

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação e Geologia

Fernando Prudencio Morais

**ESTUDO DOS CONTAMINANTES DO MINÉRIO DE FERRO DA SERRA DO
SAPO, CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO- MG**

Belo Horizonte
2018

Fernando Prudencio Morais

**ESTUDO DOS CONTAMINANTES DO MINÉRIO DE FERRO DA SERRA DO
SAPO, CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO- MG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Rosaline
Cristina Figueiredo e Silva

Coorientador(a): Prof(a). Dr(a). Carlos
Alberto Rosière

Belo Horizonte
2018

M827e
2018

Morais, Fernando Prudencio.

Estudo dos contaminantes do minério de ferro da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro- MG [manuscrito] / Fernando Prudencio Moraes – 2018.

75 f., enc. (principalmente color.)

Orientadora: Rosaline Cristina Figueiredo e Silva.

Orientador: Carlos Alberto Rosière.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2018.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 59-65.

1. Geologia econômica – Conceição do Mato Dentro (MG) – Teses. 2. Petrologia – Conceição do Mato Dentro (MG) – Teses. 3. Geoquímica – Conceição do Mato Dentro (MG) – Teses. I. Figueiredo e Silva, Rosaline Cristina. II. Rosière, Carlos Alberto. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 553(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Estudo dos Contaminantes do Minério de Ferro da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro- MG

FERNANDO PRUDENCIO MORAIS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA ECONÔMICA E APLICADA.

Aprovada em 14 de agosto de 2018, pela banca constituída pelos membros:

Profa. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva - Orientadora
UFMG

Prof. Paulo Roberto Gomes Brandão
UFMG

Prof. Fernando Rosa Guimarães
Angloamerican

Belo Horizonte, 14 de agosto de 2018.

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaborarão com a preparação deste trabalho e em particular. Aos meus pais, pois sempre estiveram ao meu lado me dando força e me ajudando sem medir esforços.

A minha amiga e namorada Thaisa Xavier, pelo apoio, compreensão e carinho que sempre me deu.

Aos meus irmãos Fabia e Flavio muito obrigado pelo carinho que sempre me deram.

À minha orientadora Profa. Dra. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva pela oportunidade, apoio, dedicação, incentivo e paciência.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Carlos Alberto Rosière.

À Anglo American, pelo apoio financeiro e disponibilização de mapas e dados fornecidos em especial ao Geraldo Sarquis

A todos os funcionários e colegas das equipes de curto prazo de Planejamento de mina, geologia e controle de qualidade e processo, em especial a equipe de Geologia.

Agradeço a Amanda pela disponibilidade dos dados.

Ao colega Itamar Daniel Delbem pelo auxílio na interpretação dos dados do MLA.

Muito obrigado!

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade identificar as formas e os principais minerais contaminantes responsáveis pelos altos teores de Al e P que ocorrem em associação com os itabiritos da Serra do Sapo. O depósito está localizado na região da Serra do Espinhaço, no município de Conceição do Mato Dentro em Minas Gerais, se estendendo aproximadamente por 12 km na direção N-S, sendo a continuidade física das importantes formações ferríferas bandadas-FFB da Serra da Serpentina.

A geologia do depósito é formada por um conjunto de rochas metassedimentares pertencentes às unidades estratigráficas do Grupo Serra da Serpentina, compostas por arenitos, filitos, xistos, formações ferríferas, rochas carbonáticas e vulcânicas. Os itabiritos são descritos como parte da Formação Serra do Sapo, unidade superior da sequência, sobrepostos aos xistos e filitos da Formação Meloso. Formações ferríferas com alto teor de alumínio e fósforo ocorrem no contato com os xistos da unidade basal e quartzitos da Formação Serra do Sapo. Estes contatos são tectônicos e gradacionais e geram uma rocha bandada, com níveis milimétricos a centimétricos contendo grande concentração de óxido de ferro, principalmente hematita. Esta litologia tem uma textura sedosa e ocorre sempre decomposta, friável, sendo descrita como hematita-quartzo-mica xistos ou classificada como Itabirito com alto teor de contaminantes – IFX. A classificação dos itabiritos é feita de acordo com o grau de decomposição intempérica. Formações ferríferas bandadas classificadas como Itabiritos - IT (rocha sã), e que também apresentam altos teores de fósforo como contaminante são classificadas como ITX – Itabirito com alto teor de fósforo.

Estudos petrográficos identificaram moscovita, clorita e gibsita como sendo as principais fontes de alumínio para as amostras de IFX. Os altos teores de Al_2O_3 e P_2O_5 destes litotipos também são explicados pelo processo de formação supergênica, onde o espaço dos minerais lixiviados é preenchido por clorita e gibsita. Para o ITX os altos teores de fósforo estão relacionados com minerais de apatita que ocorrem com maior frequência neste litotipo. A presença de cristais de turmalina, alinhados e inter crescidos entre as microfraturas dos grãos de quartzo sugerem uma origem hidrotermal para a formação destes minerais nos itabiritos.

Dados geoquímicos de rocha total mostram que as amostras de IFX quando normalizadas ao PAAS mostram-se enriquecidas em ETR leves se comparadas aos outros itabiritos. Estas amostras também são enriquecidas em elementos móveis como Ba e Sr. Isso indica que o enriquecimento é devido à mobilidade dos ETR leves em um ambiente intemperizado sem ETR pesados.

Os estudos feitos no MLA mostram para o ITX uma menor quantidade de hematita (33,8%) e uma grande quantidade de grãos de quartzo (64,24 %). Para todos os intervalos granulométricos deste litotipo o quartzo se mostrou o principal mineral de ganga. Apatita e goetita apesar de ocorrerem em pequena proporção são os principais minerais portadores de fósforo. Para o IFX os principais minerais de ganga são o quartzo (22,25%) e a moscovita (14,23%) e clorita destacando a presença de clinocloro. $(Mg, Fe^{2+})_5Al (Si_3Al) O_{10}(OH)_8$, em concentrações maiores, juntamente com a moscovita e a gibsitita aparecem como os principais minerais de Al.

Palavras-chave: Serra do Sapo, Petrografia, Formação Ferrífera, Geoquímica, MLA

ABSTRACT

This work aims to identify the forms and the main contaminating minerals responsible for the high levels of AL and P that occur in association with the itabirites of Serra do Sapo. This deposit is located in the Serra do Espinhaço region, in Conceição do Mato Dentro in Minas Gerais- Brazil. It is extending approximately 12 km in the NS direction, being the physical continuity of the important Serra da Serpentine Banded Iron formations (FFB). The geology of the deposit is former by a set of metasedimentary rocks belonging to the stratigraphic units of Serra da Serpentina Group, composed of sandstones, phyllites, shales, iron formations, carbonates and volcanic rocks. The itabirites are describe as part of the Serra do Sapo Formation, superior unit of the sequence, superposed to the schists and phyllites of the Meloso Formation. Iron formations with a high content of aluminum and phosphorus occur in contact with the schists of the basal unit and quartzites of the Serra do Sapo Formation. These contacts are tectonics and gradational generate a banded rock, with millimeter to centimetric levels containing high concentration of iron oxide, mainly hematite. This lithology has a silky texture and always occurs decomposed, friable, being describe as hematite-quartz-mica schists or classified as Itabirite with high content of contaminants - IFX. The classification of itabirites is according to the degree of weathering of the rock. Banded iron formations classified as fresh rock (IT) that also present high levels of phosphorus as contaminants and is classify as ITX - Itabirite with high phosphorus grade.

Petrographic studies identified muscovite, chlorite and gibbsite as the main sources of aluminum for IFX samples. The high Al_2O_3 and P_2O_5 grades of these lithotypes are also explained by the supergenic formation process, where the space of the leached minerals is filled by chlorite and gibbsite. For ITX the high levels of phosphorus are related to apatite minerals that occur more frequently in this lithotype. The presence of tourmaline minerals, aligned and inbred between the microfractures of the quartz grains suggest a hydrothermal origin for these mineral formations in the itabirites.

Geochemical data shows that IFX samples when normalized to PAAS are enriched in LREE compared to the other itabirites. These samples are also enriched in moving elements such as Ba and Sr. This indicated that the enrichment is due to the mobility of the LREE in an environment weathered without heavy REE.

The studies done in the MLA indicated for the ITX a lower amount of hematite (33.8%) and a great quantity of quartz grains (64.24%). For all the granulometric intervals of this lithotype, the quartz was the main gangue mineral. Apatite and goethite, although occurring in a small proportion, are the main minerals bearing phosphorus. For the IFX the main gangue minerals are quartz (22.25%) and muscovite (14.23%) and chlorite with most clinocllore (Mg, Fe²⁺)₅Al(Si₃Al) O₁₀(OH)₈, in larger concentrations, together with muscovite and gibbsite appear as the main Al minerals.

Key -Words: Serra do Sapo, Petrography, Iron Formations, Geochemistry, MLA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geológico da Serra do Espinhaço Meridional mostrando a localização da Serra do Sapo. Modificado de Knauer & Grossi-Sad 1997, CPRM 2004, Lobato et al.2005.	18
Figura 2 -Mapa geológico regional da porção centro sul da borda leste da Serra do Espinhaço Meridional mostrando a divisão estratigráfica proposta para as rochas sedimentares da região (Rolimet al., 2016).....	21
Figura 3 – Mapa geológico das áreas principais da mina, mostrando a distribuição das rochas da Formação Serra do Sapo onde se localizam os itabiritos.	22
Figura 4 - Fotos das três principais classificações descritas para a formação ferrífera de acordo com grau de imtemperismo das rochas nos afloramentos e no testemunho de sondagem (A) afloramento de Itabirito friável, IF, com passagens centimétricas de veio de quartzo, (B) testemunho de itabirito friável após a sondagem, mostrando o alto grau de decomposição supergênica da rocha, (C) Afloramento de itabirito semi-friável, ISF, em corte de estrada indicando o ângulo de foliação das rochas (D); Testemunho de sondagem mostrando a estruturação do itabirito semi friável (D); Itabirito,IT, estruturado, indicando o aumento do ângulo de foliação em algumas regiões da mina (E); Foto do testemunho de sondagem do itabirito mostrando a forte estruturação da rocha e as alternâncias centimétricas dos níveis de sílica e óxido de ferro.	25
Figura 5 - Afloramentos com presença de hematita; (A) Bloco métrico de hematita; (B) Testemunho de sondagem mostrando níveis de hematita entre os itabiritos; (C) Afloramento de hematita próximo ao topo da Serra do Sapo.	26
Figura 6 -Diferentes formas de ocorrência dos itabiritos com alto teor de contaminantes, IFX, na região da mina. (A) Foto mostrando contato entre o xisto da unidade basal e o IFX; (B e C) O IFX ocorrendo em contatos gradacionais com os itabiritos e em intercalações entre o itabirito e níveis de hematita	27
Figura 7 – Mapa contextualizando as principais unidades aflorantes da borda leste da Serra do espinhaço meridional (Modificado de Rolim et al, 2016) e Mapa geológico das áreas principais da mina, mostrando a distribuição das litologias da Formação Serra do Sapo, e classificação dos itabiritos. Projeção UTM, Datum sad 69 23S.	33
Figura 8 - Fotos das três principais classificações dos itabiritos de acordo com grau de imtemperismo das rochas nos afloramentos e no testemunho de sondagem (A) afloramento de Itabirito friável, IF, com passagens centimétricas de veio de quartzo, (B) testemunho de itabirito friável após a sondagem, mostrando o alto grau de decomposição supergênica da rocha, (C) Afloramento de itabirito semifriável, ISF, em corte de estrada indicando o ângulo de foliação das rochas (D); Testemunho de sondagem mostrando a estruturação do itabirito semi friável (D); itabirito,IT, estruturado, indicando o aumento do ângulo de foliação em algumas regiões da mina (E); Foto do testemunho de sondagem do itabirito mostrando a forte estruturação da rocha e as alternâncias centimétricas dos níveis de sílica e óxido de ferro.	35
Figura 9 – Afloramento de hematita friável (HM) no contato com o itabirito na base e o capeamento laterítico (Canga).....	36
Figura 10 -Diferentes formas de ocorrência dos itabiritos com alto teor de contaminantes, IFX, na região da mina. (A) Foto mostrando contato entre o xisto da unidade basal e o IFX; (B e C) O IFX ocorrendo em contatos gradacionais com os itabiritos e em intercalações entre o itabirito e níveis de hematita	37

Figura 11 - Fotomicrografia: (A) Níveis contendo cristais aciculares de hematita microlamelar (Hml). Luz refletida; Nicóis paralelos; aumento de 100X; amostra FL001 (B) Cristais de martita (Mtt) descritos na amostra FD37- 128.25 a 128.35. Luz transmitida aumento de 500X (C) Cristais de turmalina (Tur) descritos na amostra FD37- 128.25 a 128.35. Luz transmitida aumento de 500X (D) Cristal de martita (Mtt) contendo relictos de Kenomagnetita (Kmag). Luz refletida; Nicóis cruzados; aumento de 500X; (E) Muscovita (Musc) descrita na amostra FD18- 114.32 a 114.38; Nicóis cruzados; Luz transmitida aumento de 500X. (F) Aspecto dos cristais cor marron, aciculares de akaganeita (Akag) orientados descritos na amostra FD18- 89.25 a 89.35.Luz transmitida; Nicóis cruzados aumento de 100X. (G) Clorita (Chl) intercrescida entre os cristais de quartzo descrita na amostra FD37- 128.25 a 128.35. Luz transmitida aumento de 500X. (H) Cristal de zircão (Zir) inserido entre os níveis de minerais opacos da amostra FD 46-201.85 a 202.01. Luz transmitida, aumento de 100X. 41	
Figura 12 - Fotomicrografia: (A) Cristal de anfibólio(Anf) entre os níveis de hematita. Luz transmitida; Nicóis cruzados; aumento de 100X; amostra FD46_82.32 a 82.44. (B) Níveis de hematita micro lamelar(Hml) alternado aos níveis ricos em quartzo. Luz refletida; Nicóis cruzados; aumento de 100X; FD46_82.32 a 82.44. (C) Cristal de muscovita (Musc) alongado, orientado segundo o bandamento e cortado pelos níveis de hematita (Hem). Nicóis cruzados. Luz refletida; aumento de 100X; amostra FD46_82.32 a 82.44. (D) Cristal bem desenvolvido de apatita (Apt). Luz refletida; Nicóis cruzados; aumento de 100X; FD46_31.26 a 31.36. (E) Cristais finos com orientação caótica de sericita entre os níveis ricos em quartzo. Aumento de 100X. Luz transmitida; nicóis cruzados; FD46_31.26 a 31.36. (F) Cristais finos de turmalina (Tur) subcrescido entre os cristais grossos de quartzo na amostra 31.26 a 31.36. Luz transmitida aumento de 500X.(G) cristais de clorita (Chl) entre os cristais de hematita. Nicóis paralelos; Luz transmitida aumento de 500X. (H) óxido de manganês (Mang) e raro cristal de granada (Grn). Nicóis paralelos;Luz transmitida; aumento de 500X. amostra FD46 31.26 a 31.36..... 42	
Figura 13 - Imagem BSE (A) Cristal de zircão (Zir) entre os minerais de hematita (B) Mapeamento químico identificando a presença do zircão entre os minerais. (C) Grão de gibbsita (Gib) entre os minerais que compõe a amostra. (D) Cristal identificado com cromo na composição sugerindo a presença de um possível mineral de espinélio..... 43	
Figura 14 - Concentração de elementos maiores (A) Diagrama de concentração de elementos maiores para as amostras de IFX; (B) Diagrama de concentração de elementos maiores para as amostras de ITX. 46	
Figura 15 - Elementos traços discriminando os elementos detríticos, de transição e hidrotermais; (A) Diagrama de concentração de elementos traços para as amostras de IFX; (B) Diagrama de concentração de elementos traços para as amostras de ITX. 48	
Figura 16 - Elementos Terras Raras (ETR) normalizado ao padrão Post-Archean average Australian Shale (PAAS) (A) Diagrama de ETR normalizado ao PAAS para as amostras de IFX; (B) Diagrama de ETR normalizado ao ao PAAS para as amostras de ITX. 50	
Figura 17 - Elementos Terras Raras (ETR) normalizados ao Condrito (A) Diagrama de ETR normalizado ao Condrito para as amostras de IFX; (B) Diagrama de ETR normalizado ao Condrito para as amostras de ITX 51	
Figura 18 - Comparativo de elementos maiores para as amostras de IT, ISF e IF (Pires e Souza, 2014) e as amostras de formação ferrífera contaminada IFX e ITX. 52	
Figura 19 - Comparativo de elementos traço para as amostras de IT, ISF e IF (Pires e Souza, 2014) e as amostras de IFX e ITX 53	
Figura 20 - Exemplo do processo de desaglomeração; a) Imagem original BSE; b) Depois da remoção do fundo (Background), notando a presença de aglomerados; c) Partículas de aglomerados realçada; d) depois da desaglomeração, o aglomerado de partículas é dividido em 6 partículas, uma delas é realçada para identificar a desaglomeração (GU, 2003). 61	

Figura 21- Representação apresentando liberação de partículas aparentemente idênticas, mas trama diferentes. (Pirard et al, 2007).....	62
Figura 22- Associação dos minerais que compõem as amostras de IFX (A) (Amostras SEFDSP 46 300µm;212 µm;150 µm;74 µm; 53 µm; -38 µm) e ITX (B) (Amostras SEFDSP 37 212 µm; 74 µm e SEFDSP18 150 µm; 53 µm)	65
Figura 23 – Diagrama de liberação dos óxidos de ferro por composição de partícula. (A) Amostras de IFX e (B) amostras de ITX.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Código utilizado para nomear as diferentes variações dos itabiritos.....	27
Tabela 2 – Código utilizado para nomear as diferentes variações dos itabiritos.....	37
Tabela 3 - Tabela mostrando as amostras e os furos de sonda onde foram descritas e coletadas as amostras.....	38
Tabela 4 - Tipos de óxidos de ferro classificados segundo a definição de Hagemann et al. (2008).	39
Tabela 5 - Resultado da análise química das amostras de Itabirito (ver tab. 2).....	44
Tabela 6 – Composição mineralógica das amostras de IFX (MEV/MLA)	66
Tabela 7 – Composição mineralógica das amostras de ITX (MEV/MLA)	66

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 APRESENTAÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.3 MATERIAIS E MÉTODOS	14
1. <i>Revisão Bibliográfica</i>	14
2. <i>Trabalho de Campo</i>	15
3. <i>Petrografia</i>	15
4. <i>Análises Químicas de Rocha total</i>	15
5. <i>Análises utilizando o sistema Mineral Liberation Analyser (MLA)</i>	16
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	16
2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA AREA DE ESTUDO	17
2.1 GEOLOGIA REGIONAL	17
2.1.1. <i>Grupo São José</i>	19
2.1.2. <i>Grupo Serra da Serpentina</i>	20
2.2 GEOLOGIA LOCAL	21
2.2.1. <i>Complexo Basal</i>	23
2.2.2. <i>Filitos e Xistos da Formação Meloso</i>	23
2.2.3. <i>Formações ferríferas da Formação Serra do Sapo</i>	24
3. ESTUDOS DE PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA DE ROCHA TOTAL	30
4. CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO NO MLA	60
4.2.1. <i>Identificação das amostras analisadas</i>	63
4.2.1.1. <i>Amostras de hematita e magnetita</i>	63
4.2.1.2. <i>Goetita</i>	64
4.2.1.3. <i>Clorita</i>	64
4.2.1.4. <i>Moscovitas</i>	64
4.2.2. <i>Composição Mineralógica</i>	64
4.2.3. <i>Estudo do grau de liberação das amostras</i>	66
5. CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS	70

ERRATA

MORAIS, Fernando Prudencio. **ESTUDO DOS CONTAMINANTES DO MINÉRIO DE FERRO DA SERRA DO SAPO, CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO- MG** 2018. 65f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Página	Linha	Onde se lê	Leia-se
52	11	presena	presença
58	2	suergênicos	supergênicos

1. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O depósito mineral da Serra do Sapo está localizado na região da Serra do Espinhaço, mais precisamente na sua porção meridional e é caracterizado pela presença de espessos pacotes de formação ferrífera bandada com alternância de quartzitos finos e micáceos, sericita xistos, contendo gradações locais para filito e filito carbonoso, filos silicatos e metaconglomerados. Estes contatos são todos tectônicos e gradacionais dificultando a caracterização e separação dos limites entre as litologias, especialmente de alguma de suas intercalações onde ocorre um aumento dos níveis de hematita, filossilicatos e diminuição dos níveis de sílica das rochas. Vários estudos têm sido realizados com o objetivo de estabelecer métodos de redução e remoção de impurezas em minérios de ferro, e. g. Schulze, D.G. and Schwertmann, U. (1987); Stanjek, H. and Schwertmann, U. (1992); Santos, L.D. Brandão, P.R. G. (2002). Para tanto, são necessários estudos de investigação da forma em que estas impurezas ocorrem nos minérios. A caracterização de minérios é uma etapa fundamental para o aproveitamento de recursos minerais de forma otimizada, o que fornece subsídios mineralógicos e texturais necessários para etapas de beneficiamentos. Análises químicas e mineralógicas, bem como separação por líquido denso, são consideradas eficazes na caracterização dos produtos de minérios e de diversas separações (Silva, 2009).

O fósforo apresenta um efeito indesejável no ferro gusa e aço causando o aparecimento de fissuras e a fragilidade a frio. Por este motivo a quantidade deste elemento principalmente no aço está diretamente ligada ao teor presente no minério de origem.

A remoção de alumínio também é desejável, podendo tornar viável o aproveitamento econômico de jazidas com altos teores destes elementos.

Partindo destes conhecimentos sobre a relação de contato entre a formação ferrífera bandada, os metassedimentos e as rochas máficas intrusivas que compõem a Serra do Sapo foi realizado o estudo de caracterização com o objetivo de identificar as formas em que o fósforo e o óxido de alumínio ocorrem em associação com o minério de ferro deste depósito mineral.

