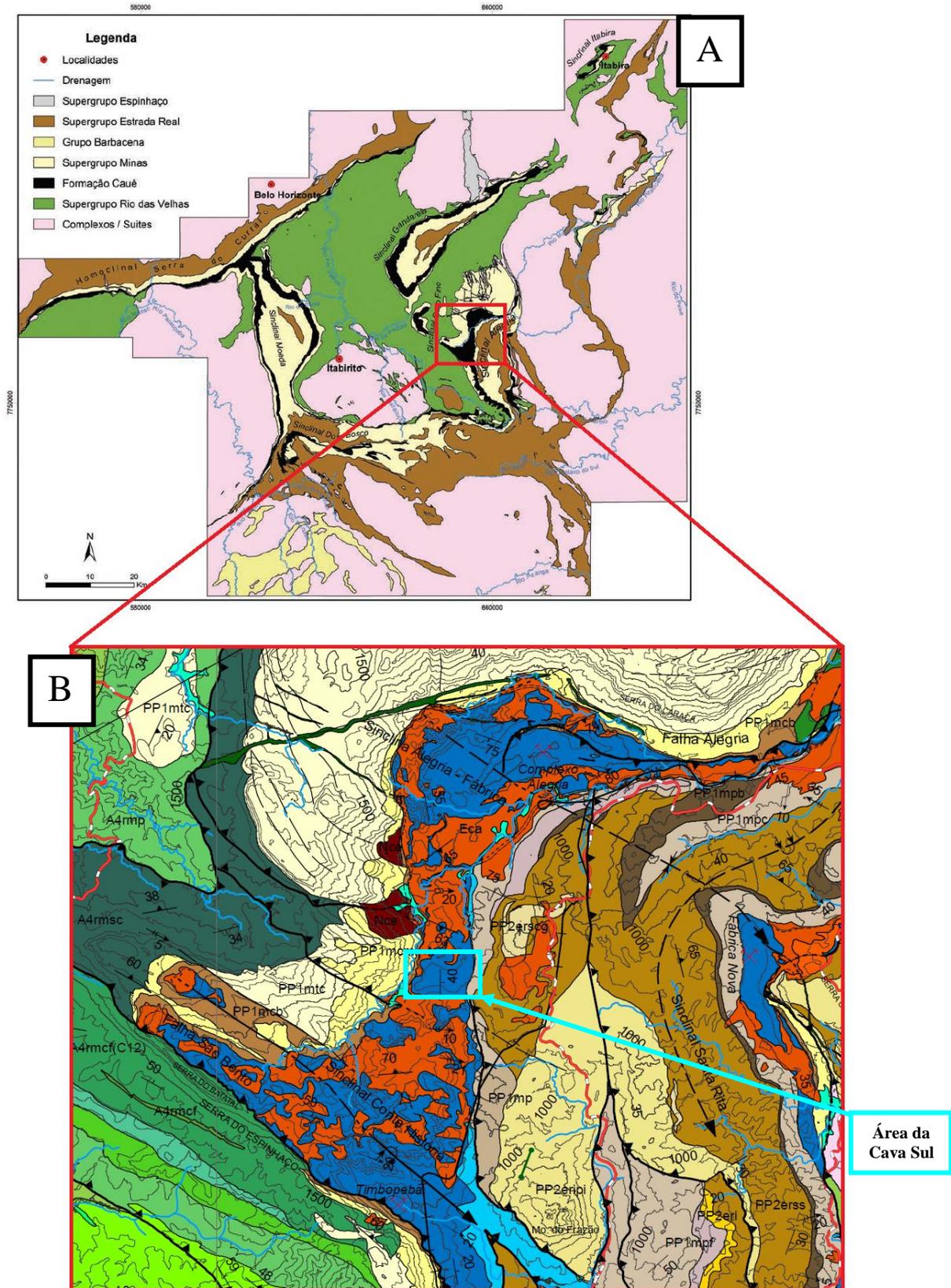


Figura 3.2 - a) Mapa de distribuição das unidades morfotectônicas do QFe, com destaque para a região do Sinclinal Alegria, onde se encontra a área de estudo. (Endo *et al.* 2019a). **b)** Recorte do Mapa Geológico do QFe para exibir com maiores detalhes a área de estudo (extraído de Endo *et al.* 2019a).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO DO COMPLEXO ALEGRIA

No Complexo Alegria, assim como em demais áreas do QFe, os itabiritos apresentam uma ampla variação composicional mineralógica, química e granulométrica, gerando diferentes comportamentos nos processos de lavra e beneficiamento do minério de ferro itabirítico.

A primeira mina a ser lavrada pela Samarco Mineração S.A. foi a Mina do Germano, constituída por um corpo de minério muito homogêneo, essencialmente especularítico. Na época (1977), esse itabirito era considerado “pobre”, levando a empresa a ser pioneira no processo de concentração de itabiritos de baixo a médio teor de Fe. O modelamento geológico-tipológico da mina era relativamente simples, o que facilitava o processo de beneficiamento com pouca geração de lama, atingindo altos resultados de produção e qualidade.

Após a exaustão da Mina do Germano, a empresa começou a lavrar áreas localizadas no Complexo Alegria, quando surgiram grandes dificuldades no processamento dos minérios atribuídas à grande diversidade entre os tipos de itabirito presentes. Diante dessas dificuldades, foi necessária estabelecer a diferenciação dos tipos de itabirito utilizando a sua composição mineralógica como principal critério. Desse modo, os itabiritos são nomeados como itabiritos martíticos, especularíticos, goethíticos ou magnetíticos de acordo com o mineral predominante, e como itabirito anfibolítico se houver a presença de pseudomorfos de anfibólio. Atualmente, com base nas descrições das amostras dos furos de sonda e resultados de análises granulométricas, químicas e mineralógicas e dos testes de flotação, foi configurado um modelo geológico-tipológico com a devida classificação dos itabiritos. (Informações a partir de relatórios internos da empresa).

3.4.1 Tipologia dos Minérios de Ferro do Complexo Alegria

A seguir, serão apresentados dados obtidos a partir de relatórios internos da empresa sobre a definição de tipologia dos itabiritos presentes no Complexo Alegria. A tipologia dos itabiritos é definida baseada em até três tipos de minerais que integre a sua composição. Adota-se uma nomenclatura que considera a quantidade em percentual dos minerais de ferro em ordem decrescente, iniciando com a letra “I”, que se refere a itabirito, e seguida pelas letras “E” para hematita especular, “M” para hematita martítica, “G” para goethita, “MAG” para magnetita e/ou “A” para pseudomorfo de anfibólio. De forma geral, os principais tipos de itabirito presentes nas áreas do Complexo Alegria são os descritos a seguir (Rocha 2008):

- Itabirito Martítico (IM)

Caracterizado pela alta proporção de hematita martítica, apresenta coloração cinza escuro fosco e em alguns casos há alternância com camadas avermelhadas e com camadas brancas de quartzo.

Normalmente apresenta alta friabilidade, fragmentando facilmente, chegando a ser pulverulento em alguns locais.

- Itabirito Especularítico (IE)

É o tipo composto predominantemente por hematita especular, com coloração cinza azulada brilhante. Geralmente, devido à interseção dos planos de foliação, ocorrem estruturas tipo lápis que geram fragmentos mais alongados. É um material friável com porções mais resistentes.

- Itabirito Goethítico (IG)

Rocha de coloração cinza amarronzada, com maior abundância de goethita (maciça, botrioidal e terrosa). Ocorre muito alterado, friável, muito argiloso e gera muita lama. Uma curiosidade dos IG, observada em amostras de furos de sondagem (Figura 3.2), é a formação das goethitas como estalactites após retrometamorfismo.



Figura 3.3 – Furo de sondagem de um IG com feições de estalactites (foto autoral 2020).

- Itabirito Anfibolítico (IA)

É reconhecido pela sua coloração castanho amarelado (ocre) e predominante presença de goethita (pseudomorfa, terrosa e botrioidal) e martita, sendo possível observar o aspecto fibroso dos pseudomorfos de anfibólio. Essa rocha apresenta-se friável frequentemente.

- Itabirito Martítico-especularítico (IME) ou Itabirito Especularítico-martítico (IEM)

Caracteriza-se pela presença de martita e especularítica, sendo IME quando a martita é mais abundante com a coloração cinza mais escura e fosca, e IEM quando a especularítica é mais abundante indicada por um brilho mais intenso. É um material que normalmente está friável.

- Itabirito Martítico-goethítico (IMG) ou Itabirito Goethítico-martítico (IGM)

Tipo de itabirito com coloração cinza amarronzada, tendo a martita e a goethita como materiais predominantes. Sua classificação como IMG ou IGM pode ser duvidosa macroscopicamente e definida somente após resultados de análises químicas.

- Itabirito Martítico-especularítico-goethítico (IMEG)

Possui coloração cinza amarronzada e pouco brilho com quantidades significativas de martita, specularita e goethita. A nomenclatura pode variar de acordo com o resultado de análises químicas que defina a ordem de predominância dos minerais.

O itabirito magnetítico (IMAG), constituído predominantemente por magnetita, é uma rocha de coloração cinza, alta densidade, porém pouco expressiva nas jazidas do Complexo Alegria.

As tipologias descritas anteriormente podem apresentar pequenas quantidades de outros minerais, porém, por ocorrerem em pequenas proporções, não interferem na nomenclatura utilizada para o modelo geológico-tipológico, deixando essas informações restritas às descrições individuais das amostras.

3.4.2 Compacidade das Tipologias do Complexo Alegria.

A classificação por compacidade dos itabiritos do Complexo Alegria foi um critério utilizado pela equipe de Geologia da Samarco para melhoria no processamento do minério de ferro, sendo aplicado aos planos de desmonte por detonação. Essa classificação é baseada em um teste feito com amostras retiradas na mina e peneiradas na malha 3/8" (0,038mm). Quando a proporção do material retido na malha for maior do que 80%, o minério é classificado como compacto, se for entre 60% e 80% é um material semicompacto, e se for menor do que 60%, friável (Figura 3.3).

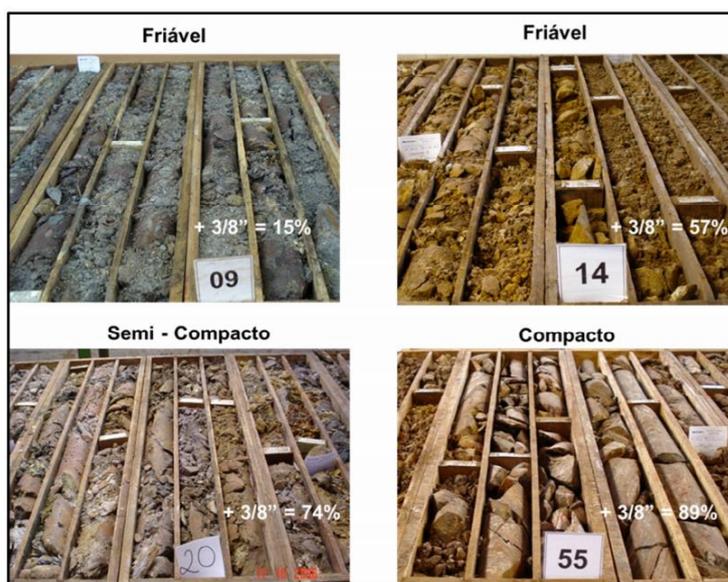


Figura 3.4 - Foto de furos de Sondagem evidenciando as diferentes compacidades. (Rodrigues, 2016)

3.5 PROCESSO DE PRODUÇÃO DA SAMARCO MINERAÇÃO S.A.

A Samarco Mineração S.A. é uma empresa brasileira que opera desde 1977 no mercado do minério de ferro fornecendo produtos para o setor siderúrgico mundial. De modo geral, o processo produtivo integrado da Samarco é dividido em 16 etapas, abrangendo os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, da extração nas minas a céu aberto ao beneficiamento do material, seguido pelo transporte do concentrado pelo mineroduto, pelletização e, finalmente, ao embarque para exportação (Figura 3.4).



Figura 3.5 – Fluxograma ilustrativo do processo produtivo integrado da Samarco Mineração S.A. (extraído da apresentação institucional aos acionistas da empresa).

Na unidade industrial de Germano, localizada nos municípios de Mariana e Ouro Preto, ocorrem as etapas iniciais da produção, abrangendo a lavra e beneficiamento do minério e o início do transporte do concentrado produzido. Primeiramente, o processo consiste na extração do minério de ferro e na remoção do estéril em minas a céu aberto por meio de equipamentos móveis de superfície de grande porte, como caminhões fora-de-estrada e correias transportadoras moveis de bancada. O minério extraído nas diversas frentes de lavras das minas do Complexo Alegria, juntamente com o minério de Fazendão (minério que a Samarco compra da Vale), formará uma mistura que, transportada por meio do sistema de correias de longa distância, alimentará os concentradores com um teor médio de Fe de 45%.

Na etapa do beneficiamento, o minério inicia o processo pelo peneiramento e britagem para adequação do tamanho das partículas minerais. Em seguida, o minério britado alimenta os circuitos de moagem pré-primária e moagem primária, com a finalidade de adequação da granulometria do minério à etapa de concentração, e classificando o minério moído por meio de ciclones. Antes de continuar para a etapa de concentração do minério já moído, devido à alta geração de partículas ultrafinas (lama), fez-se necessária a realização do processo de deslamagem, para separar o material que vai para os espessadores de lama e o material que é destinado para as etapas de concentração.

O processo de concentração do minério ocorre em células de flotação convencional, realizada através de processo de flotação catiônica reversa, onde os minerais de ganga são flotados devido à adição de reagentes coletores (aminas) e pH controlado (alcalino), e os minerais de ferro são decantados com o uso de amido. Após as duas primeiras etapas de flotação, o concentrado produzido é remoído e segue para as colunas de flotação para obtenção do concentrado final e posteriormente ser transferido para os tanques de estocagem do mineroduto. Através do fluxograma do concentrador 3 (Figura 3.5), é possível obter um melhor entendimento dos processos de beneficiamento da Samarco.