A dissertação insere-se em projeto Cooperação Técnica para mapeamento geológico e caracterização mineralógica, mineraloquímica e morfológica dos componentes dos diferentes

tipos de minério da Serra do Sapo e Itaponhoacanga entre UFMG-FUNDEP (Fundação de Desenvolvimento a Pesquisas) e a empresa Anglo American Minério de Ferro Brasil – IOB.

1.2 OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho incluem:

- ✓ Confecção de um texto sobre a caracterização mineralógica e estudos geoquímicos dos itabiritos com alto teor de P e Al do depósito de ferro da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro-MG.
- ✓ Realizar estudos geoquímicos de rocha total através das amostras dos diferentes tipos de itabiritos que ocorrem no depósito.
- ✓ Comparar os resultados químicos das amostras de itabiritos com alto teor de Al e P com os demais tipos de itabiritos do depósito mineral.
- ✓ Realizar um trabalho de caracterização mineralógica utilizando o sistema *Mineral Liberation Analyser* – MLA.

A partir deste estudo pretende-se identificar as formas e os principais minerais contaminantes responsáveis pelos altos teores de Al e P que ocorrem em associação com os itabiritos da Serra do Sapo.

1.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado a partir de uma série de atividades, as quais incluíram as seguintes ações:

1. *Revisão Bibliográfica*

Realizou-se revisão bibliográfica prévia sobre o tema apresentado, que inclui trabalhos publicados sobre o contexto geológico e a caracterização mineralógica das rochas que compõem a porção meridional da Serra do Espinhaço desde trabalhos clássicos, trabalhos técnicos, teses e dissertações, relatórios de estágio supervisionados até artigos mais atuais.

Esta atividade foi mais intensa no início do desenvolvimento da pesquisa, mas foi realizada em todo o período de realização do trabalho.

2. Trabalho de Campo

A etapa de campo foi realizada no município de Conceição do Mato Dentro e inicialmente, foi realizada uma pesquisa entre os resultados químicos da base de dados das amostras de sondagem da empresa Anglo American e identificado a localização dos itabiritos com alto teor de fósforo e alumínio na formação ferrífera.

Posteriormente foram selecionadas amostras de 4 furos de sondagem para confecção de lâminas petrográficas. Uma amostra de frente de lavra também foi incluída entre as amostras de testemunho e usada para ser analisada e descrita petrograficamente.

3. Petrografia

A partir da seleção das amostras foram confeccionadas 29 lâminas delgadas polidas, descritas em microscópio de luz transmitida e refletida LEICA, modelo DM2500P, no Laboratório de Metalogenia do CPMTC, com ocular de 10X e objetivas de 2,5X, 5X, 10X, 20X e 50X. As análises petrográficas foram ilustradas por fotomicrografias em câmera LEICA, modelo DFC295.

Amostras descritas na petrografia foram selecionadas e serem analisadas na Quanta 3D Dual FIB do Centro de Microscopia Eletrônica da UFMG por apresentarem quantidades significativas de minerais acessórios associados às formações ferríferas do depósito mineral da Serra do Sapo.

4. Análises Químicas de Rocha total

Dados de geoquímica de rocha total foram obtidos na Bureau Veritas Commodities Canada Ltd, onde foram analisadas 10 amostras pelos métodos de análise quantitativa ICPS – ES (Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometric) e ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometric), e digestão de 0,5g sedimento em água régia a temperatura de 90°C durante 2.5 horas, sendo estes os principais métodos quantitativos que fornecem dados adequados para traçar diagramas de classificação de rocha total e estudos de relação de elementos químicos.

Os dados de elementos terras-raras foram normalizados ao PAAS - Post-Archean Australian Shale - de McLennan (1989) e condrito de Taylor & McLennan (1985).

5. *Análises utilizando o sistema Mineral Liberation Analyser (MLA)*

Para a preparação das amostras foram confeccionadas seções polidas utilizadas no sistema MLA. Estas amostras foram britadas e peneiradas a 1,00 mm, caso mais de 25% do material ficasse retido na peneira, a parte não passante retornava ao britador. Posteriormente as amostras foram homogeneizadas e quarteadas para passarem pelo peneiramento a seco utilizando as malhas de 4,00 mm, 3.35 mm, 2.36 mm, 1,7mm, 1.18mm, 600µm e 500 µm. Em seguida o restante das amostras passou por um novo peneiramento a úmido com as malhas 425 µm, 300 µm, 212 µm, 150 µm, 106 µm, 74 µm, 53 µm e -38 µm. Todo material peneirado a úmido foi levado a estufa e em seguida cada material de cada fração foi pesado separadamente.

A partir da britagem das amostras foram confeccionadas 10 amostras de seção polida de diferentes frações granulométricas a partir de 3 diferentes amostras dos testemunhos de sondagem. Cada amostra de seção polida foi confeccionada a partir de um diferente intervalo granulométrico, assim, para a amostra de IFX do furo SEFDSP 46 foram confeccionadas e analisadas seções nas frações 300 µm, 212 µm, 150 µm, 74 µm, 53 µm e -38 µm. Para o ITX foram feitas e inseridas no sistema MLA seções nas frações, 212 µm, 74 µm para a amostra do furo SEFDSP 37 e 150 µm, 53 µm para a amostra do furo SEFDSP 18.

Todo processo de revestimento das amostras por carbono foi realizado no Centro de Microscopia da UFMG, assim como, os estudos de química mineral a partir da técnica de microscopia eletrônica de varredura associada a espectrometria de raios-X por dispersão de energia (EDS-Energy Dispersive Spectrometry), e a análise do grau de liberação Mineral (MLA).

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A configuração deste trabalho foi elaborada dividindo-se o tema de estudo em partes, as quais são organizados os dois primeiros capítulos em texto corrido e o terceiro capítulo em artigo científico a ser submetido a revista científica especializada de geociências. O quarto capítulo é parte de um artigo em preparação e o quinto discorre sobre as conclusões do estudo.

Mesmo considerando a opção de apresentação na forma de artigos, ressalta-se que, foi realizado no desenvolvimento deste trabalho todo o método tradicional de elaboração de uma dissertação convencional, tais como revisão bibliográfica, elaboração de capítulo com a caracterização da área de estudo, considerações finais e conclusões.

Para melhor apresentação final da dissertação, os artigos não foram organizados no formato das revistas para as quais serão submetidos. Os artigos foram preparados na forma de texto sequenciado, incluindo a numeração das figuras e referências bibliográficas ao final de cada artigo. Na parte final da dissertação é apresentada uma lista de referências bibliográficas completa, incluindo as citadas nos artigos e todas as citadas nos demais capítulos.

A seguir, é apresentado um guia contendo as informações que estão contidas em cada capítulo:

Capítulo I – Informações e considerações gerais sobre a pesquisa realizada, bem como os métodos de pesquisa, orientações para o trabalho, justificativas, objetivos e organização da dissertação.

Capítulo II – Neste capítulo são apresentados os aspectos do meio físico da região, incluindo contexto geológico regional e geologia do depósito mineral.

Capítulo III – Artigo submetido com resultados de petrografia e estudos obtidos através das análises de geoquímica de rocha total.

Capítulo IV – Neste Capítulo é feito uma revisão geral dos estudos de caracterização mineralógica utilizando o sistema *Mineral Liberation Analyser- MLA* para as amostras de itabiritos com alto teor de Al e P do depósito mineral da Serra do Sapo. Os resultados são ainda preliminares, mas pretende-se submeter um artigo científico.

Capítulo V – Este capítulo descreve as conclusões da dissertação de mestrado.

2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA AREA DE ESTUDO

2.1 GEOLOGIA REGIONAL

A Serra do Espinhaço (Eschwege, 1822) consiste em uma faixa orogênica pré-cambriana que se alonga aproximadamente 1200 km na direção N-S entre as regiões de Belo Horizonte e o estado da Bahia. Chemale et al (2011) descreve a denominação utilizada para a cordilheira considerando a área de ocorrência para seus diferentes segmentos: (i) Espinhaço Meridional se

estendendo de Belo Horizonte até a região 6 de Olhos D'Água (MG); (ii) Serra do Cabral, incluindo a Serra da Água Fria em Minas Gerais; (iii) Espinhaço Setentrional que se inicia na altura do paralelo 17° 30'S, em Minas Gerais, onde a serra ocorre separada e deslocada por aproximadamente 30 km na direção NNE da parte Meridional, com prolongamento contínuo do flanco oriental até o Estado da Bahia; (iv) Chapada Diamantina, distribuindo-se inteiramente na porção centro-oriental da Bahia.

A Serra do Espinhaço Meridional (Figura 1) é constituída essencialmente por litologias do Supergrupo Espinhaço. Pflug (1968) separa a região em oito unidades estratigráficas fundamentais para o Supergrupo Espinhaço Meridional, formações designadas, da base para o topo, de: São João da Chapada, Sopa-Brumadinho, Galho do Miguel, Santa Rita, Córrego dos Borges, Córrego Bandeira, Córrego Pereira e Rio Pardo Grande.

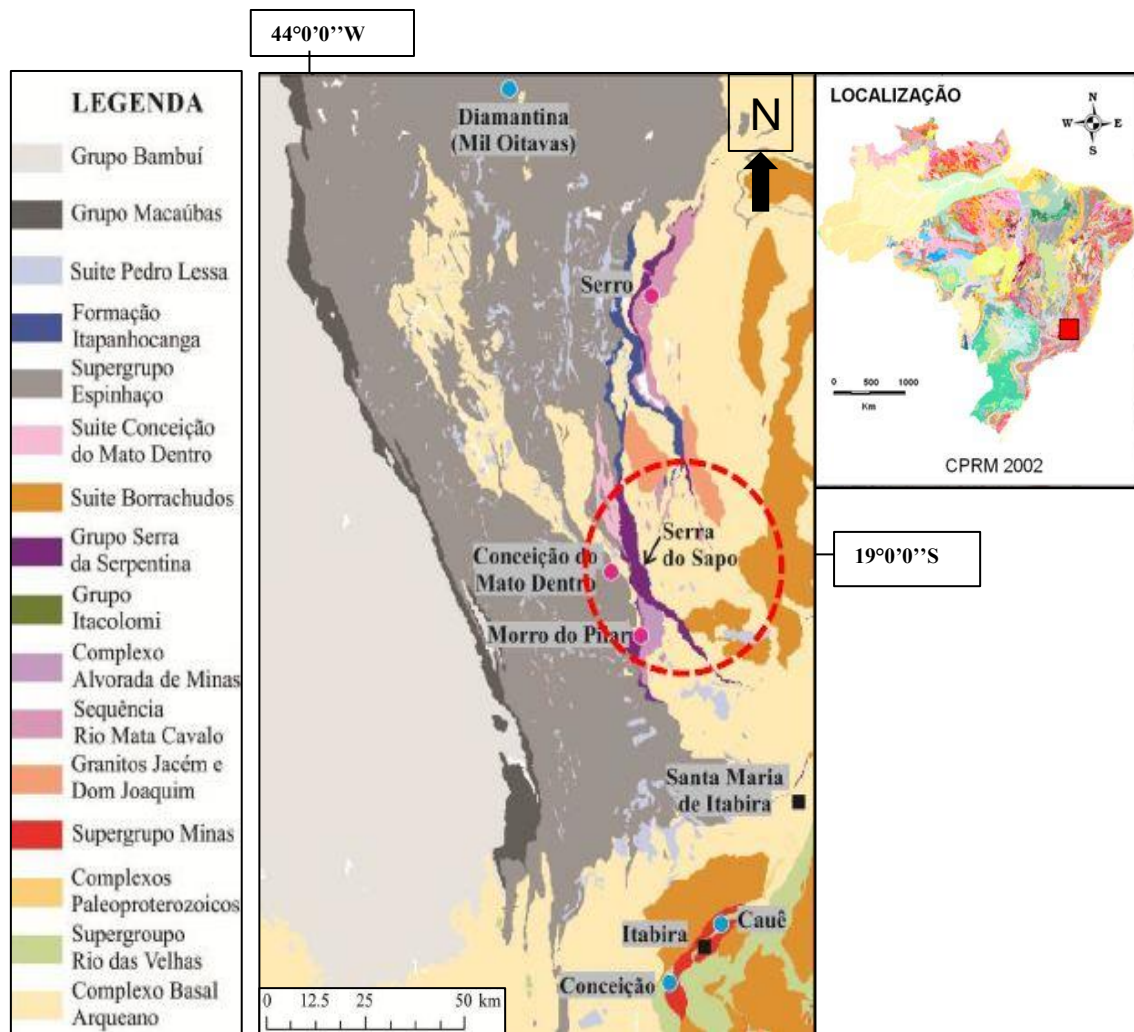


Figura 1 - Mapa geológico da Serra do Espinhaço Meridional mostrando a localização da Serra do Sapo. Modificado de Knauer & Grossi-Sad 1997, CPRM 2004, Lobato et al.2005.

Rolim et al., (2015) descreve as rochas da porção sul da borda leste da Serra do Espinhaço Meridional divididas nos grupos São José e Serra da Serpentina

Neste trabalho adota-se a recente estratigrafia proposta por Rolim et al., (2015), onde as rochas da porção sul da borda leste da Serra do Espinhaço Meridional foram divididas em grupos São José e Serra da Serpentina (Figura 2).

2.1.1. Grupo São José

O Grupo São José (Figura 2) é predominantemente formado por quartzitos localizados na borda leste da Serra da Serpentina divididos da base para o topo em quatro diferentes formações estratigráficas (Rolim et al., 2015): Formação Lapão, Formação Itapanhoacanga, Formação Jacém e Formação Canjica.

A Formação Lapão é constituída de metaconglomerados, quartzito micáceo, quartzito ferruginoso, metacherts, formação ferrífera bandada (FFB), filito negro, dolomito e rara presença de metaconglomerado. Conglomerados oligomíticos com grande presença de seixos arredondados de FFB são comumente presentes. A matriz dos conglomerados varia de uma região a outro podendo ser predominantemente arenosa, apresentando coloração cinza-clara a branca, a regiões ricas em sericita. (Rolim, et al., 2015).

A Formação Itapanhoacanga (Almeida-Abreu e Renger, 2002) é representada por filitos (quartzosos e/ ou grafitosos), e por formações ferríferas maciças ou bandadas (espessuras atingindo até 30 m) com intercalações de metarenitos finos a grossos. Corpos de metaconglomerados podem aparecer associados aos metarenitos, contendo seixos e/ou blocos de quartzitos, quartzo e formações ferríferas

Rochas ígneas sin-sedimentares aparecem como pacotes interestratificados (*sills*) de xistos-verdes, metarriolito e filitos hematíticos.

A Formação Jacém (Almeida-Abreu et al., 1989; Knauer, 1990) é uma sequência de quartzitos com uma persistente laminação plano-paralelo em bandas milimétricas a decimétricas com intercalações de quartzitos micáceos e filitos. Localmente aparecem intercalações de formações ferríferas e metavulcanitos básicos (xistos verdes).

A Formação Canjica (Rolim, et al., 2016) ocorre em afloramentos descontínuos localizados a oeste de Itapanhoacanga, ao norte do Serro e a leste de Conceição do Mato Dentro. Esta unidade

é composta por intercalações métricas de sericita xisto, filitos cinza e quartzitos sericíticos. As BIFs são similares a da Formação Serra do Sapo, com alternância de bandamentos milimétricos a centimétricos de hematita na forma de cristais lamelares, granoblásticos e magnetita.

2.1.2. Grupo Serra da Serpentina

O Grupo Serra da Serpentina, interpretada por Pflug (1965; 1968), se divide em Formação Meloso e Formação Serra do Sapo, sendo a primeira descrita como unidade basal com predominante presença de rochas pelíticas e a segunda como unidade de topo, rica em formação ferrífera bandadas.

O contato das rochas da Formação Meloso (Rolim et al., 2015) com as rochas do Complexo Basal é normalmente mascarado por uma alteração hidrotermal metabásica xistosa e por fraturas sintectônicas preenchidas por veio de quartzo. Lentes de quartzito com espessura métrica a dezenas de metros são encontrados na base da formação com intercalações de quartzo sericita xistos. Os quartzitos podem ser sericíticos ou ricos em ferro e manganês. Quartzo-clorita-sericita xisto que ocorre no topo das camadas de quartzito é o litotipo mais característico da formação podendo alcançar mais de 500 metros de espessura.

Rolim et al. (2015) descrevem as FFBs da Serra do Sapo como sendo de coloração cinza claro a cinza escuro, meso a micro-bandados com intercalações milimétricas a centimétricas de níveis ricos em quartzo e minerais acessórios de clorita, epidoto, grunerita e presença rara de rutilo, alanita, biotita, pirita, calcopirita, apatita e turmalina. A espessura da formação ferrífera pode variar de 80m na região sul da Serra da Serpentina a aproximadamente 350m na região norte. Na Serra do Sapo é comum a presença de intercalações de minerais micáceos nos bandamentos dos FFBs no contato com as rochas da unidade superior da Formação Meloso.

No topo desta unidade ocorre contato descontínuo com os dolomitos do Grupo São José (Rolim et al. 2016) que são apenas observados nos furos de sondagem. Esta rocha tem granulação fina, cor variando de cinza clara a rosa, com presença de brechas milimétricas preenchidas por quartzo, carbonato e hematita.

2.2 GEOLOGIA LOCAL

A geologia do depósito mineral da Serra do Sapo (Figura 3) é formada por um conjunto de metassedimentos compostos por arenitos, filitos, xistos, formações ferríferas e rochas carbonáticas. A evolução geológica da região foi acompanhada pela geração de rochas ígneas vulcânicas e plutônicas.

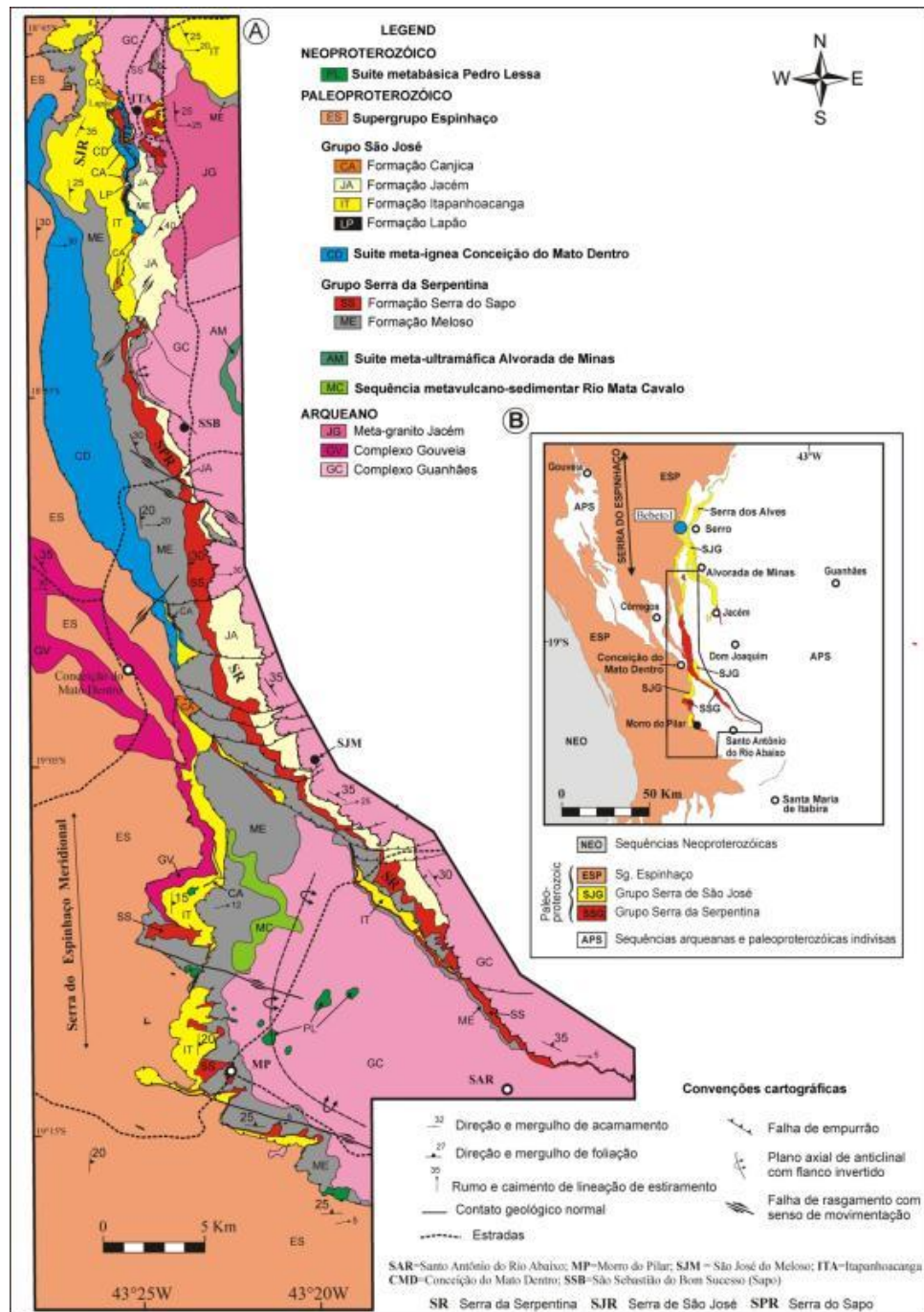


Figura 2 -Mapa geológico regional da porção centro sul da borda leste da Serra do Espinhaço Meridional mostrando a divisão estratigráfica proposta para as rochas sedimentares da região (Rolimet al., 2016).