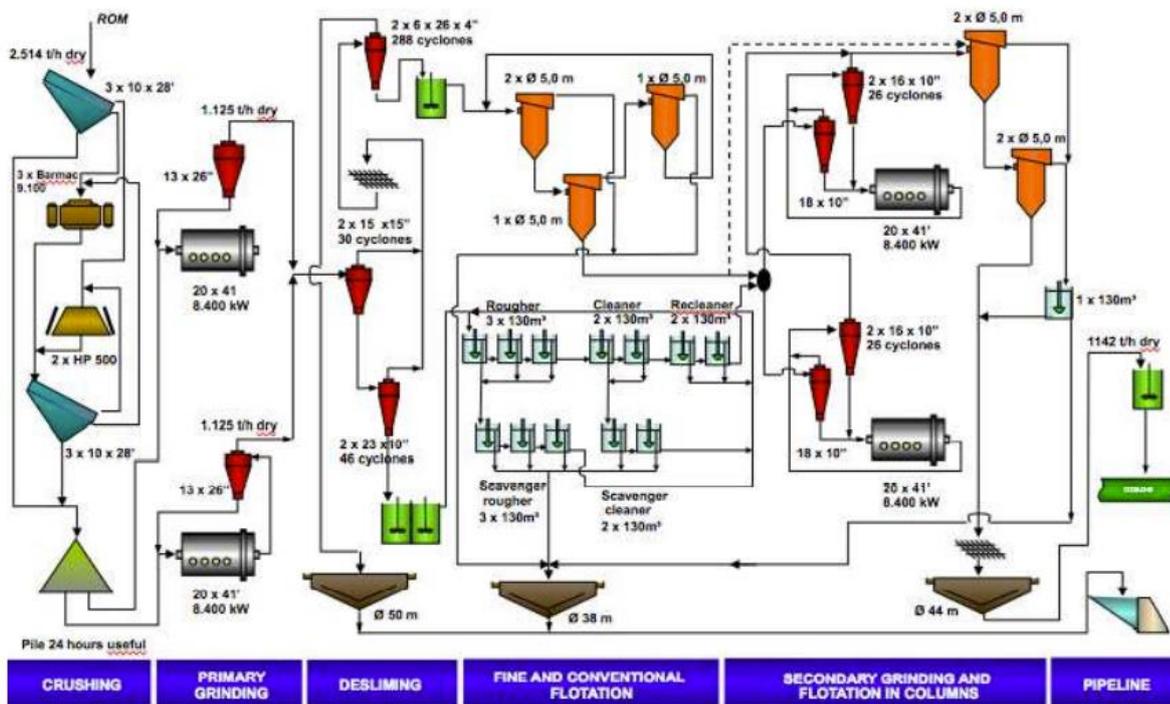


Figura 3.6 - Fluxograma do Concentrador 3 da Samarco Mineração S.A. (Rodrigues, 2016)

O concentrado final de minério de ferro é transferido pelo mineroduto, que tem aproximadamente 398km de extensão; duas estações de bombas com a finalidade de fornecer energia e impulsionar o deslocamento do material, uma na unidade de Germano e outra na cidade de Matipó (MG), e duas estações de válvulas, em Guaçuí e Alegre (ES), que regulam a pressão para garantir a segurança do processo.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO TIPOLOGICA DOS LITOTIPOS AFLORES NA CAVA SUL

4.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta a caracterização tipológica dos litotipos observados ao longo do trabalho de mapeamento da Cava Sul (Figura 3.1 e figura 4.1), onde afloram, predominantemente, diferentes tipos de itabiritos da Formação Cauê (Grupo Itabira, Supergrupo Minas) (Figura 2.2).

A figura 4.1 apresenta o mapa tipológico existente, que foi gerado a partir da interpretação e inferência de contatos com base na descrição de testemunhos. A figura 4.2 é o mapa gerado a partir deste trabalho de mapeamento de detalhe, que consistiu na descrição detalhada das rochas em cada ponto estabelecido em campo, de maneira que os itabiritos fossem diferenciados pelas tipologias pré-determinadas nos padrões da empresa. Para estabelecer uma organização na descrição de cada afloramento, foi desenvolvida uma tabela (Apêndice 1) como guia para definir as principais características observadas nos itabiritos e nas demais rochas que pudessem ocorrer na Cava Sul. A figura 4.2 apresenta o mapa elaborado, descrito em detalhe a seguir.

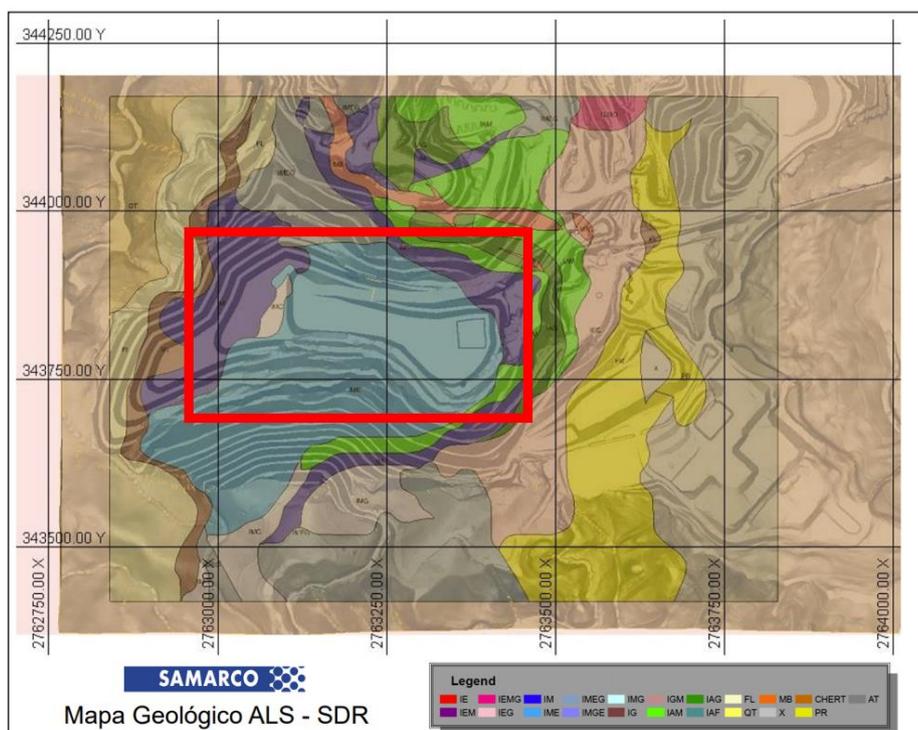


Figura 4.1- Mapa tipológico de Alegria Sul com destaque para a área de mapeamento, o extremo sul da Cava Sul, quem contém as tipologias IG (Itabirito Goethítico), IM (Itabirito Martítico), IME (Itabirito Martítico-Especularítico) e IAM (Itabirito Anfibolítico-Martítico) (Retirado de relatórios internos da empresa Samarco Mineração S.A.)

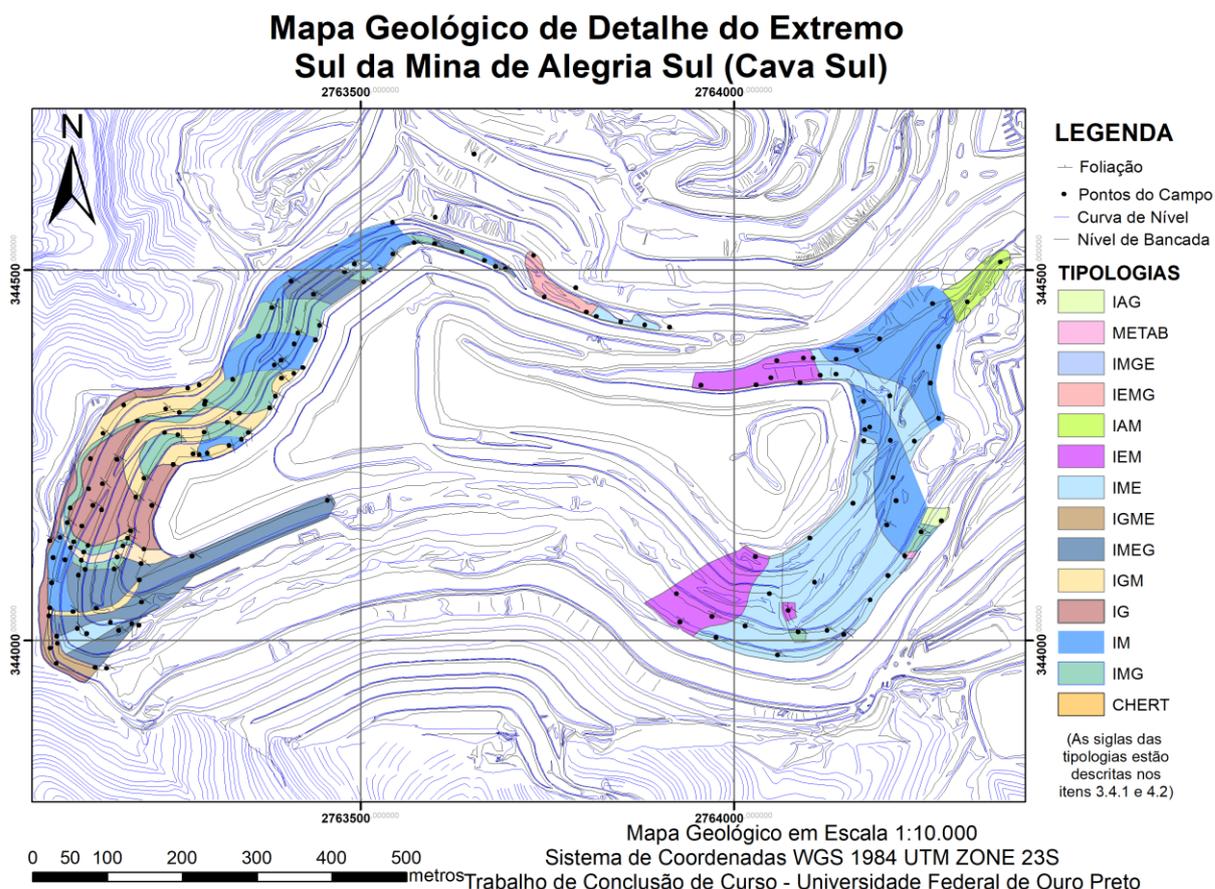


Figura 4.2 - Mapa Geológico Tipológico de Detalhe do Extremo Sul da Mina Alegria Sul (Cava Sul).

Foram descritos 169 pontos, sendo que em todos eles realizou-se a distinção da tipologia e das estruturas presentes, sendo que sempre que possível buscou-se determinar suas atitudes.

4.2 CARACTERIZAÇÃO TIPOLÓGICA DOS ITABIRITOS DA CAVA SUL

A tipologia mais comum, reconhecida na maioria dos pontos levantados durante os trabalhos de campo, é o Itabirito Martítico (IM) (Figura 4.2). Esse tipo de itabirito se destaca por sua forte estrutura bandada, apresentando compacidade friável a semi-compacta e variada fragmentação, com fragmentos duros, torrões e pó em alguns pontos, e “chapinhas” e pó em outros. Seus afloramentos apresentam poucas fraturas e sua desagregação ao martelo varia de dificuldade devido ao nível de intemperismo em cada ponto. A cor e o brilho fosco são consideradas características diagnósticas para diferenciar o IM de outros tipos de itabirito, sendo cinza escuro com uma leve coloração amarronzada ou avermelhada e opaco (Figura 4.3). Com base em trabalhos de microscopia realizados anteriormente no Complexo Alegria que identificaram a presença de martita, foi possível estabelecer as características a serem observadas macroscopicamente para a definição de itabiritos martíticos.

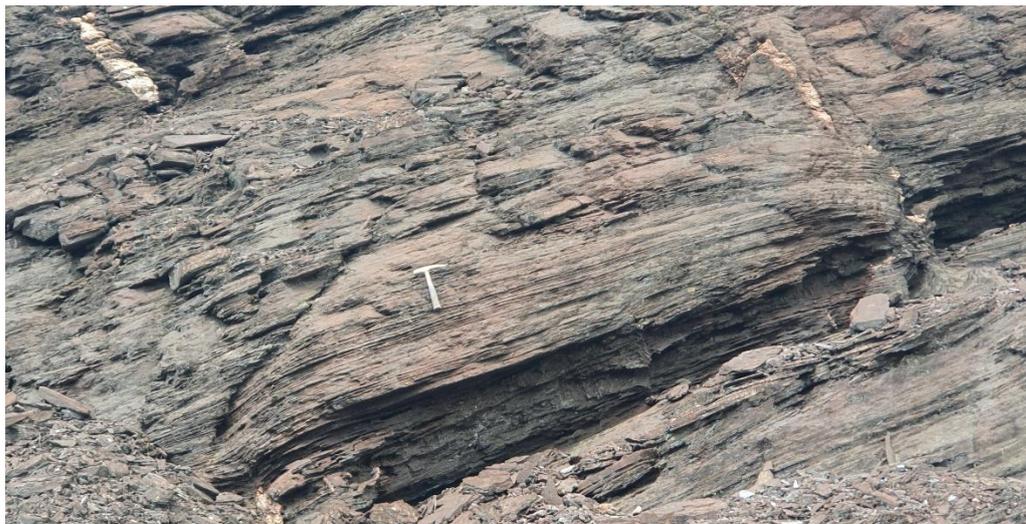


Figura 4.3 – Foto com orientação W-E de afloramento de Itabirito Martítico (IM) apresentando forte estrutura bandada e coloração cinza escuro fosco.

O Itabirito Martítico-Goethítico (IMG) e o Itabirito Martítico-Especularítico (IME) aparecem a seguir, em ordem de proporção de ocorrência na área da Cava Sul (Figura 4.2). Estes se diferenciam do primeiro devido à uma marcante presença de goethita e especularita, respectivamente, na rocha. A principal diferença entre o IMG (Figura 4.4a) e o IME (Figura 4.4b) é a cor, pois a goethita gera uma coloração mais castanha à rocha, enquanto a especularita é responsável por um brilho característico. As diferentes características mineralógicas entre a especularita e a goethita também influenciam na diferença de compacidade, fragmentação e desagregação entre esses tipos de itabiritos.