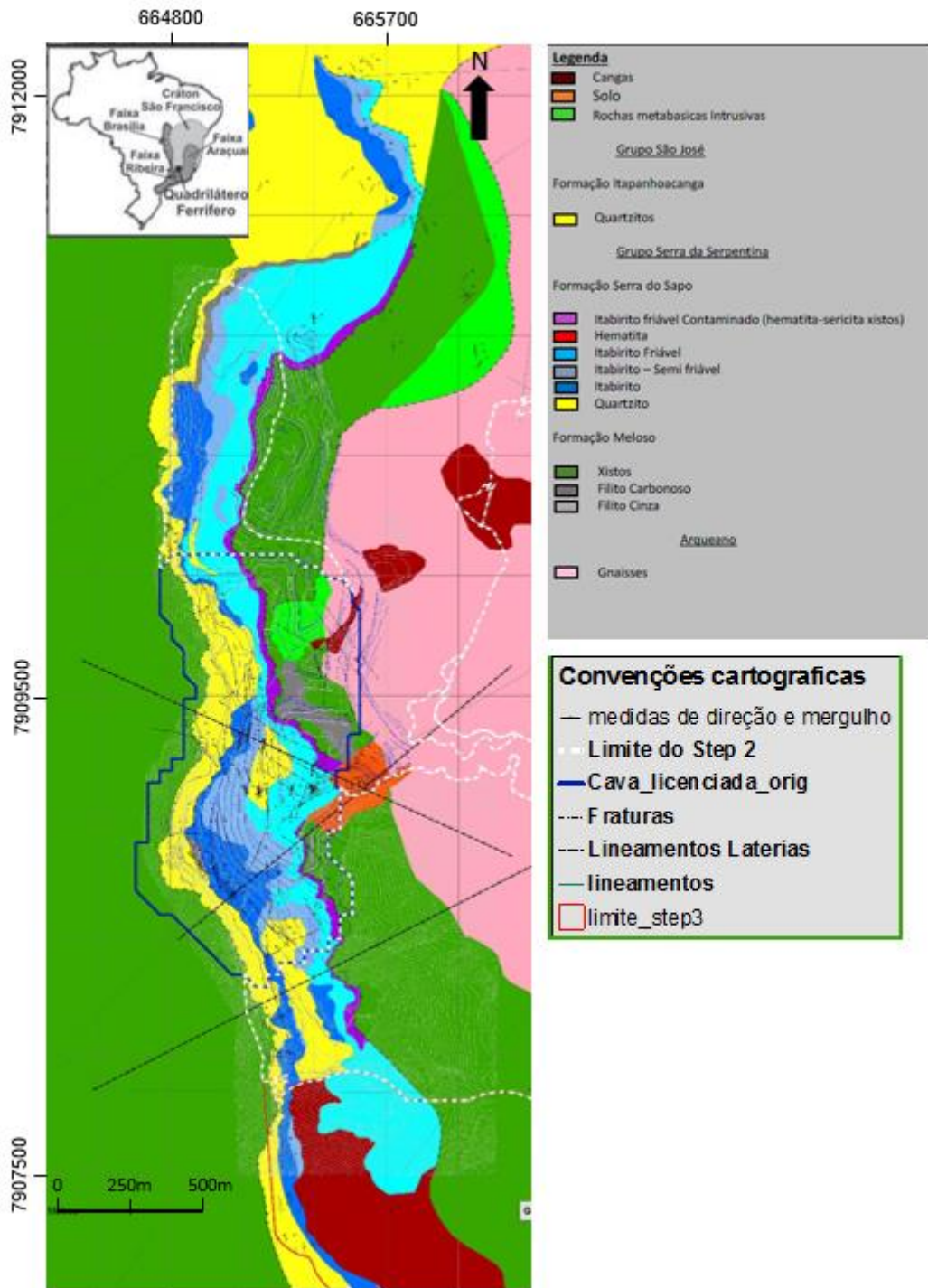


Figura 3 – Mapa geológico das áreas principais da mina, mostrando a distribuição das rochas da Formação Serra do Sapo onde se localizam os itabiritos.

2.2.1. *Complexo Basal*

As rochas do complexo basal são formadas por ortognaisses que ocorrem por toda borda leste da Serra do Sapo em terrenos com suave topografia e afloramentos de corte de estrada onde as rochas ocorrem decompostas, com coloração rosa, granulação fina contendo níveis brancos, argilosos de material caulínico. É possível observar a presença de porfiroclastos de quartzo com no máximo 3 cm de diâmetro inserido em uma suave foliação da rocha. Essa litologia faz contato brusco com as rochas intrusivas máficas da região além dos xistos e filitos da base da sequência estratigráfica.

Nos furos de sondagem estas rochas são descritas como moscovita-biotita gnaisses, com granulação média, textura granoblástica contendo quartzo e feldspato com aproximadamente 1 cm de diâmetro e foliação bem definida. Os veios de quartzo ocorrem dispostos aleatoriamente, assim como níveis com presença de clorita concordante a foliação.

2.2.2. *Filitos e Xistos da Formação Meloso*

Sobrepostos aos gnaisses ocorrem metassedimentos predominantemente meta-argilosos de granulação fina com intercalação de quartzitos que afloram tanto na borda leste quanto na borda oeste da Serra do Sapo. Os filitos, cor cinza, fazem contato brusco com as rochas do complexo basal, ocorrem com textura sedosa e quando decompostos formam um material extremamente argiloso. Na borda oeste do depósito é possível observar afloramentos com presença de cristais milimétricos a centimétricos, euédricos de magnetita. Dentro da jazida estes afloramentos ocorrem com até 15 metros de espessura.

Filitos carbonosos, cor cinza escuro a negro ocorrem de forma descontínua na região leste da serra. Esses filitos tem granulação fina e foliação ondulada marcada por níveis milimétricos de material sericítico concordante a foliação da rocha.

No contato superior dos filitos ocorrem os quartzitos da base da sequência. Esses quartzitos ocorrem com cor variando de vermelho a cinza, sendo geralmente micáceos com grande presença de sericita entre as bandas.

2.2.3. *Formações ferríferas da Formação Serra do Sapo*

No contato da base com a formação ferrífera ocorrem os xistos geralmente na forma de saprolitos total ou parcialmente decompostos, cor variando de amarelo a vermelho contendo cristais de quartzo e xistosidade marcada pela presença de moscovita e sericita. Estes xistos são localmente crenulados e fazem um contato transicional com a mineralização ferrífera gerando níveis de minerais de ferro intercalados com nível de argila contendo teores em ferro em muitos casos superiores aos itabiritos.

As FFBs da Serra do Sapo correspondem a itabiritos, e são classificadas de acordo com o grau de intemperismo e compacidade da rocha (Figura 4). A classificação para o minério de baixo teor divide-se em itabirito friável-IF; itabirito semifriável – ISF e itabirito- IT.

O itabirito friável é uma rocha decomposta, cor variando de cinza a cinza escuro, formada por minerais desagregados decorrente de um estágio final de intemperismo. Em geral esta classificação possui as maiores concentrações de ferro entre os itabiritos. O itabirito semifriável é uma rocha estruturada em um estágio médio de intemperismo, podendo ser facilmente desagregada. Esta classificação possui bandamento marcado por níveis decimétricos a centimétricos de hematita. Nos afloramentos o processo de intemperismo é marcado primeiro pela lixiviação do quartzo e pela presença de moscovita entre os níveis de hematita.

A rocha sã é classificada como itabirito, formada por bandamento marcado pela alternância de níveis milimétricos a centimétricos de hematita e quartzo. Em algumas amostras é possível observar a presença de níveis milimétricos de clorita concordantes a foliação.

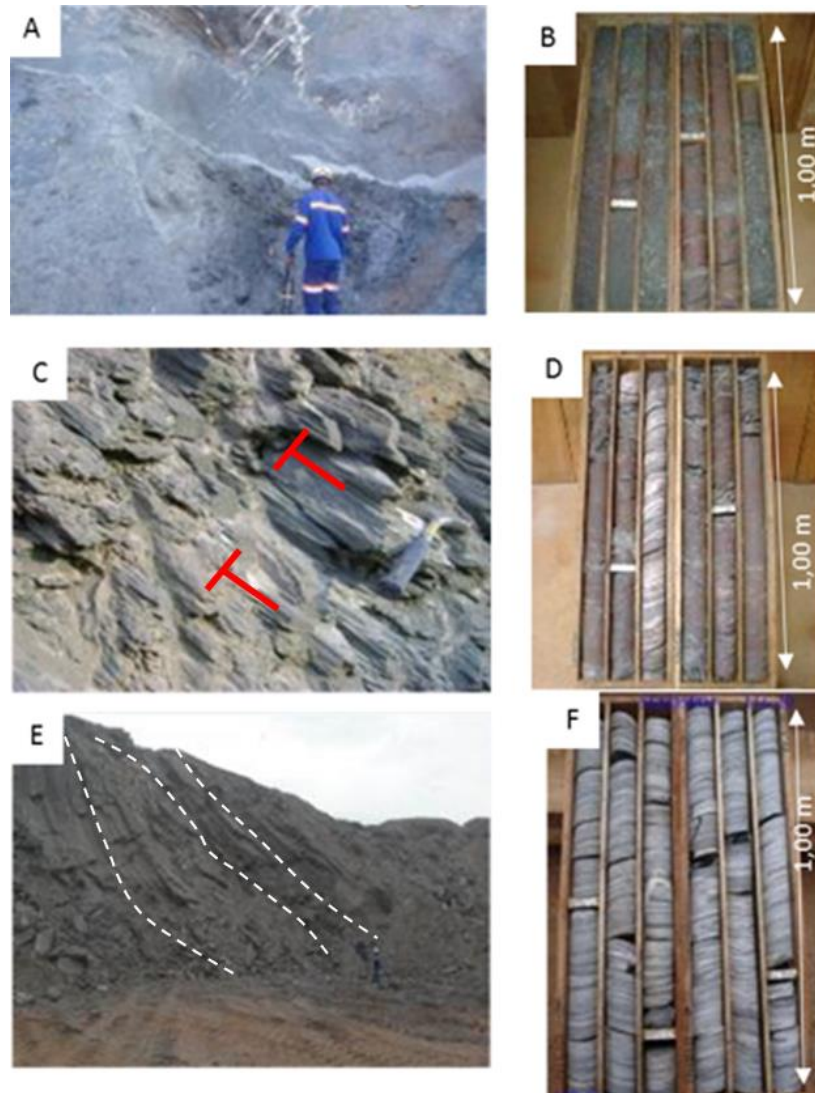


Figura 4 - Fotos das três principais classificações descritas para a formação ferrífera de acordo com grau de intemperismo das rochas nos afloramentos e no testemunho de sondagem (A) afloramento de Itabirito friável, IF, com passagens centimétricas de veio de quartzo, (B) testemunho de itabirito friável após a sondagem, mostrando o alto grau de decomposição supergênica da rocha, (C) Afloramento de itabirito semi-friável, ISF, em corte de estrada indicando o ângulo de foliação das rochas (D); Testemunho de sondagem mostrando a estruturação do itabirito semi friável (D); Itabirito, IT, estruturado, indicando o aumento do ângulo de foliação em algumas regiões da mina (E); Foto do testemunho de sondagem do itabirito mostrando a forte estruturação da rocha e as alternâncias centimétricas dos níveis de sílica e óxido de ferro.

Os minérios com teores de ferro acima de 60% (Figura 5) ocorrem no topo da camada onde a rocha fica enriquecida em minerais de ferro e pobre em quartzo. Esses litotipos também ocorrem na borda lesta da serra através de corpos métricos a decamétricos podendo estar associados a falhamentos. Em alguns casos é possível observar um bandamento milimétrico e veios de quartzo concordantes ou discordante à foliação da rocha. Essas litologias ocorrem com cor cinza escura a cinza azulada e assim como os itabiritos mineralizados são divididos de acordo com o seu grau de intemperismo e denominadas hematita friável ou mole- HM onde os

minerais que compõem essa rocha ocorrem desagregados em um alto grau de intemperismo, e hematita compacta ou dura – HD em geral na base dos itabiritos onde a rocha ocorre estruturada e fresca.

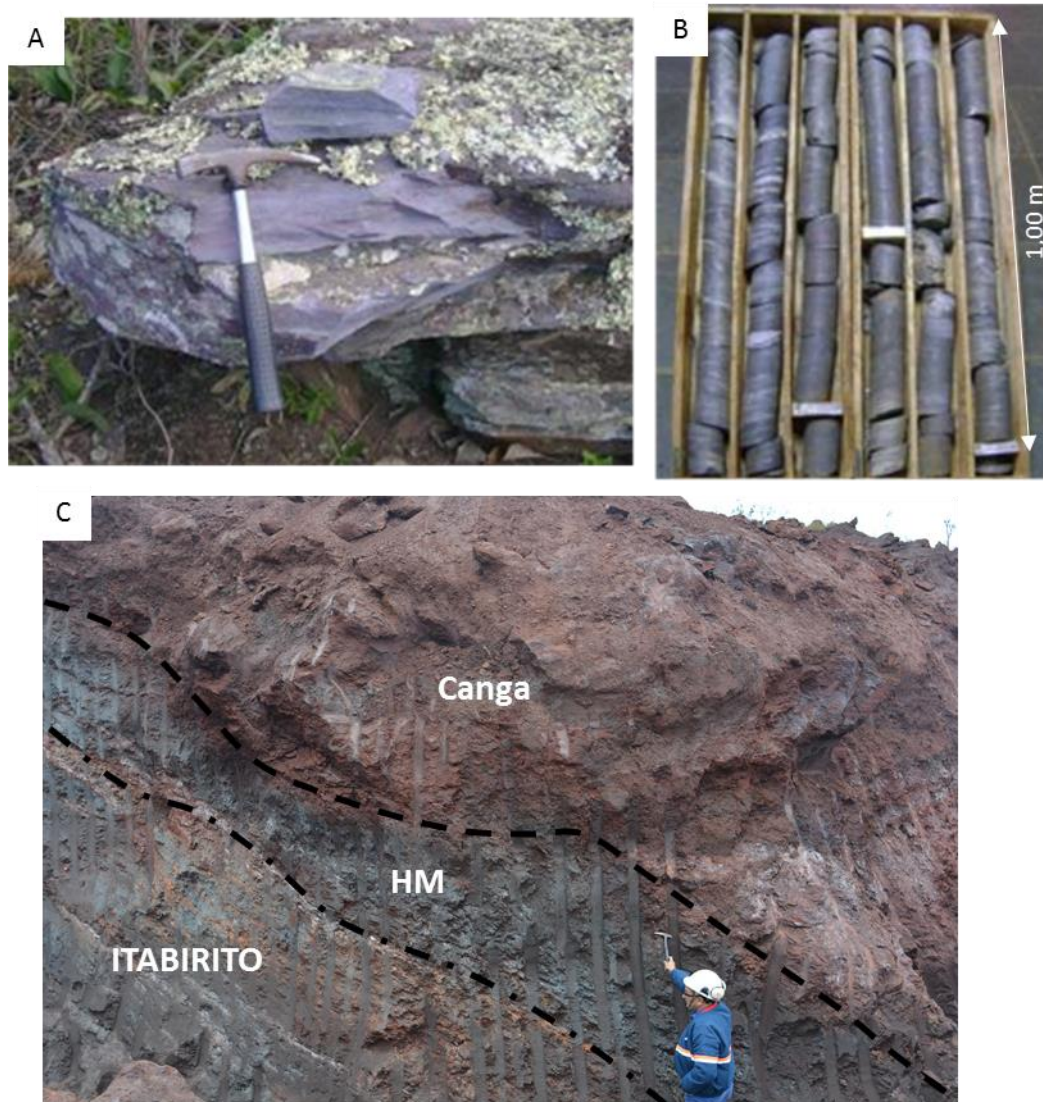


Figura 5 - Afloramentos com presença de hematita; (A) Bloco métrico de hematita; (B) Testemunho de sondagem mostrando níveis de hematita entre os itabiritos; (C) Afloramento de hematita próximo ao topo da Serra do Sapo.

Formações ferríferas com alto teor de alumínio e fósforo ocorrem no contato com os xistos da unidade basal (Figura 6). Estes contatos são transicionais e geram uma rocha bandada, com níveis milimétricos a centimétricos contendo grande concentração de minerais de ferro, principalmente hematita, e níveis milimétricos a centimétricos de argila com cor variando de amarelo a cinza escura. Esta litologia tem uma textura sedosa e ocorre sempre decomposta sendo descritos como hematita-quartzo-mica xistos ou classificados como Itabirito com alto teor de contaminantes – IFX.

Itabiritos previamente classificados como ISF contendo teores elevados de fósforo na sua composição também são classificados como IFX, assim como itabiritos classificados como IT que também apresentam altos teores de fósforo. Essas litologias ocorrem cortadas por veio de quartzo que podem estar concordantes ou discordantes a foliação da rocha.

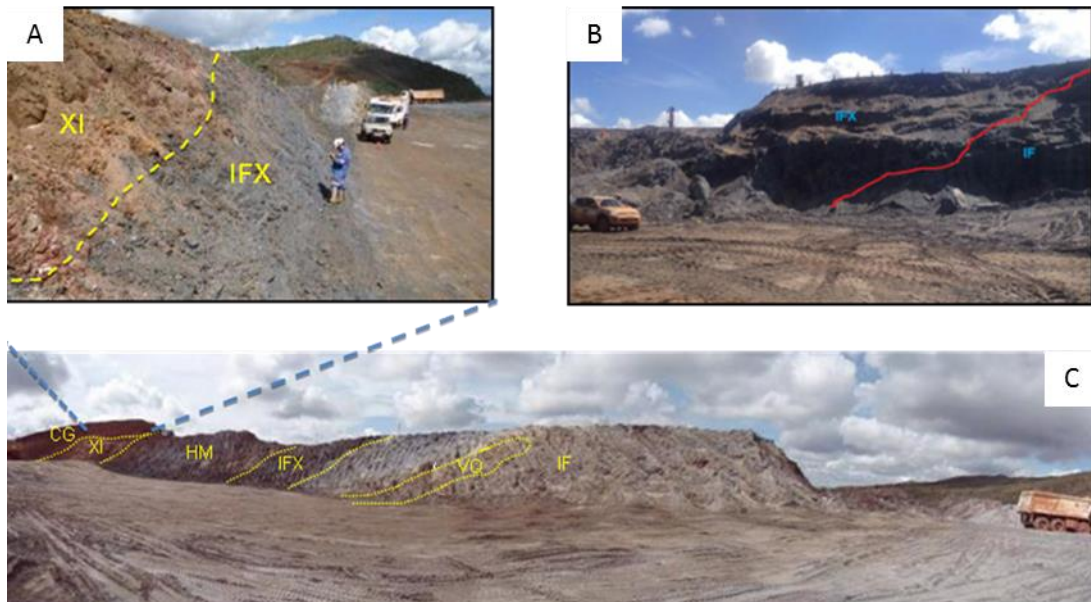


Figura 6 -Diferentes formas de ocorrência dos itabiritos com alto teor de contaminantes, IFX, na região da mina. (A) Foto mostrando contato entre o xisto da unidade basal e o IFX; (B e C) O IFX ocorrendo em contatos gradacionais com os itabiritos e em intercalações entre o itabirito e níveis de hematita

Tabela 1 – Código utilizado para nomear as diferentes variações dos itabiritos

Código	Litotipos
IF	itabirito friável
IT	itabirito
ITX	itabirito com alto teor de fosforo
ISF	itabirito semifriável
IFX	itabirito com alto teor de contaminantes
HM	hematita friável

Rochas metavulcânicas ocorrem na forma de *sills*, têm cor verde, granulação fina, foliação com mergulho de 37° para NE que com espessuras métricas podem ser observadas tanto no topo como na base da sequência estratigráfica. O contato desta litologia com as demais rochas da formação serra do sapo é brusco e próximo à superfície formam saprolitos argilosos com cores

amarelo a ocre. No contato com a mineralização podem gerar níveis métricos de IFX. O topo da sequência estratigráfica é formado por afloramentos que ocorrem de maneira descontínua e apenas é possível ser observada em testemunhos de sondagem da região central e norte da jazida. A litologia que define esta unidade corresponde a dolomito de cor rosa, granulação fina que ocorre cortado por vênulas brancas de quartzo e calcita podendo conter minerais de ferro remobilizados e níveis milimétricos de minerais micáceos. Na sondagem realizada dentro dos limites do depósito mineral da Serra do Sapo esta litologia ocorre em intervalos métricos a poucas dezenas de metros de espessura. Veios de quartzo ocorrem cortando todas as litologias do depósito em geral discordantes a foliação da rocha marcando os níveis de falhamento e faturamento. Nos furos de sondagem é possível observar a presença de cristais euédricos de pirita e magnetita associados aos veios do complexo basal. Nos itabiritos podem ocorrer concordantes a foliação contento cristais de hematita e mica branca. Quando associados a dolomitos, ocorrem com presença de minerais micáceos e carbonáticos. Grandes afloramentos de quartzo rugoso, contendo cristais de hematita e buracos de até 3,5 cm de diâmetro que marcam a presença de cristais ou seixos e níveis brechados com presença de manganês estão presentes na porção norte da jazida.

2.3. GEOLOGIA ESTRUTURAL

Esta região passou por uma forte deformação associada a evento compressivo que gerou várias falhas de empurrão que modificaram o empilhamento estratigráfico e o arranjo espacial das camadas litológicas construídos durante a deposição dos sedimentos. A organização espacial das camadas é simples. Elas formam uma monoclinal de direção NNW e mergulho em geral de 25° para NE, Rolim (2010).

Na área, ocorre localmente a presença de dobras em bainha, tipicamente formadas nas deformações muito plásticas. Estas dobras foram observadas e já tinham sido descritas pela literatura na região (Almeida-Abreu, et al., 1988). Outra evidência da grande deformação plástica que ocorre entre as camadas ferríferas é a presença de charneiras de dobras rompidas.

As lascas ou blocos tectônicos limitados pelos planos de falhamento de empurrão apresentam cada um uma estratigrafia diferente e é importante perceber que muitas destas lascas de empurrão mostram envolvimento do embasamento na tectônica (Almeida-Abreu, et al., 1988).

No contato entre camadas ocorre regiões decimétricas de concentração de deformação, com características miloníticas nas rochas. É provável que este processo deformacional, e os dobramentos descritos, possam também gerar intercalações de uma litologia na outra, nas proximidades dos contatos, como comumente se observa no contato entre os filitos da base e a formação ferrífera. Podem também ser responsáveis pelas intercalações de quartzitos e formação ferrífera descritas próximas da parte superior da camada ferrífera. De toda forma, não é possível descartar a possibilidade de que todas estas intercalações (entre filitos e formação ferrífera na base e quartzitos e formação ferrífera no topo) tenham origem sin-sedimentar Rolim (2010).