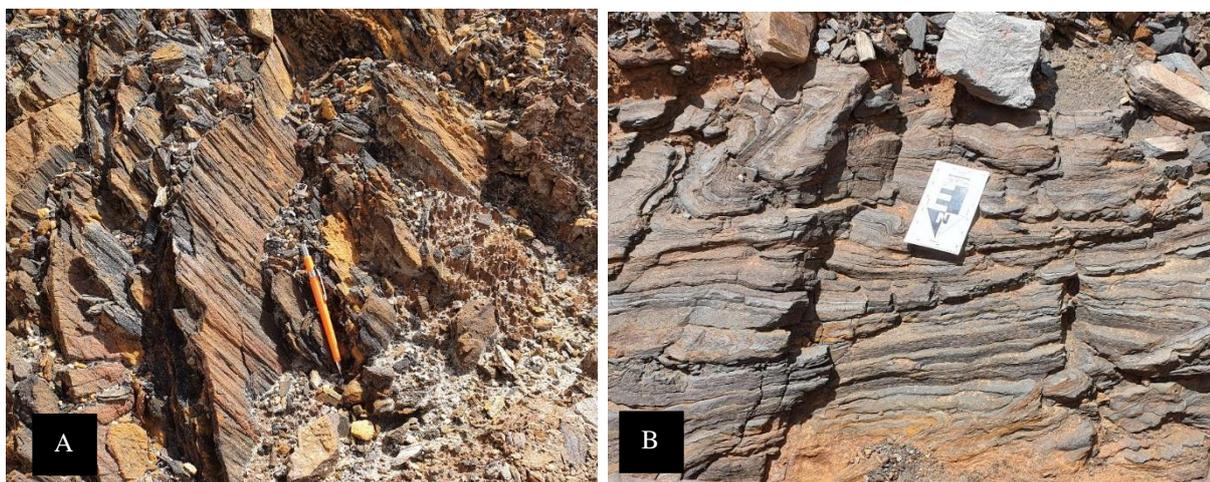


Figura 4.4 – **A)** Foto tirada em campo do afloramento de Itabirito Martítico-Goethítico (IMG) que mostra a coloração castanha da goethita. **B)** Foto tirada em campo do afloramento de Itabirito Martítico-Especularítico (IME) com estrutura dobrada.

O IMG apresenta compacidade friável, fragmentos duros e pó e moderada desagregação ao martelo, devido à característica terrosa e às vezes argilosa da goethita. Já o IME apresenta

compacidade friável a semi-compacta, fragmentos duros, chapinhas e pó e maior dificuldade de desagregação ao martelo. Ambos possuem estrutura bandada.

Além das tipologias já citadas, também foram identificados itabiritos com presença de martita: Itabirito Martítico-Especularítico-Goethítico (IMEG), Itabirito Goethítico-Martítico (IGM), Itabirito Especularítico-Martítico (IEM), Itabirito Goethítico-Martítico-Especularítico (IGME) e Itabirito Martítico-Goethítico-Especularítico (IMGE) (Figura 4.2). As principais características que o itabirito apresenta para determinar maior presença de goethita e especularita são, respectivamente: coloração menos cinza e mais castanha amarronzada, e marcante presença de fragmentos em formas de “chapinhas” com um brilho mais forte. Nas fotos a seguir estão representados o IEM (Figura 4.5) e IGM (Figura 4.6).



Figura 4.5 - Foto tirada em campo do afloramento de Itabirito Especularítico-Martítico (IEM) com forte marcação da foliação e dos planos de interseção, que formam “chapinhas”.



Figura 4.6 - Foto tirada em campo do afloramento de Itabirito Goethítico-Martítico (IGM) de coloração castanho amarronzado.

Itabiritos com forte predominância de goethita em sua composição e marcante presença de pseudomorfos de anfibólio também foram reconhecidos: o Itabirito Goethítico (IG), Itabirito Anfibolítico-Martítico (IAM) e Itabirito Anfibolítico-Goethítico (IAG) (Figura 4.2). A diferenciação entre itabiritos goethíticos e anfibolíticos é bastante difícil devido à semelhante coloração castanho amarronzada. Para diferenciá-los, o principal critério usado foi observar a presença de pseudomorfos de anfibólio, que ocorrem formando agregados radiais. Além disso, o IAM apresenta uma coloração marrom mais intensa (Figura 4.8), enquanto o IAG apresenta uma coloração castanho ocre. Ambos possuem estrutura bandada, compacidade friável, fragmentos duros, torrões e pó, com presença de fraturas e fácil desagregação ao martelo. Já o IG (Figura 4.7) é um itabirito que possui características semelhantes aos anteriores, entretanto não se observam os agregados radiais de pseudomorfos de anfibólio.



Figura 4.7 - Amostras de afloramento de Itabirito Goethítico com textura botrioidal.



Figura 4.8 - Foto de afloramento de Itabirito Anfibolítico-Martítico (IAM) de coloração marrom forte e material friável.

Além dos diversos tipos de itabiritos, foram descritas outras duas rochas: chert e metabásica (Figura 4.2).

A rocha denominada como chert é uma rocha sedimentar, composta por sílica microcristalina. É um litotipo facilmente identificado por sua coloração mais clara (castanho amarelado ou cinza muito claro), com compacidade friável a pulverulenta e possui fácil desagregação ao toque, sem necessidade do uso de martelo.

A rocha metabásica (Figura 4.9) identificada na Cava Sul é extremamente friável e com fácil desagregação ao toque. É multicolorida com tons de amarelo, castanho e rosa, e a estrutura é maciça. Com suporte do laboratório químico da Samarco, foi possível fazer uma análise química da rocha, apresentada na tabela 4.1.



Figura 4.9 - Foto de afloramento com presença de rocha metabásica (destacada no retângulo vermelho) na Cava Sul, sendo multicolorida e pulverulenta com fácil desagregação ao toque.

Tabela 4.1 – Composição química de amostra de rocha metabásica coletada em campo e apresentada na figura 4.9 (laboratório interno Samarco Mineração S.A.)

Descrição Amostra	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	PPC	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	FeO
Ponto 156 Metabásica 19/02/20	4,23	44,05	33,43	0,014	12,47	0	0,008	0,255	4,025	0,18

Na região leste da área mapeada nota-se a ocorrência de litotipos com maior proporção de martita e especularita, sugerindo região com tipologias mais ricas em Fe (Figuras 4.2 e 4.10). O mineral de ferro com maior abundância na área mapeada é a martita, presente como IM mas também em conjunto com os demais minerais de ferro.



Figura 4.10 - Foto tirada da porção leste da área de mapeamento da Cava Sul, em que é observada a predominância do cinza amarronzado escuro característico dos Itabiritos Martíticos e manchas de cinza azulado que representam a presença de Itabiritos Especularíticos.

Os contatos geológicos entre os diversos tipos de itabirito, ou tipologias identificadas, são gradacionais, o que dificulta, podendo inviabilizar, a determinação exata de sua localização para fins de planejamento de frentes de lavra com alta precisão de teores químicos. Com isso, as linhas que demarcam as tipologias no mapa (Figura 4.2) são contatos interpretados a partir do mapeamento em campo.

Na região oeste da área mapeada é possível observar um antifforme (Figura 4.11). Essa área também é marcada por ocorrências de compacidade mais friável a pulverulenta, que sugerem área submetida a mais alto grau de alteração.



Figura 4.11 - Foto tirada com vista para norte do extremo oeste da área de mapeamento da Cava Sul, possibilitando observar o antifforme formado na presença de materiais mais pulverulentos de IM, IME e CHERT.

No que tange à geologia estrutural da área mapeada, a partir das 51 medidas que foram feitas e inseridas no mapa (Figura 4.2), nota-se um resultado concentrado da foliação dos itabiritos com orientação NW-SE e mergulho para SW, em que a atitude máxima dos planos é indicado pela linha vermelha ($S_{max} = 220/30$) e seu polo pelo ponto vermelho ($P_{max} = 31/56$) (Figura 4.12).

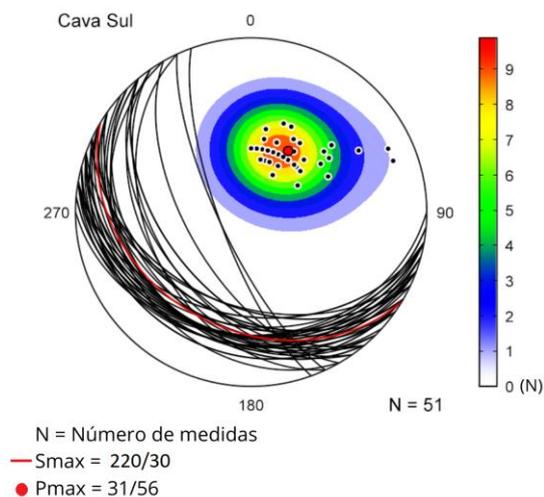


Figura 4.12 - Estereograma das medidas geológicas (foliações) feitas na Cava Sul. (*Orient*)

CAPÍTULO 5

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Após o trabalho de mapeamento em campo do extremo sul da Cava Sul e a finalização da etapa de confecção do mapa no ArcGis, foi possível gerar um mapa mais detalhado da região, com melhor distinção das tipologias de itabirito presentes, a identificação de rochas com baixo teor de ferro e a orientação preferencial das estruturas geológicas presentes.

Anteriormente, era possível identificar apenas quatro diferentes tipologias do itabirito, segundo a nomenclatura adotada pela empresa na área mapeada, IG, IM, IME e IAM (Figura 4.1). Após o trabalho de mapeamento em escala de detalhe, 12 tipologias (IAG, IMGE, IEMG, IAM, IEM, IME, IGME, IMEG, IGM, IG, IM e IMG) foram definidas na área, além da ocorrência de chert e de rocha metabásica. Correlacionando as tipologias definidas de acordo com a nomenclatura utilizada na empresa, com os tipos de itabiritos apresentados por Rosière & Chemale Jr. (2000) (vide item 2.5.1 deste trabalho), pode-se concluir que na Cava Sul estão presentes itabiritos anfibolíticos (IAG e IAM) e quartzo itabirito (IMGE, IEMG, IEM, IME, IGME, IMEG, IGM, IG, IM e IMG) de acordo com os tipos composicionais e itabiritos xistosos (IEM, IME, e IM) quanto ao tipo tectônico. As tipologias correlacionadas ao tipo anfibolítico apresentam pseudomorfos de anfibólio enquanto aquelas definidas como quartzo itabirito apresentam bandamentos com níveis de cores diferentes (quartzo e óxidos de ferro). As tipologias compostas predominantemente por especularita e martita, como IM, IEM e IME apresentam bandamento dobrado, com foliação bem definida, marcada por plaquetas de especularita. O tipo composicional mais dominante na Cava Sul é o quartzo itabirito, e a tipologia mais abundante é o IM (itabirito martítico), sendo diferenciado das demais tipologias de acordo com as variações texturais de cada itabirito.

A atitude dominante dos planos de foliação medidos (figura 4.12) mostram orientação preferencial NW-SE/SW, o que está de acordo a orientação regional do Sinclinal Alegria (capítulo 2). Apesar de dobramentos locais não há grande dispersão na atitude da foliação.

Em contrapartida, segundo o mapa regional da figura 3.2, tem-se o itabirito da Formação Cauê como a litologia predominante da Cava Sul e uma estrutura regional com direção N-S e mergulho E, mas com o estudo de detalhes, o mapa local (figura 4.2) apresenta uma área com diferentes tipos de itabiritos, já citados anteriormente, rocha metabásica e CHERT, e estrutura local com orientação NW-SE/SW.

Apesar da dificuldade e limitação imposta pelo quadro pandêmico instalado em 2020, o mapeamento de detalhe realizado permitiu melhor conhecer os itabiritos aflorantes na área da Cava

Sul. Embora trabalhos focados no levantamento estatístico das estruturas presentes sejam necessários, foi possível observar que a orientação geral da estrutura do Sinclinal Alegria é observada quando se analisa a orientação dos corpos de itabirito aflorantes.

Por fim, pode-se concluir que mesmo a Cava Sul sendo preenchida pelo rejeito gerado no processo de produção da Samarco Mineração S.A., a riqueza de detalhes adquiridas com a produção deste trabalho pode ser usada para futuros modelamentos geológicos da área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, C.; Alkmim, F. F.; Lana, C.; Farina, F. 2017. Palaeoproterozoic assembly of the São Francisco craton, SE Brazil: New insights from U-Pb titanite and monazite dating. *Precambrian Research*, **289**:95-115.
- 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*, **90**:29–58.
- Alkmim, F. F. & Martins-Neto M. A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*. **33**:127-139.
- Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **7**:285–295.
- Almeida, L. G. 2004. *Evolução tectônica da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais*. Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado, 110p.
- Almeida, L. G., Castro P. de T. A., Endo I., Fonseca M. A., 2005. O Grupo Sabará no sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: uma revisão estratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências*, **35(2)**:177-186.
- Angeli, G., 2015. *Arcabouço estrutural e contribuição à estratigrafia do Grupo Maquiné, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais: Idade e controle da mineralização aurífera*. Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 105p.
- Brandão, P.R.G., Rocha, J. M. P., Cançado, R. Z. L. Minérios de ferro goethíticos do Quadrilátero Ferrífero (Brasil) – caracterização com ênfase nas impurezas principais. *In: Memórias e Notícias de Geociências no Espaço Lusófono, Volume 1: Para Conhecer a Terra*, Imprensa da Universidade de Coimbra, Portugal, 2012, p. 299-308.
- Cabral, A. R, Zeh A., Vianna N. C., Ackerman L. Pašava J., Lehmann B., Chrastný V. 2019. Molybdenum-isotope signals and cerium anomalies in Palaeoproterozoic manganese ore survive high-grade metamorphism. *Scientific Reports*, **9**:4570.
- Carneiro, M.A., 1992. *O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais): Litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do Arqueano*. Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado, 233 p.
- Castro, E. C. C., Ferreira J. E., Castro P. de T. A., 1998. Formação Cata Preta: uma nova unidade estratigráfica definida em rochas cenozoicas no extremo leste do Quadrilátero Ferrífero - MG. *In: XL Congresso Brasileiro de Geologia, 1998, Belo Horizonte, Anais do XL Congresso Brasileiro de Geologia. Belo Horizonte*, v. 1. p. 82-82.
- Chemale Jr., F., Rosière, C.A., Endo, I., 1991. Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Um modelo. *Pesquisas em Geociências (UFRGS)*, **18(2)**:104-127.
- Chemale Jr., F., Rosière, C.A. Endo, I., 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, **65**:25-54.
- Costa, A. G. D., Rocha, J. M. P., Bonfioli, L., Vieira, C. B. 1998. A Importância do modelamento geológico-tipológico no controle de qualidade dos concentrados e pelotas de

minério de ferro da Samarco Mineração S/A. In: XXIX Seminário de Redução de Minério de Ferro, Belo Horizonte, p. 545-555.

Costa, A. G. D. 2005. *Caracterização dos parâmetros intrínsecos de porosidade pelo método de adsorção de nitrogênio de concentrados remoídos de minérios itabiríticos do Complexo Alegria*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 124p.

Dana, J. D. 1981. *Manual de mineralogia*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 667p.

Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1997. *Double Chain Silicates, second ed. Rock-Forming Minerals, vol. 2B*. London, The Geological Society, 764p.

Derby, O. 1906. The Serra do Espinhaço, *Brazilian Journal of Geology*, **14(3)**:374-401.

Dorr, J. V. N. II., Gair J. E., Pomerene J. B., Rynearson G. A. 1957. *Revisão Estratigráfica Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero*. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. Avulso. 81. 36p.

Dorr, J. V. N. II. 1964. *Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil: Econ. Geology*, v. 59, no. 7, p.1203-1240.

Dorr, J.V.N. II. 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S.G.S. Professional Paper*, **641(4)**:1-110.

Endo, I. 1997. *Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozoico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e Áreas Adjacentes*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 243p.

Endo, I., Chemale Jr., F., 1992. Modelo de evolução cinemática do sinclinal Alegria e adjacências, Quadrilátero Ferrífero/MG. *Revista Escola de Minas*, **45 (1 e 2)**:24-27;

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

Endo, I., Gonçalves G. C., Silva H. M. C., 2014. Modelamento estrutural da mina de Fábrica Nova - Cava Leste, *Relatório Interno, Convênio Vale-UFOP-FG*, 41p.

Endo, I., Galbiatti H. F., Delgado C. E. R., Oliveira M. M. F. de, Zapparoli A. de C., Moura L. G. B. de, Peres G. G., Oliveira A. H. de, Zavaglia G., Danderfer Fº A., Gomes C. J. S., Carneiro M. A., Nalini Jr. H. A., Castro P de T. A., Suita M. T. de F., Tazava E., Lana C. de C., Martins-Neto M. A., Martins M. de S., Ferreira Fº F. A., Franco A. P., Almeida L. G., Rossi D. Q., Angeli G., Madeira T. J. A., Piassa L. R. A., Mariano D. F., Carlos D. U.. 2019a. *Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000: Uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969)*. Ouro Preto, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero.

Endo I., Delgado C. E. R. Oliveira M. M. F. de, Zapparoli A. de C., Carlos D. U., Galbiatti H. F., Castro P. de T. A., Suita M. T. de F., Barbosa M. S. C., Lana C. E., Moura L. G. B. de. 2019b. *Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000*.

Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, Ouro Preto, 482p.

Eschwege, W.L. von., 1833. *Pluto brasiliensis*. 2v. Tradução. Domício de Figueiredo Murta. Itatiaia, Belo Horizonte, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, ed. 1979, 270 p.

Evangelista, H. J. & Müller, G. 1986. Petrology of a transition Zone between the Archean craton and the Coast Belt, SE of the Iron Quadrangle, Brazil. *Chemie der Erde*, **45**:129-145.

Farina, F., Albert C., Dopico C. M., Aguilár C. G., Moreira H., Hippert J., Cutts K., Alkmim F. F., Lana C. C. 2016. The Archean-Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil: current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences*, **68**:4-21.

Ferreira, R. F. 2013. *Estudo de liberação das fases minerais em minérios de ferro*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 210p.

Freitas, F. M., Pinheiro M. A. P., Novo T. A., Magalhães J. R., Marinho M. de S. 2019. U-Pb ages for metasedimentary rocks of the Catarina Mendes Formation, Quadrilátero Ferrífero. In: 4º Simpósio do Cráton São Francisco e Orógenos Marginais, Aracaju, *Anais* p. 34-110.

Gonçalves, C. C., Lagoeiro L., 2013. The development of grain boundary orientation distribution in quartz. *European Journal of Mineralogy*, **25**:385-404.

Gomes, N. S., 1986. *Petrologisch-geochemische Untersuchungen im Bação-Komplex Eisernes Viereck, Minas Gerais, Brasilien*. Clausthal. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät. Technischen Universität Clausthal. Dissertation. 209p.

Gorceix, H., 1884. Notícias sobre cascalhos diamantíferos. Ouro Preto, *Anais da Escola de Minas*, n.3. p. 195-207.

Gross, G.A. 1965. Geology of iron deposits in Canada - general geology and evaluation of iron deposits. *Canadian Geological Survey*, **22**:181 p.

Gross, G.A., 1980. A classification of iron formations based on depositional environments. *The Canadian Mineralogist*, **18**:215-22.

Gruner, J.W., 1926. Magnetite-martite-hematite. *Economical Geology* **21**(4):375–393;

Herz N., 1978. Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *United States Geological Survey Professional Paper* 641-C, 81 p.

James, H. L. 1983. Distribution of banded iron formation in space and time In: Trendall, A. F. and Morris, R. C. (Editors), *Banded Iron Formation: Facts and Problems*. Elsevier, Amsterdam p. 471-490.

Klein, C. & Hurlbut Jr. C.S. 1985. *Manual of mineralogy. 20th edition*, John Wiley & Sons, New York, 596 p.

Kullerud, G., Donnay, G. & Donnay, J. D. H. 1969. Omission solid solution in magnetite: Kenotetrahedral magnetite. *Zeitschrift für Kristallographie*, **128**:1-17.

Ladeira, E.A. and Viveiros, J.F.M., 1984. Hipótese sobre a estruturação do Quadrilátero Ferrífero com base nos dados disponíveis. *Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo MG*, **4**:1-14.

- Lagoeiro, L. E., 1998. Transformation of magnetite to hematite and its influence on the dissolution of iron oxide minerals. *Journal of Metamorphic Geology*, **16**:415-423.
- Lana, C., Alkmim, F.F., Armonstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini Jr., H.R., 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, Southeast Brazil. *Precambrian Research* **231**:157–173.
- Machado, N. & Carneiro M.A. 1992. U-Pb evidence of late Archean tectono-thermal activity in the southern São Francisco shield, Brazil. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **29**:2341-2346.
- Machado, N. & Noce C.M. 1993. A evolução do Setor Sul do Cráton São Francisco entre 3,1 e 0,5 Ga baseada em geocronologia U-Pb. In: Simpósio Cráton São Francisco 2, Salvador. *Anais. SBG-BA, SE/SBG*. p.100-102.
- Machado, N., Noce C.M., Ladeira E.A., Belo de Oliveira, O.A. 1992. U-Pb geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, **104**:1221-1227.
- Maizatto, J. R., 1993. *Estratigrafia e tectônica das rochas cenozoicas da bacia do Gandarela e da região do Gongo Soco, sinclinal do Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Trabalho Final de Graduação, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 110p.
- Maizatto, J.R., 2001. *Análise bioestratigráfica, paleoecológica e sedimentológica das bacias terciárias do Gandarela e Fonseca – Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais, com base nos aspectos palinológicos e sedimentares*. Tese de Doutorado, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 249 p.
- Maxwell, C. H. 1972. Geology and ore deposits of the Alegria District, Minas Gerais, Brazil. *USGS Professional Paper*, 341-J, 72p.
- Morris, R. C. 1985. Genesis of iron ore in banded iron-formation by supergene and surpergene-metamorphic processes – a conceptual model. In: Handbook of Stratabound and Stratiform Ore Deposits. *Netherlands: Elsevier Science Publishers' B.V.*, v. 13, 73-235.
- Pires, F. R. M. 1995. Textural and mineralogical variations during metamorphism of the Proterozoic Itabira Iron Formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **90**:118-134.
- Renger, F. E., Noce, C. M., Romano, A. W., Machado N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Geonomos*, **2**:1-11.
- Rocha, J.M.P. 2008. *Definição da tipologia e caracterização mineralógica e microestrutural dos itabiritos anfíbolíticos das minas de Alegria da Samarco Mineração S.A – Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 346p.
- Rodrigues, R. S. 2016. *Grau de Liberação de Diferentes Tipos de Minério de Ferro das Minas de Alegria (Mariana-MG) e sua Influência nas Etapas de Cominuição e Concentração*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 275p.