3. ESTUDOS DE PETROGRAFIA E GEOQUÍMICA DE ROCHA TOTAL

- ARTIGO SUBMETIDO À REVISTA GEOLOGIA USP SÉRIE CIENTÍFICA

CARACTERIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES NO MINÉRIO DE FERRO DO DEPÓSITO SERRA DO SAPO, CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO MG

Fernando P Morais, Rosaline C Figueiredo e Silva, Carlos A Rosiere

Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627, CEP 31270-901, Belo Horizonte-MG, BR

RESUMO

O depósito mineral da Serra do Sapo está localizado na região da Serra do Espinhaço, no município de Conceição do Mato Dentro em Minas Gerais, se estendendo aproximadamente por 12 km na direção N-S, sendo a continuidade física das importantes formações ferríferas bandadas-FFB da Serra da Serpentina.

Os itabiritos são descritos como parte da Formação Serra do Sapo, unidade superior da sequência, sobrepostos aos xistos e filitos da Formação Meloso. Formações ferríferas com alto teor de alumínio e fósforo ocorrem no contato com os xistos da unidade basal e quartzitos da Formação Serra do Sapo. Estes contatos são transicionais e geram uma rocha bandada, com níveis milimétricos a centimétricos contendo grande concentração de óxido de ferro, principalmente hematita. Está litologia tem uma textura sedosa e ocorre sempre decomposta, friável, sendo descritas como hematita-quartzo-mica xistos ou classificados como Itabirito com alto teor de contaminantes – IFX. A classificação dos itabiritos é feita de acordo com o grau de decomposição intempérica da rocha. Formações ferríferas bandadas classificados como Itabiritos - IT (rocha sã), e que também apresentam altos teores de fósforo como contaminante; são classificados como ITX – Itabirito com alto teor de fósforo.

Estudos petrográficos identificaram moscovita, clorita e gibsita como sendo as principais fontes de alumínio para as amostras de IFX. Os altos teores de Al_2O_3 e P_2O_5 destes litotipos também são explicados pelo processo de formação supergênica, onde o espaço dos minerais lixiviados é preenchido por clorita e gisita. Para o ITX os altos teores de fósforo estão relacionados com minerais de apatita que ocorrem com maior frequência neste litotipo. A presença de cristais de turmalina, alinhados e intercrescidos entre as micro fraturas dos grãos de quartzo sugerem uma origem hidrotermal para a formação destes minerais nos itabiritos.

Dados geoquímicos de rocha total mostram que as amostras de IFX quando normalizadas ao PAAS mostram-se enriquecidas em ETR leves se comparadas aos outros itabiritos. Estas amostras também são enriquecidas em elementos móveis como Ba e Sr. Isso indica que o enriquecimento é devido à mobilidade dos ETR leves em um ambiente intemperizado sem ETR pesados.

Palavras chave: Formação ferrífera, Serra do Sapo, itabirito, geoquímica

ABSTRACT

The mineral deposit of Serra do Sapo is located in the Serra do Espinhaço region, in Conceição do Mato Dentro in Minas Gerais- Brazil. It is extending approximately 12 km in the NS direction, being the physical continuity of the important Serra da Serpentine banded Iron formations (FFB).

The itabirites are describe as part of the Serra do Sapo Formation, superior unit of the sequence, superposed to the schists and phyllites of the Meloso Formation. Iron formations with a high content of aluminum and phosphorus occur in contact with the schists of the basal unit and quartzites of the Serra do Sapo Formation. These contacts are transitional and generate a banded rock, with millimeter to centimetric levels containing high concentration of iron oxide, mainly hematite. This lithology has a silky texture and always occurs decomposed, friable, being describe as hematite-quartz-mica schists or classified as Itabirite with high content of contaminants - IFX. The classification of itabirites is make according to the degree of weathering of the rock. Banded iron formations classified as fresh rock (IT) that also present high levels of phosphorus as contaminants and is classify as ITX - Itabirite with high phosphorus grade.

Petrographic studies identified muscovite, chlorite and gibbsite as the main sources of aluminum for IFX samples. The high Al₂O₃ and P₂O₅ grades of these lithotypes are also explained by the supergenic formation process, where the space of the leached minerals is filled by chlorite and gibbsite. For ITX the high levels of phosphorus are related to apatite minerals that occur more frequently in this lithotype. The presence of tourmaline minerals, aligned and inbred between the microfractures of the quartz grains suggest a hydrothermal origin for these mineral formations in the itabirites.

Geochemical data shows that IFX samples when normalized to PAAS are enriched in LREE compared to the other itabirites. These samples are also enriched in moving elements such as Ba and Sr. This indicated that the enrichment is due to the mobility of the LREE in an environment weathered without heavy REE.

Keywords: Iron Formations; Serra do Sapo; Itabirite; Geochemistry

INTRODUÇÃO

A Serra do Sapo, localizada entre os municípios de Conceição do Mato Dentro e Alvorada de Minas, na região Central do Estado de Minas Gerais, está inserida na borda leste da Serra do Espinhaço Meridional. Esta região compreende as principais ocorrências de formação ferrífera conhecidas na Serra do Espinhaço (Knauer, 2007), abrangendo os grupos São José (Rolim, 2016) e Serra da Serpentina (Dossin, 1985; Grossi-Sad e Magalhães, 1989; Almeida-Abreu et al., 1989; Rolim e Rosière, 2011).

Neste trabalho serão discutidos os estudos petrográficos e geoquímicos de rocha total realizados nas amostras de testemunho de sondagem e afloramento que foram selecionadas de acordo com os altos teores de alumínio e fósforo. O propósito deste trabalho é identificar as formas em que o fósforo e o óxido de alumínio ocorrem em associação com minério de ferro deste depósito mineral e verificar alguma contribuição hidrotermal nos itabiritos com o intuito de facilitar o entendimento de trabalhos de classificação metalúrgica voltados para o processo de beneficiamento.

O fósforo apresenta um efeito indesejável no ferro gusa e aço causando o aparecimento de fissuras e a fragilidade a frio. Por este motivo a quantidade deste elemento principalmente no aço está diretamente ligada ao teor presente no minério de origem. A remoção de alumínio também é desejável, podendo tornar viável a exploração de jazidas com altos teores destes elementos.

GEOLOGIA E CARACTERIZAÇÃO DOS ITABIRITOS

A Serra do Espinhaço (Eschwege, 1822) consiste em uma faixa orogênica pré-cambriana que se alonga aproximadamente 1200 km na direção N-S entre as regiões de Belo Horizonte e o estado da Bahia. Chemale *et al* (2011) descreve a denominação utilizada para a cordilheira considerando a área de ocorrência para seus diferentes segmentos: (i) Espinhaço Meridional se estendendo de Belo Horizonte até a região 6 de Olhos D'Água (MG); (ii) Serra do Cabral, incluindo a Serra da Água Fria em Minas Gerais; (iii) Espinhaço Setentrional que se inicia na altura do paralelo 17° 30'S, em Minas Gerais, onde a serra ocorre separada e deslocada por aproximadamente 30 km na direção NNE da parte Meridional, com prolongamento contínuo do flanco oriental até o Estado da Bahia; (iv) Chapada Diamantina, distribuindo-se inteiramente na porção centro-oriental da Bahia.

O depósito mineral da Serra do Sapo (Figura 7) é formada por um conjunto de metassedimentos compostos por arenitos, filitos, xistos, formações ferríferas e rochas carbonáticas. A evolução geológica da região foi acompanhada pela geração de rochas ígneas vulcânicas e plutônicas.

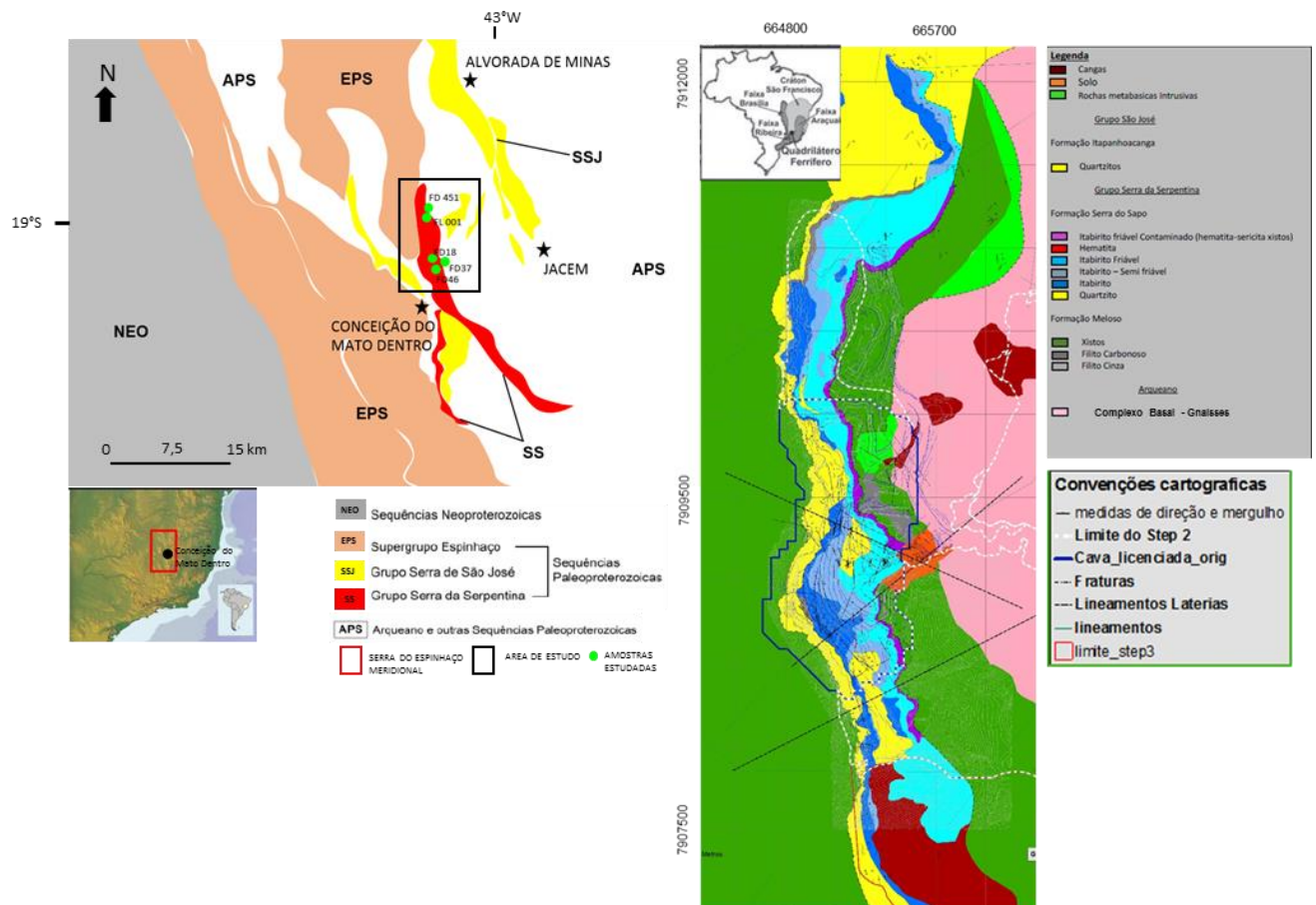


Figura 7 – Mapa contextualizando as principais unidades aflorantes da borda leste da Serra do Espinhaço meridional (Modificado de Rolim et al, 2016) e Mapa geológico das áreas principais da mina, mostrando a distribuição das litologias da Formação Serra do Sapo, e classificação dos itabiritos. Projeção UTM, Datum sad 69 23S.

As rochas do complexo basal são formadas por ortognaisses que ocorrem por toda borda leste da Serra do Sapo em terrenos com suave topografia e afloramentos de corte de estrada onde as rochas ocorrem decompostas, com coloração rosa, granulação fina contendo níveis brancos, argilosos de material caulínítico. É possível observar a presença de porfiroclastos de quartzo com no máximo 3 cm de diâmetro inserido em uma suave foliação da rocha. Essa litologia faz contato brusco com as rochas intrusivas máficas da região além dos xistos e filitos da base da sequência estratigráfica.

Nos furos de sonda estas rochas são descritas como moscovita-biotita gnaisses, com granulação média, textura granoblástica contendo quartzo e feldspato com aproximadamente uma cm de diâmetro e foliação bem definida. Os veios de quartzo ocorrem dispostos aleatoriamente, assim como níveis com presença de clorita concordante a foliação.

Sobrepostos aos gnaisses ocorrem metassedimentos predominantemente meta-argilosos de granulação fina com intercalação de quartzitos que afloram tanto na borda leste quanto na borda oeste da Serra do Sapo. Os filitos, cor cinza, fazem contato brusco com as rochas do complexo basal, ocorrem com textura sedosa e, quando decompostos formam um material extremamente argiloso. Na borda oeste do depósito é possível observar afloramentos com presença de cristais

milimétricos a centimétricos, euédricos de magnetita. Dentro da jazida estes afloramentos ocorrem com até 15 metros de espessura.

Filitos carbonosos, cor cinza escuro a negro ocorrem de forma descontínua na região leste da serra. Esses filitos têm granulação fina e foliação ondulada marcada por níveis milimétricos de material sericítico concordante a foliação da rocha.

No contato superior dos filitos ocorrem os quartzitos da base da sequência. Esses quartzitos ocorrem com cor, variando de vermelho a cinza, sendo geralmente micáceos com grande presença de sericita entre as bandas.

No contato com a formação ferrífera ocorrem os xistos geralmente intemperizados na forma de saprolitos total ou parcialmente decompostos, cor variando de amarelo a vermelho contendo cristais de quartzo e xistosidade marcada pela presença de moscovita e sericita. Estes xistos são localmente crenulados e fazem um contato transicional com a mineralização ferrífera gerando níveis de minerais de ferro intercalados com nível de argila contendo teores em ferro em muitos casos superiores aos itabiritos.

As FFBs da Serra do Sapo correspondem a itabiritos, e são classificadas de acordo com o grau de intemperismo e compacidade da rocha (Figura 8). A classificação para o minério de baixo teor divide-se em Itabirito friável-IF; Itabirito semi-friável – ISF e Itabirito- IT.

O itabirito friável é uma rocha decomposta, cor variando de cinza a cinza escuro, formada por minerais desagregados decorrente de um estágio final de intemperismo. Em geral esta classificação possui as maiores concentrações de ferro entre os itabiritos. O Itabirito semi-friável é uma rocha estruturada em um estágio médio de intemperismo, podendo ser facilmente desagregada. Esta classificação possui bandamento marcado por níveis decimétricos a centimétricos de hematita. Nos afloramentos o processo de intemperismo é marcado primeiro pela lixiviação do quartzo e pela presença de moscovita entre os níveis de hematita.

A rocha sã é classificada como itabirito, formada por bandamento marcado pela alternância de níveis milimétricos a centimétricos de hematita e quartzo. Em algumas amostras é possível observar a presença de níveis milimétricos de clorita concordantes a foliação.

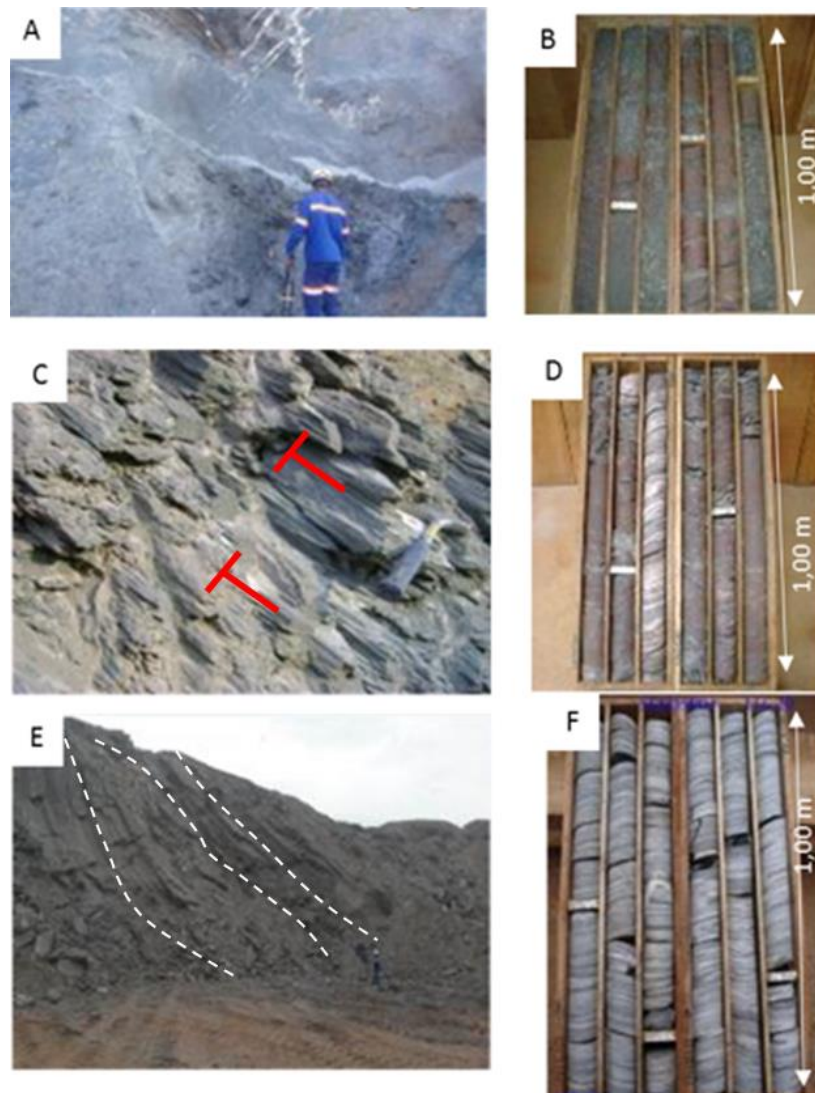


Figura 8 - Fotos das três principais classificações dos itabiritos de acordo com grau de intemperismo das rochas nos afloramentos e no testemunho de sondagem (A) afloramento de Itabirito friável, IF, com passagens centimétricas de veio de quartzo, (B) testemunho de itabirito friável após a sondagem, mostrando o alto grau de decomposição supergênica da rocha, (C) Afloramento de itabirito semifriável, ISF, em corte de estrada indicando o ângulo de foliação das rochas (D); Testemunho de sondagem mostrando a estruturação do itabirito semi friável (D); itabirito, IT, estruturado, indicando o aumento do ângulo de foliação em algumas regiões da mina (E); Foto do testemunho de sondagem do itabirito mostrando a forte estruturação da rocha e as alternâncias centimétricas dos níveis de sílica e óxido de ferro.

Os minérios com teores de ferro acima de 60% (Figura 9) ocorrem no topo da camada onde a rocha fica enriquecida em minerais de ferro e pobre em quartzo. Esses litotipos também ocorrem na região lesta da serra através de corpos métricos a decamétricos podendo estar associados a falhamentos. Em alguns casos é possível observar um bandamento milimétrico e veios de quartzo concordantes ou discordantes à foliação da rocha. Essas litologias ocorrem com cor cinza escura a cinza azulada e, assim como os itabiritos mineralizados são divididos de acordo com o seu grau de intemperismo e denominadas hematita friável ou mole- HM onde os minerais que compõem essa rocha ocorrem desagregados em um alto grau de intemperismo, e hematita compacta ou dura – HD em geral na base dos itabiritos onde a rocha ocorre estruturada e fresca.

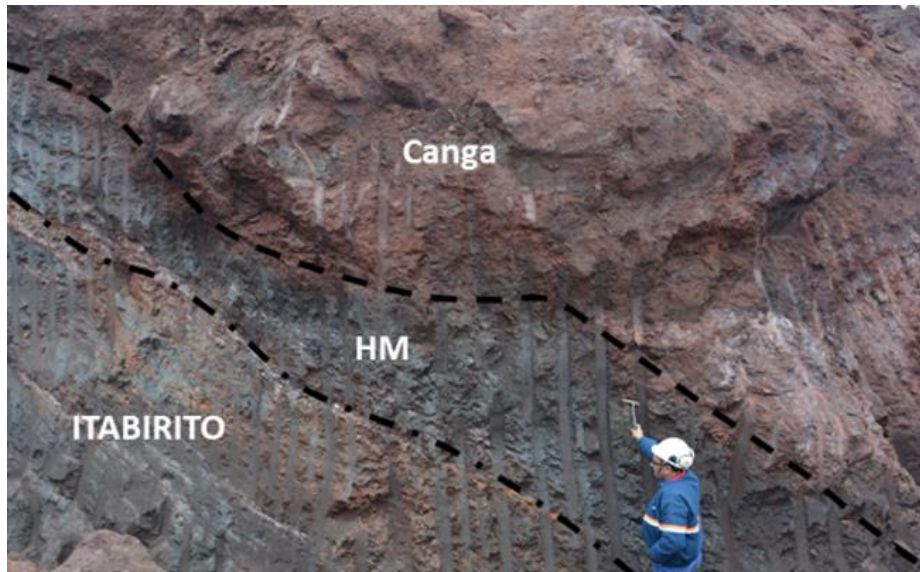


Figura 9 – Afloramento de hematita friável (HM) no contato com o itabirito na base e o capeamento laterítico (Canga)

Formações ferríferas com alto teor de alumínio e fósforo ocorrem no contato com os xistos da unidade basal (Figura 10). Estes contatos são transicionais e geram uma rocha bandada, com níveis milimétricos a centimétricos contendo grande concentração de minerais de ferro, principalmente hematita, e níveis milimétricos a centimétricos de argila com cor variando de amarelo à cinza escura. Esta litologia tem uma textura sedosa e ocorre sempre decomposta sendo descritos como hematita-quartzo-mica xistos ou classificados como Itabirito com alto teor de contaminantes – IFX.

Itabiritos previamente classificados como ISF contendo teores elevados de fósforo na sua composição também são classificados como IFX, assim como itabiritos classificados como IT que também apresentam altos teores de fósforo. Essas litologias ocorrem cortadas por veio de quartzo que podem estar concordantes ou discordantes a foliação da rocha.

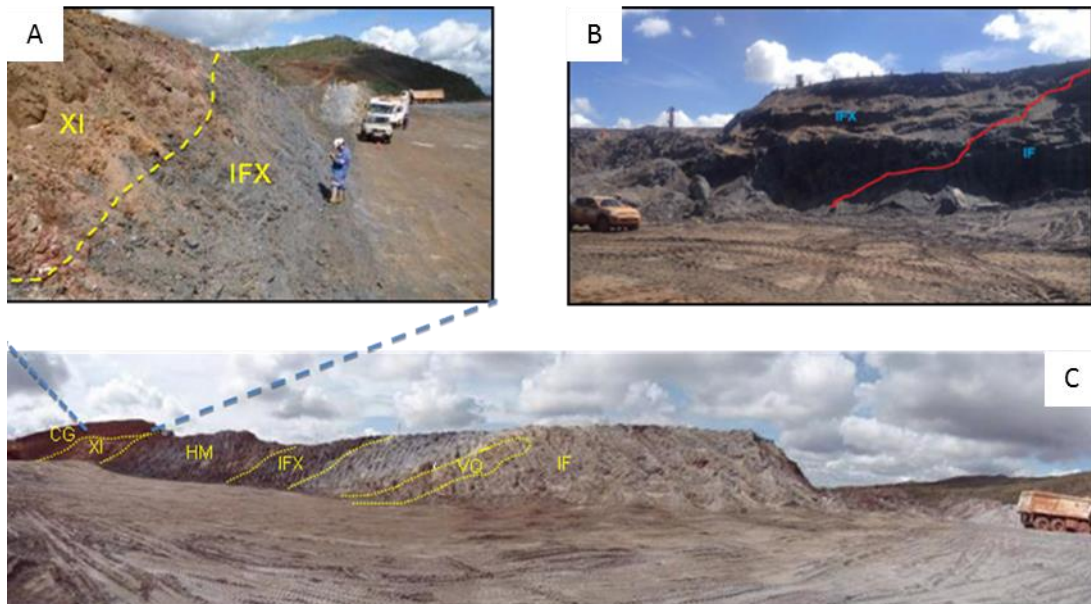


Figura 10 -Diferentes formas de ocorrência dos itabiritos com alto teor de contaminantes, IFX, na região da mina. (A) Foto mostrando contato entre o xisto da unidade basal e o IFX; (B e C) O IFX ocorrendo em contatos gradacionais com os itabiritos e em intercalações entre o itabirito e níveis de hematita

Tabela 2 – Código utilizado para nomear as diferentes variações dos itabiritos

Codigo	Litotipos
IF	itabirito friável
IT	itabirito
ITX	itabirito com alto teor de fosforo
ISF	itabirito semifriável
IFX	itabirito com alto teor de contaminantes
HM	hematita friável

Rochas metavulcânicas ocorrem na forma de *sills*, têm cor verde, granulação fina, foliação com mergulho de 37° para NE que com espessuras métricas podem ser observadas tanto no topo como na base da sequência estratigráfica. O contato desta litologia com as demais rochas da formação Serra do Sapo é brusco e próximo à superfície formam saprolitos argilosos com cores amarelo à ocre. No contato com a mineralização podem gerar níveis métricos de IFX. O topo da sequência estratigráfica é formado por afloramentos que ocorrem de maneira descontínua e apenas é possível ser observada em testemunhos de sondagem da região central e norte da jazida. A litologia que define esta unidade corresponde a dolomito de cor rosa, granulação fina que ocorre cortado por vênulas brancas de quartzo e calcita podendo conter minerais de ferro remobilizados e níveis milimétricos de minerais micáceos. Na sondagem realizada dentro dos limites do depósito mineral da Serra do Sapo esta litologia ocorre em intervalos métricos a poucas dezenas de metros de espessura. Veios de quartzo ocorrem cortando todas as litologias do depósito em geral discordantes à foliação da rocha marcando os níveis de falhamento e faturamento. Nos furos de sondagem é possível observar a presença de cristais euédricos de pirita e magnetita associado aos veios do complexo basal. Nos itabiritos podem ocorrer

concordantes à foliação contendo cristais de hematita e mica branca. Quando associados a dolomitos, ocorrem com presença de minerais micáceos e carbonáticos. Grandes afloramentos de quartzo rugoso, contendo cristais de hematita e buracos de até 3,5 cm de diâmetro que marcam a presença de cristais ou seixos e níveis brechados com presença de manganês estão presentes na porção norte da jazida.

METODOLOGIA

A metodologia de estudo se dividiu em amostragem de campo, estudos petrográficos e análise qualitativa dos minerais acessórios através de microscopia eletrônica, e geoquímica de rocha total. A etapa de campo foi realizada no município de Conceição do Mato Dentro e foram selecionadas 4 furos de sondagem e 1 amostra de frente de lavra para confecção de lâminas petrográficas. Essas amostras foram selecionadas por estarem localizadas em regiões da jazida que apresentaram teores elevados de fósforo e alumínio na mineralização (Tabela 2).

Tabela 3 - Tabela mostrando as amostras e os furos de sonda onde foram descritas e coletadas as amostras

Furo	Lâmina	Localização			Litologia	Profundidade (m)
		X	Y	Z		
SEFDSP 37	FD37-100.52 a 100.60	668249	7904373	702	ITX	100.52
SEFDSP 18	FD18-89.25 a 89.35	667807	7904377	789	IT	89.25
SEFDSP 46	FD46-201.85 a 202.01	668003	7904198	748	IFX	201.85
FL001	FL001	665249	7908877	865	IFX	Frente de Lavra
SEFDSP 37	FD37-128.25 a 128.39	668249	7904373	702	ITX	128.25

A partir da seleção das amostras foram confeccionadas 30 lâminas delgadas polidas, descritas em microscópio de luz transmitida e refletida LEICA, modelo DM2500P, no Laboratório de Metalogenia do CPMTc, com ocular de 10X e objetivas de 2,5X, 5X, 10X, 20X e 50X. As análises petrográficas foram ilustradas por fotomicrografias em câmera LEICA, modelo DFC295.




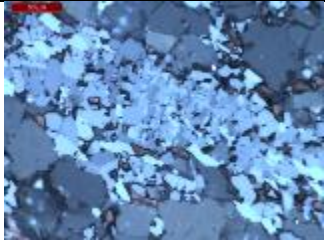

Amostras descritas na petrografia foram selecionadas e analisadas na Quanta 3D Dual FIB do Centro de Microscopia Eletrônica da UFMG por apresentarem quantidades significativas de minerais acessórios associados às formações ferríferas do depósito mineral da Serra do Sapo.

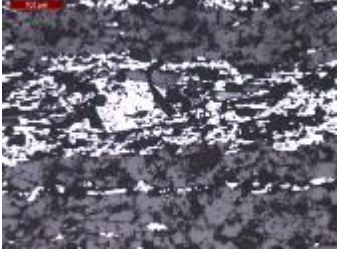
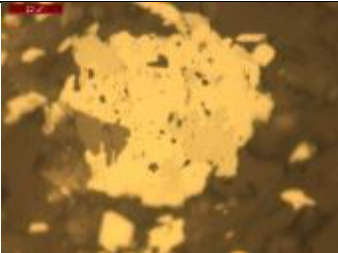
Dados de geoquímica de rocha total foram obtidos na Bureau Veritas Commodities Canada Ltd, onde foram analisadas 10 amostras pelos métodos de análise quantitativa ICPS – ES (Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometric) e ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometric), e digestão de 0,5g sedimento em água régia a temperatura de 90°C durante 2.5 horas, sendo estes os principais métodos quantitativos que fornecem dados adequados para traçar diagramas de classificação de rocha total e estudos de relação de elementos químicos.

PETROGRAFIA E MINERALOGIA

De acordo com as descrições petrográficas, os óxidos de ferro foram classificados como descrito na tabela 3 abaixo:

Tabela 4 - Tipos de óxidos de ferro classificados segundo a definição de Hagemann et al. (2008).

Fotomicrografia	Descrição	Classificação
	Cristais de hematita alongados predominante entre os cristais de óxidos de ferro que estão presentes na amostra de IFX	Hematita Lamelar
	Curtos cristais de hematita alongados com pequenos comprimentos presente principalmente nos itabiritos	Hematita micro-lamelar
	Cristais compactos, equidimensionais de hematita com granulação fina.	Hematita granular
	Cristais de hematita inequidimensionais formando contatos irregulares.	Hematita Lobular
	Agglomerados anédricos, porosos que ocorrem associados a hematita microlamelar	Hematita anédrica

	<p>Pseudomorfos dos cristais octaédricos de magnetita</p>	<p>Martita</p>
	<p>Fase intermediária formada no processo de oxidação da magnetita para hematita (Kullerud, 1969). O mineral é identificado em cristais rosados no interior dos cristais de martita.</p>	<p>Kenomagnetita</p>

As rochas analisadas ricas em ferro são constituídas por itabiritos friáveis com relativo alto teor de alumínio - IFX e itabiritos com relativo alto teor de fósforo – ITX. Os principais minerais constituintes das rochas são hematita, martita, kenomagnetita e quartzo (Tabela 3). Ocasionalmente ocorrem minerais como turmalina, gibsita, muscovita e apatita, podendo estar presente principalmente nas amostras de IFX.

Microscopicamente o IFX (Figura 11) consiste em uma rocha bandada marcada pela alternância das porções ricas em minerais micáceos e níveis milimétricos a centimétricos de minerais opacos. A textura da rocha é granoblástica marcada pela orientação dos minerais que refletem a foliação ondulante da rocha. As bandas de minerais transparentes são essencialmente compostas por mica branca, contendo cristais aciculares e placoides com granulação variando de 0.05mm a 1.00mm com presença de minerais opacos entre os contatos. As micas ocorrem como minerais alongados, por vezes dispersos, orientados segundo a foliação da rocha. As bandas de minerais opacos compõem-se essencialmente por cristais de hematita lamelar e microlamelar orientados e paralelos ao bandamento e a xistosidade da rocha fazendo contato reto entre si com granulação variando de 0.01 mm a 0.50mm. Espaços vazios prevalecem entre os níveis de microcristais de hematita granular.

Cristais subédricos de martita contendo relictos de kenomagnetita cor rosa ocorrem de forma dispersa na rocha com granulação entre 0,10mm a 0,20mm.

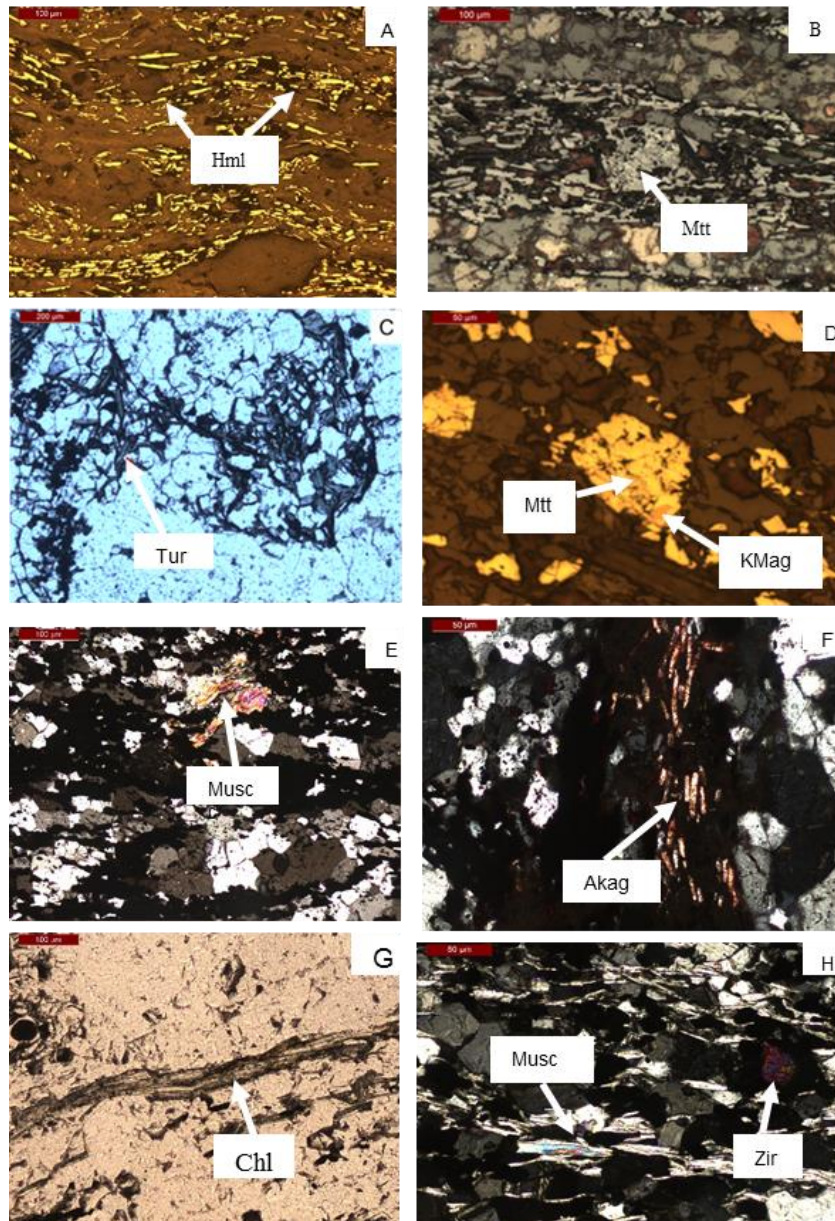


Figura 11 - Fotomicrografia: (A) Níveis contendo cristais aciculares de hematita microlamelar (Hml). Luz refletida; Nicóis paralelos; aumento de 100X; amostra FL001 (B) Cristais de martita (Mtt) descritos na amostra FD37- 128.25 a 128.35. Luz transmitida aumento de 500X (C) Cristais de turmalina (Tur) descritos na amostra FD37- 128.25 a 128.35. Luz transmitida aumento de 500X (D) Cristal de martita (Mtt) contendo relictos de Kenomagnetita (Kmag). Luz refletida; Nicóis cruzados; aumento de 500X; (E) Muscovita (Musc) descrita na amostra FD18- 114.32 a 114.38; Nicóis cruzados; Luz transmitida aumento de 500X. (F) Aspecto dos cristais cor marron, aciculares de akaganeita (Akag) orientados descritos na amostra FD18- 89.25 a 89.35. Luz transmitida; Nicóis cruzados aumento de 100X. (G) Clorita (Chl) intercrescida entre os cristais de quartzo descrita na amostra FD37- 128.25 a 128.35. Luz transmitida aumento de 500X. (H) Cristal de zircão (Zir) inserido entre os níveis de minerais opacos da amostra FD 46-201.85 a 202.01. Luz transmitida, aumento de 100X.

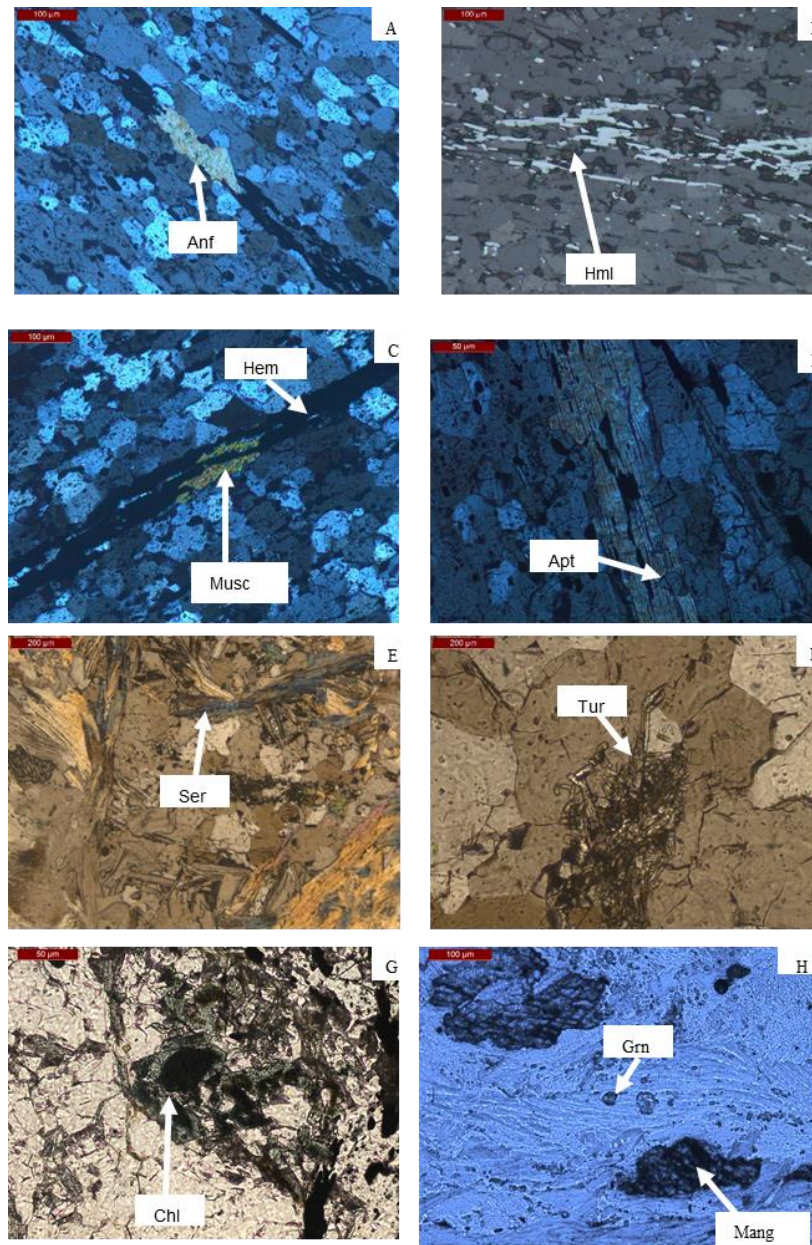


Figura 12 - Fotomicrografia: (A) Cristal de anfibólio(Anf) entre os níveis de hematita. Luz transmitida; Nicóis cruzados; aumento de 100X; amostra FD46_82.32 a 82.44. (B) Níveis de hematita micro lamelar(Hml) alternado aos níveis ricos em quartzo. Luz refletida; Nicóis cruzados; aumento de 100X; FD46_82.32 a 82.44. (C) Cristal de muscovita (Musc) alongado, orientado segundo o bandamento e cortado pelos níveis de hematita (Hem). Nicóis cruzados. Luz refletida; aumento de 100X; amostra FD46_82.32 a 82.44. (D) Cristal bem desenvolvido de apatita (Apt). Luz refletida; Nicóis cruzados; aumento de 100X; FD46_31.26 a 31.36. (E) Cristais finos com orientação caótica de sericita entre os níveis ricos em quartzo. Aumento de 100X. Luz transmitida; nicóis cruzados; FD46_31.26 a 31.36. (F) Cristais finos de turmalina (Tur) subcrescido entre os cristais grossos de quartzo na amostra 31.26 a 31.36. Luz transmitida aumento de 500X.(G) cristais de clorita (Chl) entre os cristais de hematita. Nicóis paralelos; Luz transmitida aumento de 500X. (H) óxido de manganês (Mang) e raro cristal de granada (Grn). Nicóis paralelos;Luz transmitida; aumento de 500X. amostra FD46 31.26 a 31.36.

Assim como para o IFX, no ITX os minerais de hematita (Figura 12) de forma lamelar são mais frequentemente observados, os cristais de hematita nessas rochas apresentam uma forma forte e orientação preferencial cristalográfica.

Minerais acessórios descritos a seguir foram identificados a partir de análises utilizando MEV (Fig 13) amostra FD46 – 201.85 a 202.01 é uma amostra de IFX coletada em furo de sonda dentro de um intervalo onde os teores de alumínio e fósforo são relativamente elevados. Na análise petrográfica esta amostra mostrou a presença de cristais euédricos e subédricos de zircão ocorrendo na forma de minerais acessórios entre os níveis de minerais opacos da formação ferrífera.

A análise feita através das imagens de alta resolução confirmou a presença do zircão através do mapeamento químico qualitativo feito entre os minerais da rocha.

Cristais de gibsita que não haviam sido identificados na petrografia foram descritos com o auxílio das imagens de elétrons retro espalhados e análise química semiquantitativa (EDS).

A análise química do zircão também revelou a presença de uma fase com cromo em um dos minerais analisados. Essa composição sugere a presença de um possível mineral de espinélio contendo ferro e cromo na composição.

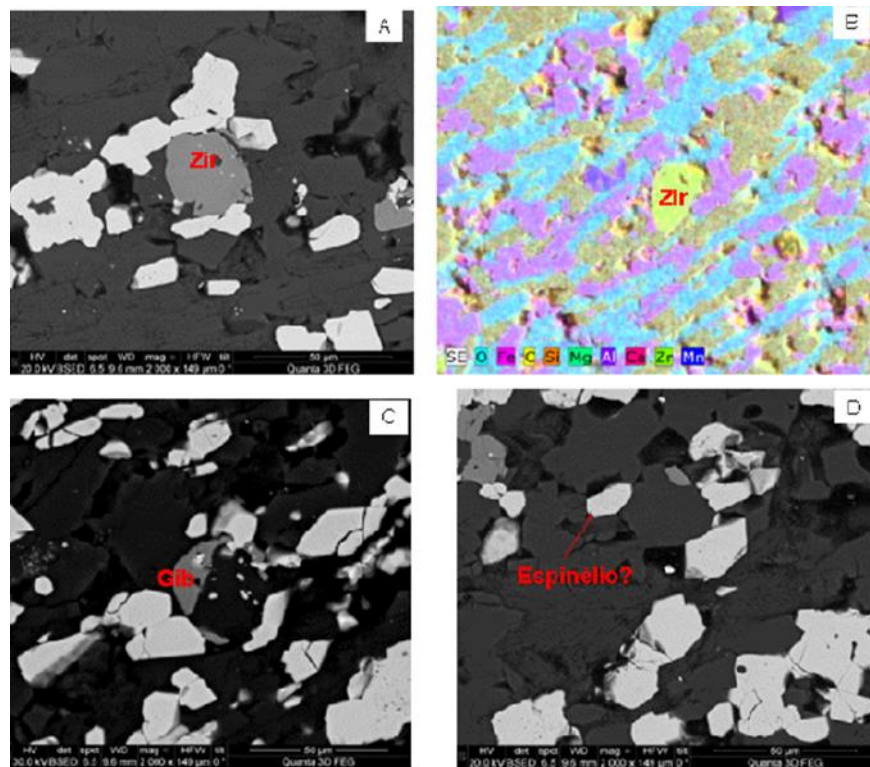


Figura 13 - Imagem BSE (A) Cristal de zircão (Zir) entre os minerais de hematita (B) Mapeamento químico identificando a presença do zircão entre os minerais. (C) Grão de gibsita (Gib) entre os minerais que compõe a amostra. (D) Cristal identificado com cromo na composição sugerindo a presença de um possível mineral de espinélio.