Rosière, C. A. 1981. Strukturelle und Texturale Untersuchungen in der Eisenerzlagerstaette “Pico de Itabira” bei Itabirito, Minas Gerais, Brasilien. Clausthaler Geowissenschaftliche Dissertationen, **9**:302p.

Rosière, C.A. & Chemale Jr., F. 2000. Itabiritos e Minérios de Ferro de Alto Teor do Quadrilátero Ferrífero – Uma visão geral e discussão. *Geonomos*, **8(2)**:27-43.

Rosière, C.A., Siemes H., Quade H., Brokmeier H.G., Jansen E.M., 2001. Microstructure, texture and deformation mechanisms in hematite. *Journal of Structural Geology*, **23**:1429-1440.

Rossi, D. Q. 2014. *Estratigrafia e Arcabouço Estrutural da região de Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. MS Dissertação, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 103p.;

Sant’anna, L.G.1994. *Mineralogia das argilas e evolução geológica da Bacia de Fonseca, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 151 p.

Schorscher, H.D., 1978. Komatiitos na estrutura Greenstone Belt Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *In: 30º Congresso Brasileiro de Geologia*, Recife. Sociedade Brasileira de Geologia, *Boletim de Resumos*, p. 292-293.

Silva, A. M., Chemale Jr F., Kuyumjian R. M., Heaman L., 1995. Mafic Dykes Swarms of Quadrilátero Ferrífero and Southern Espinhaço. *Revista Brasileira de Geociências*, **25(2)**:124-137.

Simmons, G.C., Maxwell, C.H., 1961. O Grupo Tamanduá da Série Rio das Velhas. Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia, *Boletim 211*, 30 p.

Simonson, B., 1987. Early sílica cementation and subsequent diagenesis in arenites from four early Proterozoic iron formations of North America. *Journal of Sedimentary Petrology*, **57(3)**:494-511.

Swaddle, T. W. and Oltmann P., 1980. Kinetics of magnetitemaghemite-hematite transformation with special reference to hydrothermal systems. *Canadian Journal of Chemistry*, **58**:1763- 1772.

Teixeira da Costa, M., 1961. Sedimentação e orogênese da Série de Minas: Ouro Preto, SICEG. *Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos*, **1**:55-61.

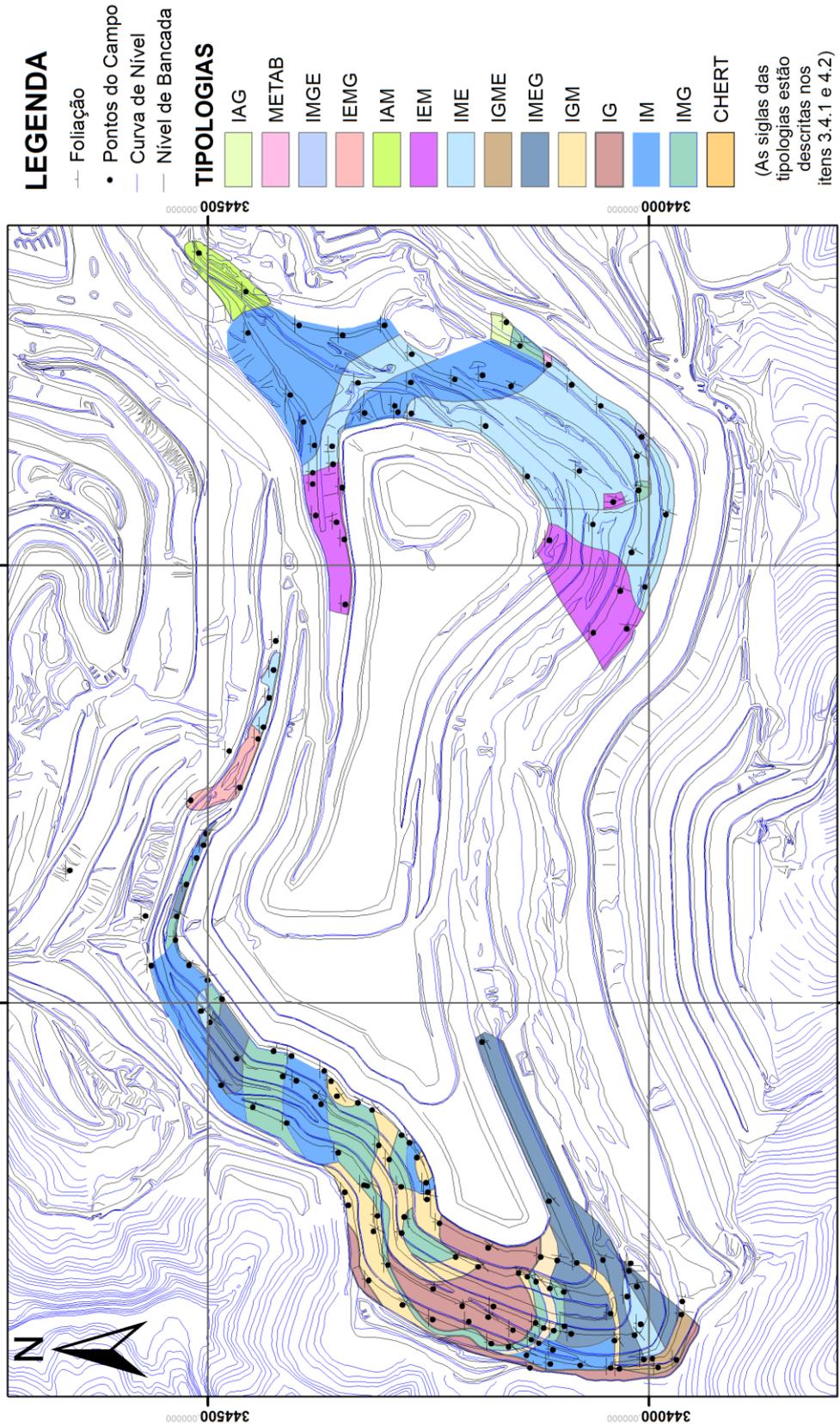
Veríssimo, C. U. V. 1999. *Jazida de Alegria: Gênese e tipologia dos minérios de ferro; Minas 3,4 e 5 – Porção Ocidental*. Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Área de Concentração em Geologia Regional, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro 2vol., 234p.

Zucchetti, M., Baltazar, O.F., Raposo, F.O., 1996. Estratigrafia. *In: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Projeto Rio das Velhas–Texto Explicativo do Mapa Geológico Integrado, escala 1:100.000*. Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM– Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, p. 13–42.

Coelho, P. 2021, Mapeamento Geológico de Detalhe e Caracterização Tipológica do Extremo Sul da Mina de Alegria Sul.

Apêndice 2

Mapa Geológico de Detalhe do Extremo Sul da Mina de Alegria Sul (Cava Sul)



Mapa Geológico em Escala 1:10.000
 Sistema de Coordenadas WGS 1984 UTM ZONE 23S
 metros Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Ouro Preto