Na amostra FD18- 89.25 a 89.35 de IFX foram observados minerais cor marrom, aciculares, orientados de acordo com o bandamento com granulação fina, podendo corresponder a akaganeíta (Fig.11F). Esses cristais ocorrem disseminados na rocha com espaços vazios entre os contatos.

Na amostra FD 46-201.85 a 202.01, ocorrem cristais de zircão bem formados, arredondados, granulação média a grossa com relevo alto incluso entre os níveis de minerais opacos da rocha.

Cristais de turmalina cor verde ocorrem nas amostras FD37- 128.25 a 128.35 e FD46_31.26 a 31.36 Inter crescidos entre as fraturas do veio de quartzo que atravessa o itabirito. Esses minerais se mostram de forma alinhada com granulação fina e fazendo contato com minerais fibrosos de clorita cor verde.

GEOQUÍMICA DE ROCHA TOTAL

Os litotipos selecionados foram coletados primeiramente a partir das descrições macroscópicas dos testemunhos e das amostras das diferentes classificações dos itabiritos e, posteriormente estas nomenclaturas foram confirmadas a partir dos resultados químicos dos furos de sonda e amostra de campo em diferentes níveis topográficos do depósito mineral da Serra do Sapo.

A integração dos dados das análises químicas permite em conjunto com uma investigação mineralógica uma discussão acerca das fontes de formação dos minerais que compõem as rochas da jazida.

A tabela 4 mostra os dados químicos composicionais das amostras.

Tabela 5 - Resultado da análise química das amostras de Itabirito (ver tab. 2).

Classificação do Itabirito	IFX	IFX	IFX	IT	ITX	ITX	ITX	ITX	IFX	IFX
Amostra	FD451_01	FD451_03	FD451_04	FD18_05	FD37_05	FD37_07	FD37_08	FD46_05	FD46_09	FL_001
wt(%)										
SiO ₂	17,85	1,48	59,93	46,86	53,52	55,62	44,81	77,46	36,41	10,04
Al ₂ O ₃	15,18	1,13	1,23	1,7	0,39	1,17	0,18	0,16	5,17	9,98
Fe ₂ O ₃	53,77	93,51	33,76	48,42	42,06	40,31	54,16	19,91	47,91	69,03
CaO	<0,01	<0,01	<0,01	0,07	0,99	0,23	<0,01	1,01	0,18	0,01
MgO	0,04	0,03	0,05	0,37	0,45	1,05	0,02	0,08	5,12	0,09
Na ₂ O	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
K ₂ O	<0,01	0,02	0,23	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,5	0,22
MnO	0,01	0,03	0,01	0,3	0,17	0,07	0,01	0,08	1,07	1,36
TiO ₂	0,86	0,41	0,03	0,04	0,02	0,06	<0,01	0,01	0,27	0,47
P ₂ O ₅	0,05	0,04	0,05	0,08	0,61	0,17	0,01	0,75	0,11	0,21
Cr ₂ O ₃	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03
LOI	11,82	2,88	3,99	1,17	0,88	0,64	0,06	0,18	2,65	7,91
FeO	1,1	1,03	1,23	0,4	0,64	1,21	0,48	0,53	0,36	0,78
ppm										
Ba	22	43	374	59	22	10	16	14	510	536
Be	2	<1	<1	3	1	2	<1	<1	2	3
Co	2,9	0,7	0,9	7,5	1,8	3,8	1	0,9	26,5	2,2
Cs	<0,1	0,1	0,2	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,6	<0,1

Ga	14,9	5	1,9	4,5	0,8	1,9	0,6	0,7	9	11,1
Hf	5,1	0,4	0,3	0,3	0,2	0,6	<0,1	<0,1	6,3	3,2
Nb	11	4	0,6	0,7	0,2	0,7	0,2	0,4	5,9	4,5
Rb	0,2	0,9	7,5	<0,1	0,3	<0,1	<0,1	0,2	16	6,2
Sn	3	2	<1	<1	<1	<1	<1	<1	1	2
Sr	14,2	18,6	30,3	4,8	8,6	2,5	1	7,4	4,2	40,9
Ta	0,8	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,5	0,4
Th	13,7	1,8	1,6	0,5	<0,2	1,1	<0,2	0,2	12,5	9,7
U	4,3	4,7	0,8	1,9	1,5	1,8	1	2,4	8,1	5,6
V	396	133	29	97	37	21	12	23	93	128
Zn	13	8	4	19	34	34	4	7	39	43
W	2	0,8	1,5	12,2	2,6	2	1,4	4	2,5	2,5
Zr	180,9	21,1	11,5	11,8	5,2	23,8	3,7	4,8	277,5	134,2
Mo	0,2	0,5	0,8	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6	0,4	1,6
Cu	4,7	3,6	3,6	1,5	2,2	8,8	2	1,7	3,7	2,8
Pb	22,1	7,4	1,2	4,2	2,3	2,5	1,6	3,2	12,4	43,8
Ni	4,2	5,1	2,2	18,5	3	6,3	2,6	5,4	43	11,6
As	7,5	6,2	2	20,1	4,6	2,8	1,5	62,8	17,5	23
Sb	0,1	0,5	0,4	0,8	0,5	0,3	0,6	0,5	0,1	0,2
Bi	<0,1	0,4	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,4
Hg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,03
Ti	0,86	0,41	0,03	0,04	0,02	0,06	<0,01	0,01	0,27	0,47
Y	7,8	9,4	17,3	17,8	14	4,8	3,8	12,1	31	14,4
La	30,7	16,3	22,7	7,4	3	1,7	1,5	2,4	19,2	47,3
Ce	53,3	33,2	68,1	14	5	2,7	2	3,3	45,4	80,1
Pr	5,38	3,34	5,9	1,36	0,72	0,29	0,27	0,48	4	9,1
Nd	17,2	10,1	21,9	6,1	3	1,3	0,7	2,6	15,6	31,5
Sm	2,79	1,75	4,87	0,96	0,82	0,51	0,27	0,6	3,49	5,48
Eu	0,69	0,35	1,36	0,45	0,36	0,09	0,07	0,21	0,71	1,52
Gd	2,08	1,44	4,37	1,25	1,23	0,42	0,28	0,85	3,66	4,16
Tb	0,3	0,2	0,58	0,2	0,21	0,07	0,05	0,13	0,68	0,57
Dy	1,69	1,48	3,07	1,59	1,43	0,48	0,43	1,09	4,3	3,25
Ho	0,38	0,33	0,61	0,39	0,34	0,12	0,1	0,25	1,01	0,65
Er	1,29	1,1	1,81	1,24	1,05	0,46	0,38	1	3,17	1,7
Tm	0,19	0,13	0,23	0,21	0,17	0,06	0,06	0,14	0,49	0,26
Yb	1,33	0,71	1,4	1,32	1,02	0,42	0,33	0,9	3,21	1,79
Lu	0,21	0,12	0,2	0,23	0,17	0,08	0,07	0,18	0,51	0,32

ppb

Au	1,3	<0,5	<0,5	0,7	<0,5	<0,5	1,5	1	2,4	1,1
----	-----	------	------	-----	------	------	-----	---	-----	-----

ETR Normalizados PAAS (M Clennan, 1989)	FD451_01	FD451_03	FD451_04	FD18_05	FD37_05	FD37_07	FD37_08	FD46_05	FD46_09	FL_001
Σ ETR	117,53	70,55	137,1	36,7	18,52	8,7	6,51	14,13	105,43	187,7
Pr/Yb _(SN)	1,292	1,502	1,346	0,329	0,225	0,221	0,261	0,170	0,398	1,624
Sm/Yb _(SN)	1,066	1,252	1,767	0,370	0,408	0,617	0,416	0,339	0,552	1,556
Ce/Ce* _(SN)	0,948	1,036	1,355	1,012	0,785	0,877	0,719	0,708	1,194	0,887
Pr/Pr* _(SN)	1,035	1,058	0,890	0,866	1,078	0,909	1,336	0,920	0,879	1,065
Eu/Eu* _(SN)	1,390	1,105	1,524	2,089	1,782	0,921	1,213	1,534	0,933	1,573
Y/Ho	20,526	28,485	28,361	45,641	41,176	40,000	38,000	48,400	30,693	22,154
Y/Y* _(SN)	0,776	1,072	1,008	1,798	1,599	1,590	1,460	1,847	1,185	0,790

Para as amostras selecionadas foram realizadas determinações de elementos maiores e traços procurando abranger os diferentes tipos de Itabiritos, itabirito friável contaminado (IFX) e itabiritos com teores elevados de fósforo (ITX), classificados através do seu nível de intemperismo. As classificações para estas amostras foram feitas a partir dos intervalos descritos macroscopicamente nos testemunhos de sondagem. Estes dois litotipos de itabiritos tem teores relativamente altos de fósforo e alumínio na sua composição.

A figura 14 ilustra o comportamento dos elementos maiores para os diferentes tipos de itabiritos.

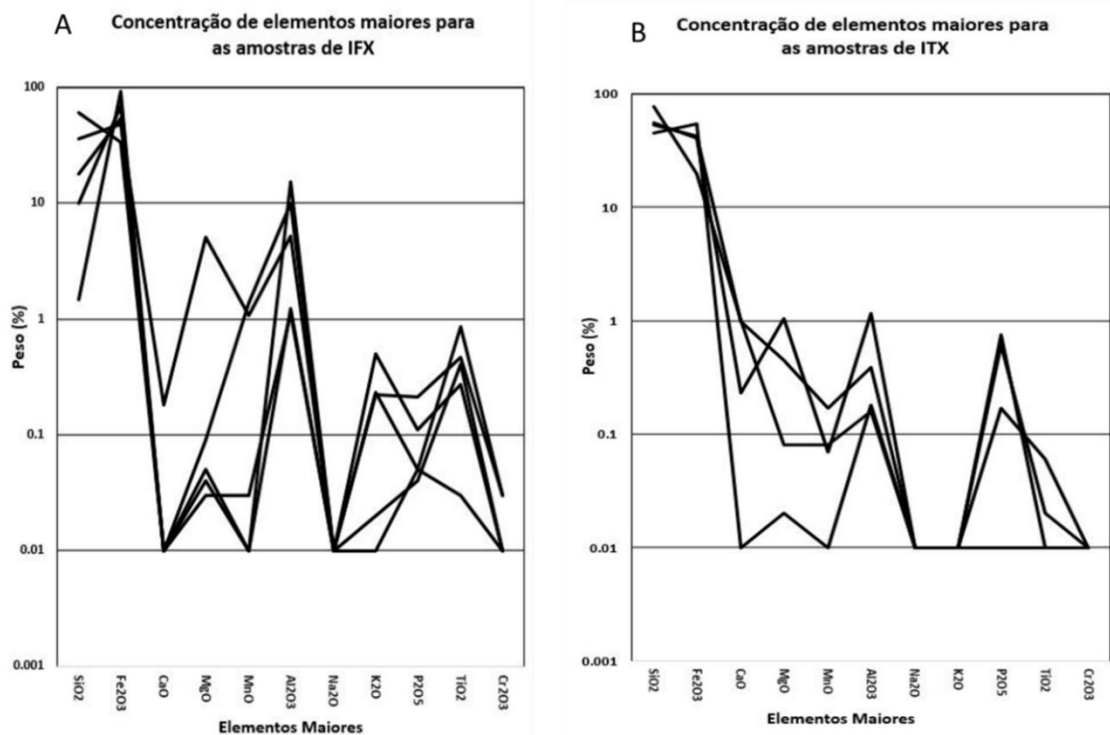


Figura 14 - Concentração de elementos maiores (A) Diagrama de concentração de elementos maiores para as amostras de IFX; (B) Diagrama de concentração de elementos maiores para as amostras de ITX.

As amostras demonstram teores de Fe_2O_3 entre 33,76 a 93,51 % (em peso) para o IFX (Figura 7 B) e de 19,91 a 54,16% para o ITX (Tabela 2 e Figura 12 C). Os teores de Al_2O_3 no IFX variam de 1,13 a 15,18 % em geral bem maiores do que os mesmos teores para as amostras de ITX que variam de 0,18 a 1,17%, e para a amostra de IT com 1,7%.

Os teores de SiO_2 variam de 44,81 a 77,46 % para a composição do ITX que são em média maiores do que os 46,86 % encontrados para a amostra de IT. Para o IFX, esses resultados são ainda menores se comparados as médias de SiO_2 para as duas litologias.

Para os teores de P_2O_5 se destacam os valores de 0,61 e 0,75 % para as amostras de ITX. Essas concentrações apesar de serem baixas, são relativamente elevadas se comparadas as concentrações obtidas para as amostras de IT e IFX.

Os valores de MgO foram detectados para todas as amostras com alta concentração de 5,12% para a amostra de IFX FD46_09 (tabela 4 e figura 14). Concentrações de MnO também foram detectadas para todas as amostras com alta concentração de 1,37 % para a amostra de IFX FL_001.

Apesar das baixas concentrações de TiO_2 , apenas a amostra de ITX FD37_08 obteve resultado abaixo do limite de detecção.

Concentrações de Ba, Cr_2O_3 e K_2O foram apenas detectadas nas amostras de IFX (Tabela 4), sendo 0,04% (FD451_04), 0,06%(FD46_09 e FL_001) para o Ba; 0,03% (FD451_01 e FL_001) para os resultados de Cr_2O_3 e 0,02% (FD451_03), 0,23% (FD451_04), 0,5% (FD46_09) e 0,22%(FL_001).

Os padrões dos elementos traços mostram Ba, V e Zr com as maiores concentrações (Figura 15A). A amostra ITX FD46_05 tem alta concentração de As com 62,8 ppm, assim como as amostras de ITX FD37_07 e FD37_05 com alta concentração de Zn com 34 ppm. Estes valores de zinco são similares as concentrações do mesmo elemento para as amostras de IFX FD46_09 com 39 ppm e FL_001 com 43 ppm (Figura 15B).

Concentrações de Ag foram as únicas abaixo do limite de detecção para todas as amostras. Concentrações de Hg apenas ficaram acima do limite de detecção para a amostra FL_001 com 0,03 ppm.

As amostras de IFX mostram concentrações bem mais elevadas de Nb (11ppm, 4ppm, 0.6ppm, 5,9ppm e 4,5ppm) se comparadas a amostra de IT (0,7ppm) e as amostras de ITX (0,2ppm, 0,7ppm, 0.2ppm e 0.4ppm).

Assim como o Ba que obteve altas concentrações de 374ppm (FD451_04), 510ppm (FD46_09) e 536ppm (FL_001) para as amostras de IFX, o Zr também mostra valores de 180,9ppm (FD451_001), 277,5ppm (FD46_09) e 134,2ppm (FL_001) para esta mesma classificação de itabirito.

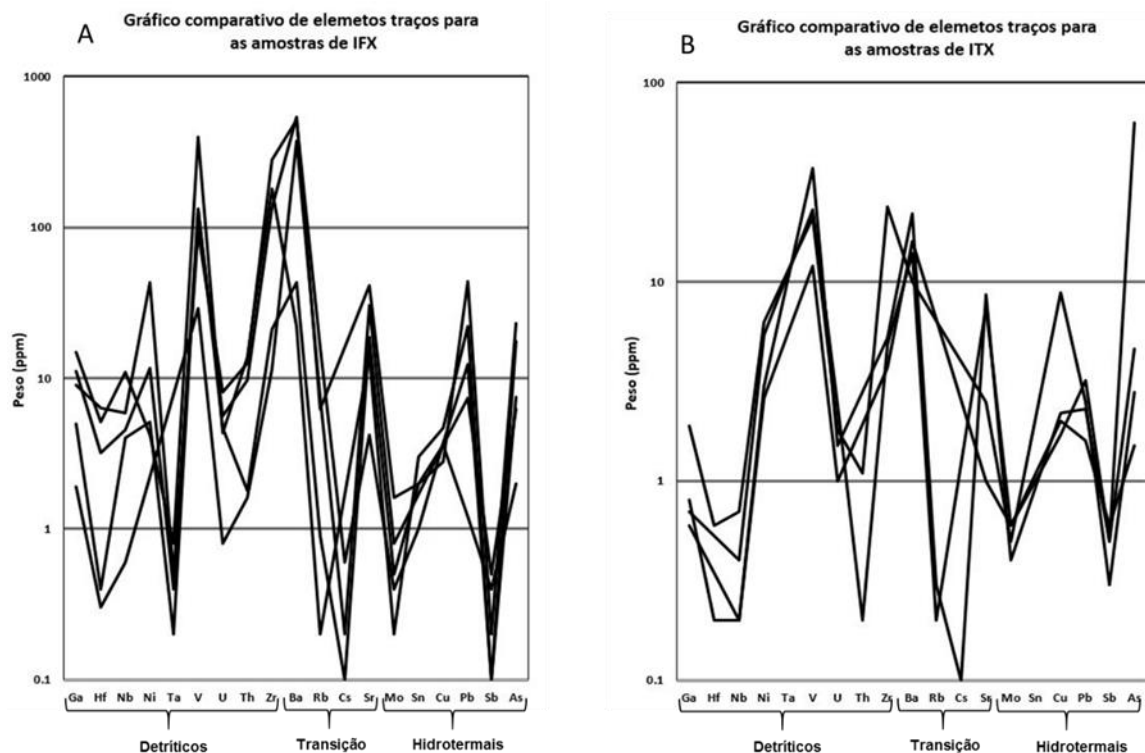


Figura 15 - Elementos traços discriminando os elementos detríticos, de transição e hidrotermais; (A) Diagrama de concentração de elementos traços para as amostras de IFX; (B) Diagrama de concentração de elementos traços para as amostras de ITX.

Os elementos terras raras (ETR) foram normalizados aos padrões Post-Archean Average Australian Shale PAAS_(SN) (McLennan 1989) e condritos(NC) (Taylor e McLennan, 1985). O Y foi adicionado entre o Dy e o Ho assim como mostram os números usados na base de cálculo informados na tabela 4. A soma dos ETR (\sum ETR) para as amostras de itabirito friável contaminado variam de 70,55 ppm a 187,7 ppm e de 6,51 ppm a 18,52 ppm para as amostras de itabirito (ITX). A amostra de itabirito FD18_05 mostra uma soma de 36,7 ppm. Quando

normalizado ao PAAS, o padrão de ETR do itabirito friável contaminado (IFX) é em geral caracterizado por um leve enriquecimento dos elementos terras raras leves (ETRL) em relação aos pesados (ETRP) com razão $Pr/Yb_{(SN)}$ variando entre 1,292 a 1,624. Somente a amostra de IFX FD46_09 mostrou enriquecimento dos ETRP em relação aos leves com razão 0,398. As amostras de itabirito (Figura 16A) apresentaram razões $Pr/Yb_{(SN)}$ variando entre 0,170 a 0,261 semelhante a amostra (FD18_05) com razão 0,329 e leve enriquecimento dos ETRP em relação ao ETRL.

Razões $Sm/Yb_{(SN)}$ mostram um enriquecimento dos ETRM em relação aos elementos terras raras pesados com razões variando de 1,066 a 1,767 para as amostras de IFX (Figura 16 B), com exceção feita a amostra de IFX FD46_09 com $Sm/Yb_{(SN)} = 0,552$, semelhante às razões de itabiritos com alto teor de fósforo com $Sm/Yb_{(SN)} = 0,339$ a 0,617 e IT com $Sm/Yb_{(SN)} = 0,370$. Para as amostras de IFX, os diagramas apresentam anomalia de Eu variando de $(Eu/Eu^*_{(SN)} = Eu_{(SN)} / (0,66Sm_{(SN)} + 0,33Tb_{(SN)}) = 0,932$ a 1,573, enquanto para as amostras de ITX estes resultados variam de $(Eu/Eu^*_{(SN)} = Eu_{(SN)} / (0,66Sm_{(SN)} + 0,33Tb_{(SN)}) = 0,921$ a 1,782. A razão de Eu para a amostra de IT foi $(Eu/Eu^*_{(SN)} = Eu_{(SN)} / (0,66Sm_{(SN)} + 0,33Tb_{(SN)}) = 2,089$.

As amostras de IFX FD451_01 e FL001 são as únicas que apresentaram anomalia negativa de Y/Y^* com razões de 0,776 e 0,790, diferente das amostras de ITX com razões $(Y/Y^*_{(SN)} = (Y_{(SN)} / (0,5Dy_{(SN)} + 0,5Ho_{(SN)})) = 1,460$ a 1,847 e da amostra de IT com razão $(Y/Y^*_{(SN)} = (Y_{(SN)} / (0,5Dy_{(SN)} + 0,5Ho_{(SN)})) = 1,798$.

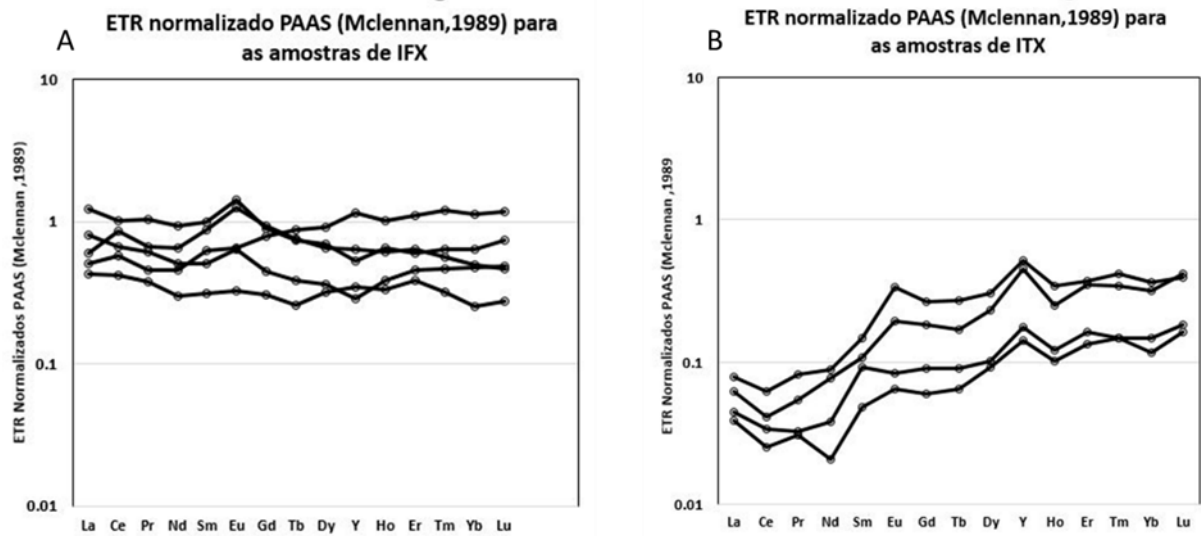


Figura 16 - Elementos Terras Raras (ETR) normalizado ao padrão Post-Archean average Australian Shale (PAAS) (A) Diagrama de ETR normalizado ao PAAS para as amostras de IFX; (B) Diagrama de ETR normalizado ao ao PAAS para as amostras de ITX.

Quando normalizados ao condrito (Taylor e McLennan, 1985) as amostras de IFX (Figura 17A) mostram um maior enriquecimento de ETRL em relação ao ETRP do que as amostras de ITX (Figura 17B). O padrão das amostras de IFX é semelhante ao da amostra de IT (FD18_05).

A anomalia de Eu para todas as amostras indicam um leve padrão negativo com $(Eu/Eu^*_{(CN)}) = (Eu_{(CN)}/Sm_{(CN)}+Gd_{(CN)}) = 0,301 - 0,468$ para as amostras de IFX e $(Eu/Eu^*_{(CN)}) = (Eu_{(CN)}/Sm_{(CN)}+Gd_{(CN)}) = 0,289 - 0,547$ para o ITX.

Semelhante a anomalia de Eu, a anomalia de Ce também mostrou um padrão negativo para as amostras com $(Ce/Ce^*_{(CN)})=(Ce_{(CN)}/La_{(CN)}+Pr_{(CN)})= 0,486$ para o IT; $(Ce/Ce^*_{(CN)})=(Ce_{(CN)}/La_{(CN)}+Pr_{(CN)})= 0,429 - 0,678$ para as amostras de IFX e $(Ce/Ce^*_{(CN)})=(Ce_{(CN)}/La_{(CN)}+Pr_{(CN)})= 0,343 - 0,418$ para as amostras de ITX.

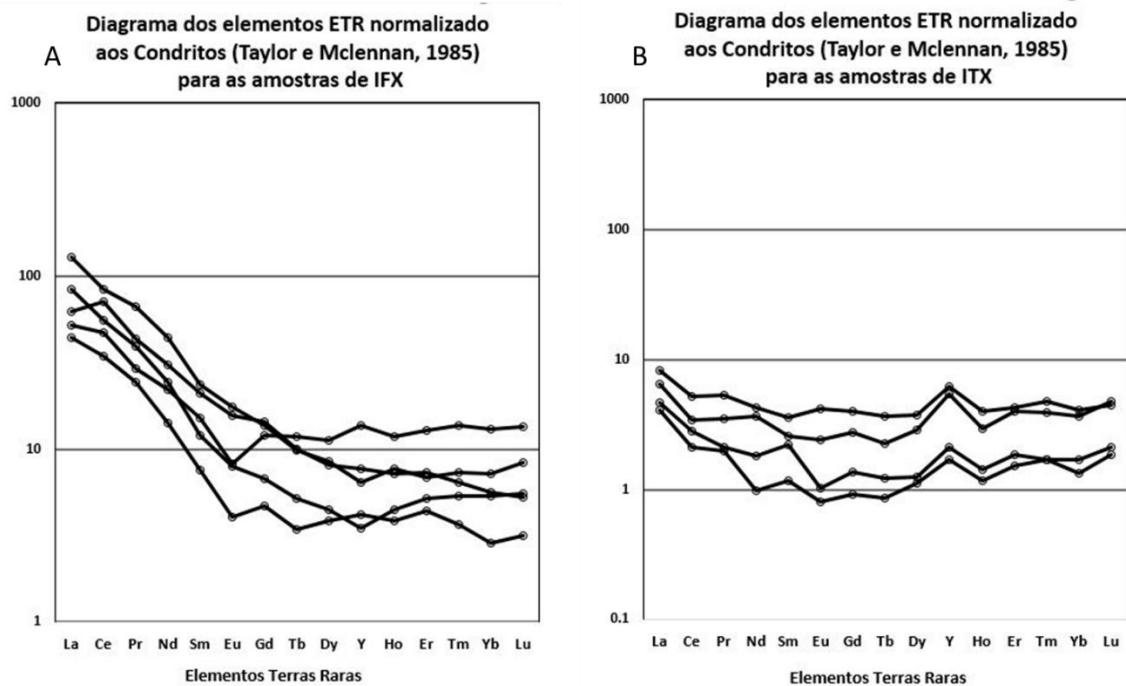


Figura 17 - Elementos Terras Raras (ETR) normalizados ao Condrito (A) Diagrama de ETR normalizado ao Condrito para as amostras de IFX; (B) Diagrama de ETR normalizado ao Condrito para as amostras de ITX

Discussão

Elementos maiores

As concentrações relativamente altas de fósforo nas amostras de ITX são associadas à presença de apatita nos itabiritos, assim como a possível presença de goetita também sugere uma certa contaminação de fósforo e manganês nas amostras de IFX.

O padrão dos elementos maiores (Figura 18) para as amostras de IFX e ITX da Serra do Sapo são similares aos mesmos padrões dos demais tipos de itabiritos que formam o depósito (Pires e Souza, 2014), com exceção a presença de álcalis, a alta concentração de Al_2O_3 e P_2O_5 para ambos os tipos de itabiritos, e a concentração relativamente elevada de TiO_2 principalmente para as amostras de ITX em relação as amostras de IT.

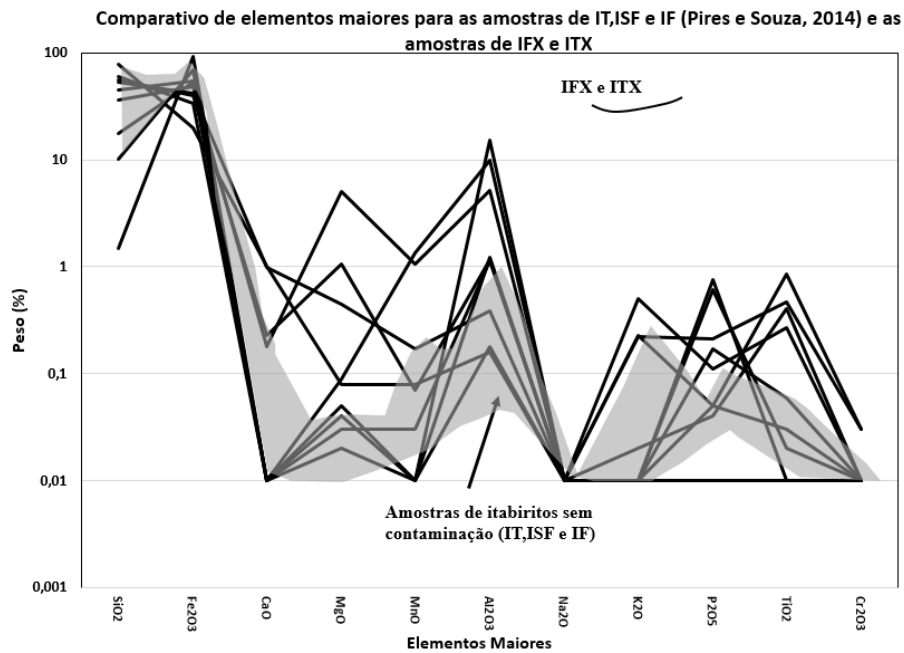


Figura 18 - Comparativo de elementos maiores para as amostras de IT, ISF e IF (Pires e Souza, 2014) e as amostras de formação ferrífera contaminada IFX e ITX.

Elementos traços

O estudo da composição química das fases minerais de formações ferríferas, principalmente dos elementos traço, é uma ferramenta importante para o entendimento da gênese destas rochas e da contribuição das fases na composição da rocha total. A abundância e a distribuição relativa dos elementos traços, principalmente dos elementos ETR, em rochas sedimentares é uma ferramenta poderosa para entender os ambientes geológicos e processos ocorridos, inclusive em formações ferríferas bandadas (e.g. Frei et al, 2008).

Peter (2003) divide as concentrações dos elementos que formam as formações ferríferas em duas diferentes subdivisões, hidrotermal e detrítica. Os elementos hidrotermais são correlacionados a composição da apatita (P_2O_5 , Sr e CaO), uma mistura de carbonato-sulfato-sais sulfetados (Co, Au, S, Sb, As, Mo, Zn, Pb). Os elementos detríticos são correlacionados às composições da clorita (MgO) - feldspato (Ba, K_2O , Rb, Cs) e também aos que compõem os alumino silicatos (Al, Ti, Cr, Ni, Ta, V, U, Th, Zr).

As baixas concentrações dos elementos Ga, Hf, Nb, Ni, Sc, Ta, V, U, Th, Zr para as amostras da Serra do Sapo sugerem que estas amostras não tiveram uma significativa contribuição detrítica.

De acordo com os critérios definidos por Peter, (2003), para a covariação Inter elementar das formações ferríferas, a concentração dos elementos traço é relativamente mais enriquecida em Rb, Cs e Sr, elementos de transição, e em Mo, Sb e As, elementos hidrotermais, do que em elementos detríticos. Esta correlação apenas pode ser observada para as amostras de ITX. As amostras de IFX (Figura 19) não apresentaram boa correlação entre os elementos traço, isto pode ser explicado pelo alto grau de intemperismo destas rochas que são em geral porosas e fragmentadas contendo uma quantidade superior de filossilicatos na sua composição.

Os gráficos para os elementos traços foram confeccionados e comparados com os mesmos resultados obtidos para as amostras dos diferentes tipos de Itabiritos da Serra do Sapo descritos por Pires e Souza (2014).

As amostras de ITX FD46_05 e FD 37_07 mostraram relativo enriquecimento dos elementos hidrotermais Mo, Zn,Cu e Pb se comparadas as demais amostras de IT do depósito. A amostra FD37_08 mostra-se mais enriquecida nos elementos de transição do que as demais amostras de IT e ITX.

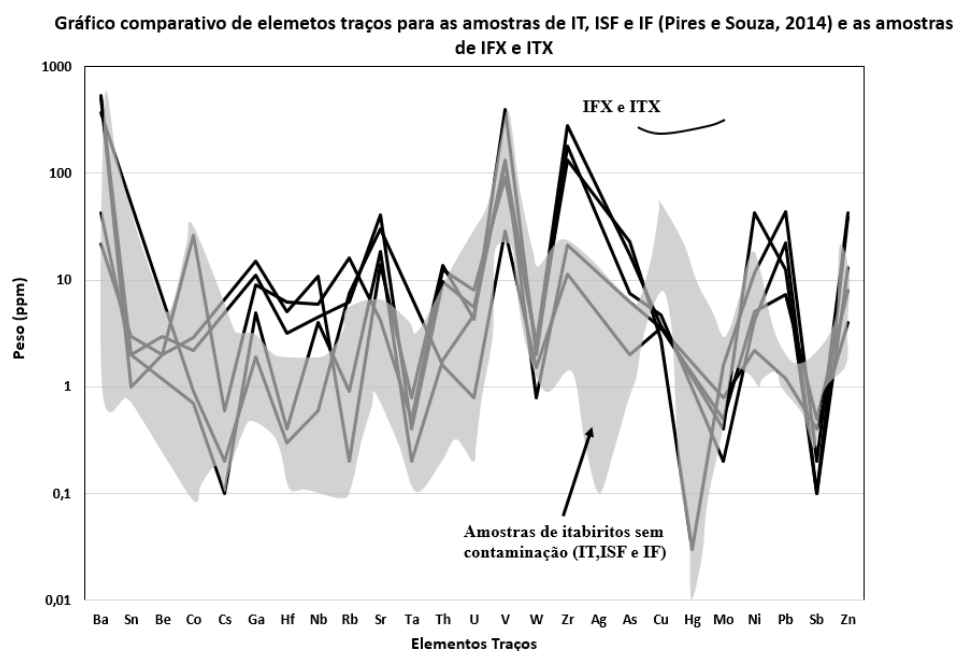


Figura 19 - Comparativo de elementos traço para as amostras de IT, ISF e IF (Pires e Souza, 2014) e as amostras de IFX e ITX

Elementos terras raras

Os teores dos elementos terras raras na formação ferrífera da Serra do Sapo são elevadas para as amostras de IFX podendo chegar a concentrações de 536 ppm e média de 23,57 ppm. Appel et al (1987) mostra a distribuição dos ETR como relacionada com o tipo de fácies, sendo o óxido o que apresenta os valores mais baixos.

Uma característica dos ETR é a baixa solubilidade em relação aos outros elementos, e conseqüentemente menor mobilidade durante o metamorfismo de baixo grau, alterações hidrotermais e o intemperismo, exceto se a razão fluido/rocha for muito elevada (Rollinson et al, 1995). Por este motivo a assinatura dos elementos terras raras em formações ferríferas bandadas está relacionada com a presença desses elementos na água do mar onde, o ferro foi precipitado. (Bekker et al, 2010).

A análise do comportamento dos ETR nas amostras de ITX e IFX foram realizadas normalizando os resultados ao Pos-Archean Australian Shale (PAAS) e para o Condrito. Há uma nítida variação no padrão de distribuição dos ETR das amostras de ITX e IFX (Figura 16). Itabirito friável contaminado-IFX mostra aumento de ETR, em especial leves em relação às amostras de ITX, devido à provável incorporação de ETR durante supergênese.

A anomalia de Ce se mostrou levemente negativa para a maioria das amostras de IT, ITX e IFX, com exceção as amostras FD 451_03, FD 451_04, FD18_05 e FD46_09. Anomalia de Ce na água do mar é sensível à variação das condições redox e tem sido utilizada para averiguar condições subóxicas ou anóxicas da coluna d'água (Dantas, 2017).

Bau & Dulsky (1996) descrevem este comportamento como indicativo de um ambiente oxidante durante a deposição das rochas. As amostras também registram tendência para anomalias positivas em La, mascarando as anomalias negativas em Ce, isto mostra que o conteúdo de oxigênio na água do mar durante a deposição era alto suficiente para oxidar o ferro.

A anomalia de Eu para grande parte das amostras indicam um leve padrão positivo com exceção as amostras FD37_07 e FD 46_09. Diferente das anomalias positivas de Eu que indicam uma proximidade com a fonte, as anomalias negativas indicam a deposição em posições distais das fontes hidrotermais ou fontes de temperaturas mais baixas Neri et al (2012).

Segundo Klein, (2005), diferenças na amplitude das anomalias de Eu resultam de um declínio da contribuição hidrotermal nas bacias oceânicas do arqueano e do Neoproterozoico, Bau & Moller (1993) atribuem essa redução à queda de temperatura das soluções hidrotermais.

O aumento dos elementos terras raras leves para as amostras de IFX (figura 16A) pode ter ocorrido durante a formação de agregados de magnetita e hematita microlamelar para formar hematita anédrica. Roy & Venkatesh, (2009) O aumento dos ETR sugere a possível presença de Fe no fluido da mineralização, Figueiredo e Silva et. al. (2008). Os fluidos desempenharam um papel importante na formação desses minérios (Brown 2008). O minério de ferro de alto teor é o resultado da remoção sequencial e substituição de minerais de ganga pelo processo hidrotérmico e supergênico. O IFX assim como o itabirito friável foi formado onde a precipitação de ferro era parcial ou ausente. Neste caso, o espaço lixiviado permaneceu e o minério tornou-se muito frágil entre os níveis do bandamento, desta forma o espaço intersticial geralmente é preenchido com gibbsita e/ou argilominerais. Os teores de Al_2O_3 e P_2O_5 destes litotipos estão relacionados a este processo, assim como a presença de minerais de mica branca e sericita entre as bandas (Figura 11 e 12).

Gutzmer et al. (2008) descreve que os depósitos de minério com alto teor de ferro que se formaram devido a processos supergênicos tem padrões de ETRs negativamente inclinados (relativamente enriquecidos em ETR leves) quando comparados às formações ferríferas menos alteradas, similar quando comparamos as amostras de ITX (Figura 16B) menos alterada com as amostras de IFX quando normalizado ao PAAS. Além disso, ele sugere que esta pode ser uma maneira possível de distinguir entre depósitos de minério que se formaram devido ao enriquecimento hipogênico em relação aos supergênicos, com os ETR pesados com maior mobilidade em um ambiente de baixa temperatura durante o intemperismo, resultando no enriquecimento relativo em ETR, leves no resíduo intemperizado.

CONCLUSÕES

As formações ferríferas da Serra do Sapo hospedam minérios classificados de acordo com o grau de intemperismo e compacidade das rochas. Afloramentos de IFX que ocorrem principalmente na borda leste da Serra do Sapo no contato com os xistos da Formação Meloso contém teores relativamente elevados de ferro, alumínio e fósforo.

Estudos petrográficos realizados nas amostras de IFX mostraram presença de minerais de mica branca (muscovita, sericita), akaganeita, clorita e gbsita como sendo as principais fontes de alumínio para este litotipo. A muscovita e a gbsita são encontradas no contato gradacional entre os xistos da formação meloso e os itabiritos da formação serra do sapo (Figura 12 e 13). Os altos teores de Al_2O_3 e P_2O_5 destes litotipos também são explicados pelo processo de formação supergênica, onde o espaço dos minerais lixiviados é preenchido por argilominerais e outros

minerais como clorita e gbsita (Figura 12 c). Cristais de turmalina descritos entre as fraturas dos grãos grossos de quartzo e raros cristais de apatita também foram descritos apesar de menor frequência se comparado as amostras de ITX.

Para o ITX os altos teores de fósforo estão relacionados com minerais de apatita que ocorrem com maior frequência neste litotipo. Minerais de clorita, muscovita, turmalina, anfibólio e zircão foram descritos como minerais acessórios. A presença dos cristais de turmalina, alinhados (figura 12F) intercrecidos entre as fraturas sugere uma possível origem hidrotermal para a formação destes minerais.

Raro cristal de granada (Figura 12H) e raro cristal de espinélio foram descritos como minerais acessórios dos itabiritos.

Dados geoquímicos de rocha total mostram importantes diferenças entre os tipos de minério. As amostras de IFX tem mais alto teor de Fe e tem altos teores de contaminantes como Al e P. as amostras de ITX tem baixos valores de LOI refletindo seu baixo teor de elementos indesejáveis. Dados de Elementos Terras Raras mostram que as amostras de IFX são enriquecidas em ETRs leves, o que pode refletir na mobilidade desses elementos durante o processo de enriquecimento da rocha.

O padrão ETR das amostras IFX se diferencia do conjunto de dados das amostras ITX, estando estes normalizados tanto ao PAAS quanto ao condrito.

O grau de enriquecimento do ETRL em relação ao ETRP é apresentado na razão normalizada PAAS de Sm e Yb (Sm/Yb); os valores para as amostras de IFX variam de 0,552 até 1,767 e para as amostras de ITX variam de 0,339 até 0,617. As razões das amostras de ITX ficaram próximas das razões do itabirito 0,370, enquanto as razões do IFX ficaram muito longe das razões do IF com média de 0,268.

As amostras de IFX enriquecidas em ETR leves também são relativamente enriquecidas em elementos móveis como Ba e Sr, e possuem maiores teores de ETR (Figura 16); isso indica que o enriquecimento é devido à mobilidade dos ETR leves, em vez de enriquecimento relativo de ETR leves em um ambiente intemperizado sem ETR pesados.

A evidência para a mobilização de ETRs leves é apoiada por correlações com as anomalias de Ce, e as amostras com o mais forte enriquecimento de ETRs leves apresentando anomalias de Ce negativas (Figura 16B). Isto mostra que o enriquecimento observado em ETR leves, Sr e Ba

está associado à remobilização destes elementos durante a fase de enriquecimento supergênico. A observação de que a maioria das amostras de IT e ITX não mostram nenhum enriquecimento relativo em REE pode indicar que os processos de hipogênicos, em vez de supergenicos, foram importantes na formação de minério.

Os dois litotipos também mostram diferentes razões de Y/Ho com variação de 20,526 até 30,693 para o IFX e 38,000 até 48,400 para o ITX. A razão Y/Ho típica da água do mar fica entre 60 e 90, enquanto os valores para águas continentais variam de 26 a 27 (Planavsky et al, 2010). Isto mostra que as amostras que apesar da influência ser maior para as amostras de IFX. Todas as amostras têm alguma influência de água continental.

Os valores elevados de Cu, Pb e Sb para as amostras FD37_07 e FD 46_05 sugerem uma contribuição hidrotermal na formação destas amostras.

REFERÊNCIAS

- Almeida Abreu, P. A. & Rolim, V. K.; Quintão N. H.; Magalhães, P. M.; Abreu, F. R. (1988) -Tectônica de Nappes na Região de Ouro Fino, Conceição do Mato Dentro, MG. *Revista Brasileira de Geociências*, 18 (2), 141-148.
- Almeida Abreu P. A. (1989). *Geologia das quadrículas Onça e Cuiabá (Gouveia-MG) – região meridiana central da Serra do Espinhaço Meridional*. Dissertação (Mestrado), Rio de Janeiro: Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 75 p.
- Almeida-Abreu P.A. (1993). *A evolução geodinâmica da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil*. Tese (Doutorado). Freiburg Alemanha: University Freiberg, 150 p.
- Almeida-Abreu P.A. & Renger F.E. (2002). Serra do Espinhaço Meridional: um orógeno de colisão do mesoproterozóico. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(1): 1-14.
- Appel, P.W.U. (1987). Geochemistry of the Early Archean Isua Iron Formation, West Greenland. In: P.W.U. Appel & G.L. LaBerge (eds.) *Precambrian Iron-Formations*. Athens. Theophrastus Publications, p. 31-69.
- Bekker, A., Slack, J.F., Planavsky, N., Krapez, B., Hofmann, A., Konhauser, K. O., Rouxel, O. J. (2010). Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. *Economic Geology*, 105: 467-508.
- Bau, M., Dulski, P. (1996). Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 79 (1-2): 37-55.
- Brown, P. E. (2008). Brief history of high-grade iron ore mining in North America (1948 -2008). *Econ. Geol. (SEG Reviews)* 15, 361-380.
- Cabral, A.R.; Tupinambá, M.; Lehmann, B. (2013). Spessartine in compact-hematite rock, Southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, and genesis of compact hematite. *Mineralogical Magazine*, 77(8), 3197-3215.
- Chemale, Jr, F., Dussin, I. A., Martins, M.S., dos Santos, M.N. (2011). Nova abordagem tectono-estratigráfica do Supergupo Espinhaço em sua porção meridional (MG). *Geonomos*, 19(2), 173-179.

- Chemale Jr.F., Dussin I.A., Alkmim F.F., Martins M.S., Queiroga G., Armstrong R., Santos M.N., (2012). Unraveling a Proterozoic basin history through detrital zircon geochronology: The case of the Espinhaço Supergroup, Minas Gerais, Brazil. *Gondwana Research*. 22(1), 200–206.
- Conliffe, J. (2016). Geology and Geochemistry of high-grade iron-ore deposits in the Kivivic, Timmins and Ruth lake areas, western Labrador. Current Research, Report 16 – 1, 1- 26.
- Couto, M.L.F. (2009). *Caracterização de Alumínio e Fósforo em Minério de Ferro*. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas UFOP. 102p.
- Dantas A.R. (2017). *Petrografia e litoquímica de rochas ferríferas na região central do estado de Rio Grande do Norte (Domínio Rio Piranhas – Seridó, NE da Província Borborema)*. Dissertação (Mestrado). Natal: Centro de Ciências exatas e da Terra UFRN. 170p
- Eriko, N.P.Z (2010) – Integração de dados aerogeofísicos, estruturais e geoquímicos para caracterização de formação ferrífera bandadas na região de Itapanhoacanga, MG. Tese (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências UNB. 96 p.
- Eschwege W.L.V. (1822). Geognostisches Gemälde von Brasilien und wahrscheinliches Muttergestein der Diamanten. Weimar, *Landes Industrie Comptoir*, 44p.
- Figueiredo e Silva, R. C., Lobato, L. M., Rosiere, C. A., Hagemann, S., Zucchetti, M., Barrs, F. J., Morais, R. and Andrade, I. (2008). A hydrothermal origin for the jaspitite-hosted, giant Serra Norte iron ore deposits in the Carajas mineral province, Para State, Brazil. *Econ. Geol. (SEG Reviews)* 15, 255- 290.
- Gross, G.A. (1996): Algoma-type Iron-formation, *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, 2 - Metallic Deposits*, Lefebvre, D.V. and Høy, T, Editors, British Columbia Ministry of Employment and Investment, Open File 1996-13, pages 25-28. Grossi-Sad J. H., Mourão M. A. A., Guimarães M. L. V., Knauer L. G. (1997). Geologia da Folha Conceição do Mato Dentro. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coordenadores e editores). Projeto Espinhaço em Cd-Rom (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG, 2533-2693
- Gutzmer, J., Chisonga, B.C., Beukes, N.J. and Mukhopadhyay, J. (2008). The geochemistry of banded iron formation-hosted high-grade hematite-martite iron ores. *Reviews in Economic Geology*, 15, 157 – 183.
- Hagemann S.G., Rosiere C., Gutzmer J., Beukes N.J. (2008). Glossary of Terms Banded Iron-Formation related high-grade iron ore. In: Hagemann S.G., Rosiere C., Gutzmer J., Beukes N. (eds.) High-grade BIF-related iron mineralization. *Reviews in Economic Geology*, 15, 411-414.
- Klein, C. (2005). Some Precambrian banded iron- formations (BIFs) from around the world: Their age, geologie, setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry and origin. *American Mineralogist*, 90; 1473-1499.
- Knauer L. G. (1990). *Evolução geológica do Pré-cambriano da porção centro-leste da Serra do Espinhaço Meridional e metalogênese associada*. Dissertação (Mestrado). Campinas: Instituto de Geociências Unicamp, 298 p.
- Knauer L.G., Schrank A. (1993). A origem dos filitos hematíticos da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais. *Geonomos*, 1, 33-38.
- Kullerud, G., Donnay, G. & Donnay, J. D. H. (1969). Omission solid solution in magnetite: Kenotetrahedral magnetite. *Zeitschrift für Kristallographie* 128, 1-17.
- Lobato, L.M., Baltazar, O.F., Reis, L. B., Achtschin, A. B., Baars, F.J., Timbó, M.A., Berni, G.V., Mendonça, B.R. V, Ferreira, D.V. (2005). Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG Nota Explicativa. Belo Horizonte, CODEMIG.

- McLennan, S.M. (1989) Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of Provenance and Sedimentary Process. *Review of Mineralogy*, 21, 169-200.
- Martins-Neto M.A. (1998). O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: registro de uma bacia rifte-sag do Paleó/Mesoproterozóico. *Rev. Bras. Geociências*, 28,151 – 168
- Neri, M.E.V.; Rosiere, C.A.; Lana, C.C. (2013). Supergrupo Minas na serra do Bom Sucesso, extremo sudoeste do Quadrilátero Ferrífero- MG: Petrografia, geoquímica e isótopos de U-Pb. *Geol. São paulo, USP. Série Científica* v.13 (2), 175-202.
- Nunes, A.P.L., (2009). *Flotação de fosfatos presentes em minérios de ferro brasileiros*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Pós-Graduação em Engenharia metalúrgica e de Minas UFMG. 170p.
- Pflug, R. (1965). *A geologia da parte meridional da Serra do Espinhaço e zonas adjacentes*. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, 226. 51 p.
- Pflug, R. (1968). *Observações sobre a estratigrafia da Série Minas na região de Diamantina, Minas Gerais*. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, 142. 20 p.
- Pires e Souza, A. A. (2014). Caracterização Mineralógica de itabiritos da Serra do Sapo, MG: Aplicação da técnica mineral liberation analyser – MLA. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências UFMG. 121p.
- Pires e Souza, A. A., Figueiredo e Silva, R. C. Rosière, C. A. Dias, G. S. Morais, F.P. (2014). Estudos Geoquímicos de itabiritos da Serra do Sapo, Espinhaço Meridional, Minas Gerais. *Geonomos*, 22 (2), 1-17.
- Queiroz, J R C et al (2012). Effect of airborne particle abrasion protocols on surface topography of Y-TZP ceramic. *Cerâmica*, 58; 253-261.
- Renger F. (1972). As rochas ultrabásicas da Serra do Espinhaço, MG. *Rev. Bras. Geociências*, 2.151–160.
- Rolim, V. K. (2016). As formações ferríferas da região de Conceição do Mato Dentro- MG: Posicionamento Estratigrafico, Evolução tectônica, geocronologia, características geoquímicas e gênese dos minérios. Tese (Doutorado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências – UFMG.
- Rolim, V. K.; Rosiere, C. A.; Santos, J.O. S.; McNaughton, N.J. (2016). The Orosirian-Statherian banded iron formation-bearing sequences of the southern border of the Espinhaço Range, Southeast Brazil. *Journal Of South American Earth Science*.65, 43-66.
- Rosiere, 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.
- Roy, S.; Venkatesh, A. S. (2009). Mineralogy and geochemistry of banded iron formation and iron ores from eastern India with implications on their genesis. *J. Earth Syst. Sci.*118 (6), 619- 641.
- Santos, L.D. Brandão, P.R. G. (2002). Mineralogical, microchemical and microstructural study of brazilian iron ores.In. *Proceeding of the Second International Conference on the Iron Ore Industry: Today and Tomorrow (TIOITT), Kiruna*, 90-103.
- Silva, J. P. P., Pinheiro, V. S., Araújo, F. S. D. e Leite, J. Y. P. (2009), Caracterização do rejeito de lavra garimpeira de esmeralda. Belém-PA: *IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica*.
- Scholl W.U. & Fogaça A.C.C. (1979). *Estratigrafia da Serra do Espinhaço na região de Diamantina. Diamantina: Anais Simp. Geol. MG*, 55-73.

Schulze, D.G. and Schwertmann, U. (1987). The influence of aluminum on iron oxides. XIII. Properties of goethite synthesized in 0.3 M KOH at 25°. *Clay Miner.*22, 83-92.

Silva, J. P. P., Pinheiro, V. S., Araújo, F. S. D. e Leite, J. Y. P. (2009). Caracterização do rejeito de lavra garimpeira de esmeralda. Belém –PA: IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica.

Souza, D.V.M. (2016). *Estudo Geoquímico-Mineral das formações ferríferas bandadas do sinclinal gandarela, Quadrilátero Ferrífero-MG*. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto: Departamento de Geologia UFOP. 109p

Spier, C.A (2005). Geoquímica e Gênese das formações ferríferas bandadas e do minério de ferro da mina de águas claras, quadrilátero ferrífero, MG. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.

Stanjek, H. and Schwertmann, U, (1992). The influence of aluminum on iron oxide.Part. XVI; Hydroxyl and aluminum substitution in synthetic hematite. *Clays and Clay Minerals*, 40 (3), 347-354.

Taylor, St.R., McLennan, S.M., (1985). The Continental Crust: its Composition and Evolution. *Blackwell Scientific Publications*. Geoscience texts. 312p

Volkert, C. A. and Minor, A. M.; (2007). Focused Ion Beam Microscopy and Micromachining; *MRS BULLETIN*, 32 (5). 389-399.

4. CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO NO MLA

4.1. MLA – ASPECTOS GERAIS

O sistema MLA é o mecanismo que permite combinar análise de imagens por elétrons retro espalhados (BSE) e espectros de raios X.

O uso de imagens por BSE para análise de grãos tem vantagem de apresentar uma resolução com qualidade superior à obtida por raios X. Esta qualidade de análise é essencial para os casos em que as fases constituintes apresentam tons de cinza bem distintos. Por outro lado, as análises por raios X são muito úteis para distinguir fases que possuem sobreposição de tons de cinza contendo composições químicas diferentes (Carmo S.S., 2015).

Para usar o MLA na análise de liberação mineral a amostra processada na planta contendo finas partículas dos minerais deve ser preparada com o uso de uma resina epoxy através de seções polidas, assim como as amostras de lâmina petrográfica também devem estar polidas com carbono antes de serem inseridas no sistema. Inevitavelmente, algumas partículas na preparação ficarão em contato umas com as outras e isto pode interferir nos resultados e deve ser tratado separadamente. O sistema MLA tem uma função de detecção para essa aglomeração de partículas e separação de acordo com o processo de análise. (GU, 2003)

Um dos métodos utilizados para realizar esta desaglomeração de partículas no MLA (figura 20) é a segmentação de partículas, sendo este o método o mais comum usado para a identificação e liberação das fases minerais e a determinação do limite entre as partículas. A segmentação de imagens feita pelo MLA identifica e separa as regiões com mais ou menos níveis de cinza homogêneos. O nível de cinza para cada região da amostra é diretamente relacionado com o número atômico dos elementos que formam o mineral. (GU, 2003).

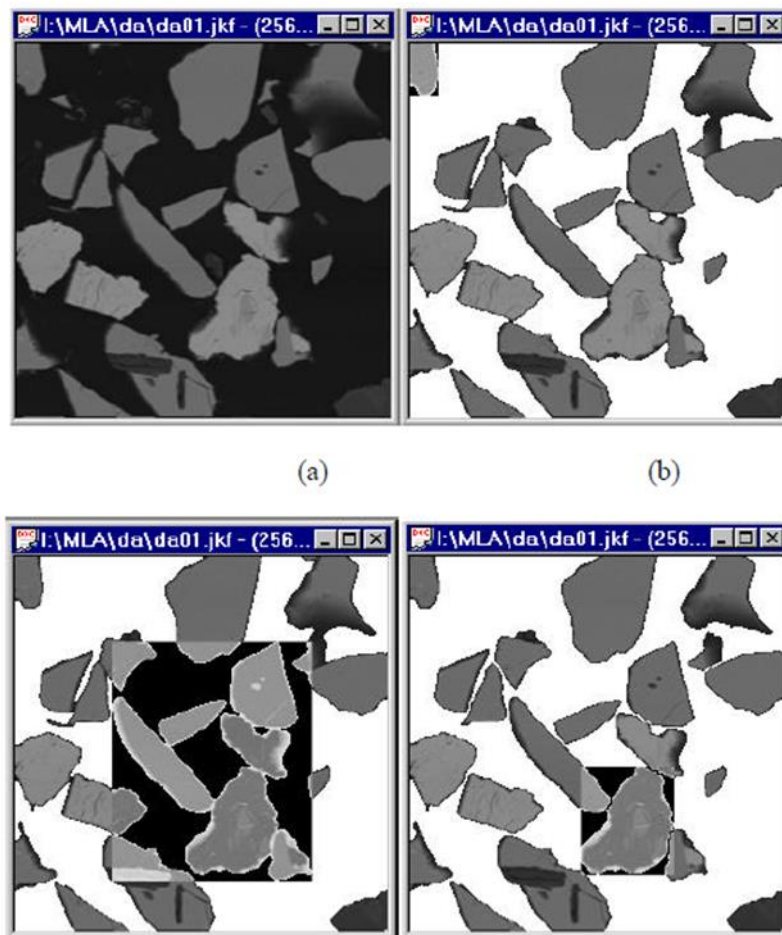


Figura 20 - Exemplo do processo de desaglomeração; a) Imagem original BSE; b) Depois da remoção do fundo (Background), notando a presença de aglomerados; c) Partículas de aglomerados realçada; d) depois da desaglomeração, o aglomerado de partículas é dividido em 6 partículas, uma delas é realçada para identificar a desaglomeração (GU, 2003).

Se o sistema é muito estável e sem ruído, cada mineral na amostra terá um valor de tom de cinza bem definido na imagem BSE, definido sob um conjunto particular de condições de medição. Na prática, no entanto, o nível de cinza de um mineral pode variar em certa medida por variação da corrente do feixe de elétrons incidente durante o período de 1 a 5 horas, sendo este o período

necessário para medir a amostra (situação usual para filamento de tungstênio) (Carmo S.S., 2015).

Avanços tecnológicos como o aumento da capacidade gráfica dos dispositivos de captura e análise de imagens tem gradativamente reduzido os custos dos equipamentos utilizados nesse tipo de análise. A essência do problema envolvendo a determinação do espectro de liberação é a necessidade de reconhecer que ele é de natureza geométrica e que a geometria nestes casos é muito irregular. A trama entre os minerais é muito variada dificultando a descrição quantitativa precisa entre os minerais. (Delbem, 2010)

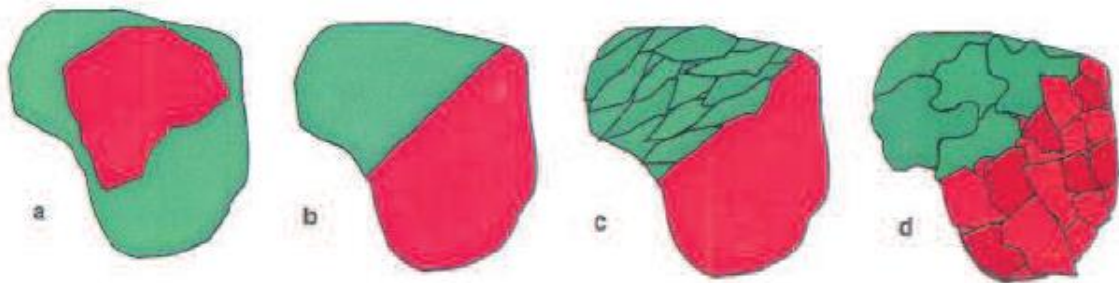


Figura 21- Representação apresentando liberação de partículas aparentemente idênticas, mas trama diferentes. (Pirard et al, 2007)

A quantificação de fases, por análise de imagens, tem a sua limitação fundamental quando não há contraste entre as fases que possa ser detectado no processamento da imagem (Figura 21). No caso das imagens de elétrons retroespalhados existe um exemplo clássico, a separação de hematita e magnetita, e de calcopirita e esfalerita. Hematita e magnetita são basicamente idênticas quimicamente, e somente análises químicas pontuais quantitativas poderiam detectar a diferença pela sua estequiometria. Já a par calcopirita esfalerita pode ser facilmente separado com informações de EDS qualitativas mínimas, como a presença de Zn ou Cu, por exemplo. Baseado nesta idéia, foram lançados por centros de pesquisa australianos, em associação com fabricantes de MEV's, dois sofisticados e dispendiosos sistemas de análise de imagens com dados químicos, QEM*SCAN (SCIRO e LEO) e MLA (JK Centre e FEI). O primeiro utiliza uma bateria de detectores de EDS para efetuar imagens onde a categorização dos seus pixels se baseia exclusivamente na composição química detectada. O MLA utiliza imagens de elétrons retroespalhados para definir as partículas, e adicionalmente pode categorizá-las pela sua composição, medida por pelo menos um detector de EDS.

Os dados gerados pelo MLA podem determinar a mineralogia, tamanho de grão, liberação mineral, além do detalhe das associações de cada mineral em partículas mistas.

4.2. RESULTADOS DO MLA

As amostras foram primeiramente separadas de acordo com os teores de Fe, Al e P determinadas pelas análises de XRF realizadas nos intervalos dos testemunhos de sondagem. O grau de intemperismo foi determinado pela descrição visual da rocha. A característica física dos itabiritos é classificada usando o fator de intemperismo da rocha (WI) em uma escala de 1 a 6. Nesta escala 1 a 2 representam materiais duros, assim como amostras de rocha fresca, 3 e 4 materiais com médio grau de dureza assim como as amostras de ITX e 5 e 6 amostras de material friável representadas neste estudo com as amostras de IFX.

4.2.1. Identificação das amostras analisadas

A caracterização ideal de um depósito usando o MLA requer uma lista de minerais apropriada. O arquivo de minerais fornecido pelo MLA contém minerais comuns e foi usado como ponto de partida e modificado para se adequar a mineralogia descritas nas rochas do depósito. O conhecimento mineralógico inicial das amostras foi obtido a partir do conhecimento das litologias da área de estudo e utilizando previamente para esta amostras, técnicas analíticas como MEV/EDS e microscopia óptica para produzir a lista de minerais analisados.

4.2.1.1. Amostras de hematita e magnetita

A magnetita e a hematita diferem em cerca de 3% em peso em seu conteúdo de Fe, o que não é suficiente para permitir que elas sejam distinguidas usando os espectros de raios X durante o sistemas de análise de imagens automatizadas, Rollinson et al (2011), Andersen et al., (2009), Anderson et. al. (2014). Para o sistema baseado em MEV, a informação composicional é obtida a partir das relações entre o número de BSE produzido e o número atômico médio (NAM) dos minerais amostrados, Chescoe e Goodhew, (1990). A taxa BSE/ NAM fornece o nível de contraste na imagem digital gerada. O mapeamento EDS também pode fornecer informações de composição, no entanto, para os minérios de ferro, as dificuldades surgem devido às semelhanças apresentadas pelos seus números atômicos médios e composições químicas.

As limitações desta técnica de distinção fizeram com que não houvesse distinção destes minerais entre as amostras, sendo todos estes classificados na categoria chamada Fe óxidos. Apenas uma fase de Óxido de Fe +Ti pode ser separada na classificação.

4.2.1.2. *Goetita*

A Goetita por ter um coeficiente de BSE significativamente menor do que qualquer outro mineral foi separada da magnetita e da hematita usando o sinal de BSE. A goetita também tem uma densidade menor do que estes minerais, o que facilita na distinção das partículas. A Goetita ocorre principalmente nas amostras de IFX, mas também está presente no ITX. Este mineral contém variações de Al e P na sua composição e estes elementos são importantes para a qualidade e processamento do minério de ferro.

4.2.1.3. *Clorita*

As cloritas são conhecidas por sua substituição cationica substancial, variada e frequentemente contínua, dificultando a atribuição de nomes específicos, Deer et al (1992). Neste trabalho foi possível identificar as cloritas ricas em Mg, clinocloro e as demais partículas deste mineral foram incluídas na categoria das cloritas com Mg baixo ou não detectado.

A microscopia óptica confirmou a presença de clorita entre as amostras dos itabiritos

4.2.1.4. *Moscovita*

Silicatos estão presentes como cristais de moscovita que ocorrem orientados aos granoblastos de quartzo e hematita na formação ferrífera. Cristais compactos e porosos de óxido de ferro são frequentemente observados na microscopia óptica com minerais de ganga nos interstícios com quartzo e filossilicatos.

4.2.2. *Composição Mineralógica*

As amostras estudadas apresentam variação mineralógica entre os dois litotipos e presença relevante de filossilicatos na composição das rochas. A hematita é o mineral-minério e os principais minerais de ganga são quartzo, moscovita, clorita, apatita e gibsitita.

A amostra total de IFX é composta por 44,2% de hematita, 22,25% de quartzo, 14,23% de moscovita, 10,83% de clinocloro, 3,07% de clorita, 2,75% de oxido de Fe +Ti, 0,5% de apatita, 0,04% de gibbsita, e 0,005% de carbonato. O conteúdo de hematita na fração mais fina, granulometria <38 μm é de 54,55%, na granulometria 300 μm o conteúdo é de 51,50%, porém, na granulometria 74 μm o conteúdo é de 39,75%. O conteúdo de moscovita (figura 22) é maior nas granulometrias 53 μm e <38 μm . A goetita ocorre na granulometria <38 μm enquanto clorita, clinocloro e a fase Ox Fe + Ti está presente em todos os intervalos.

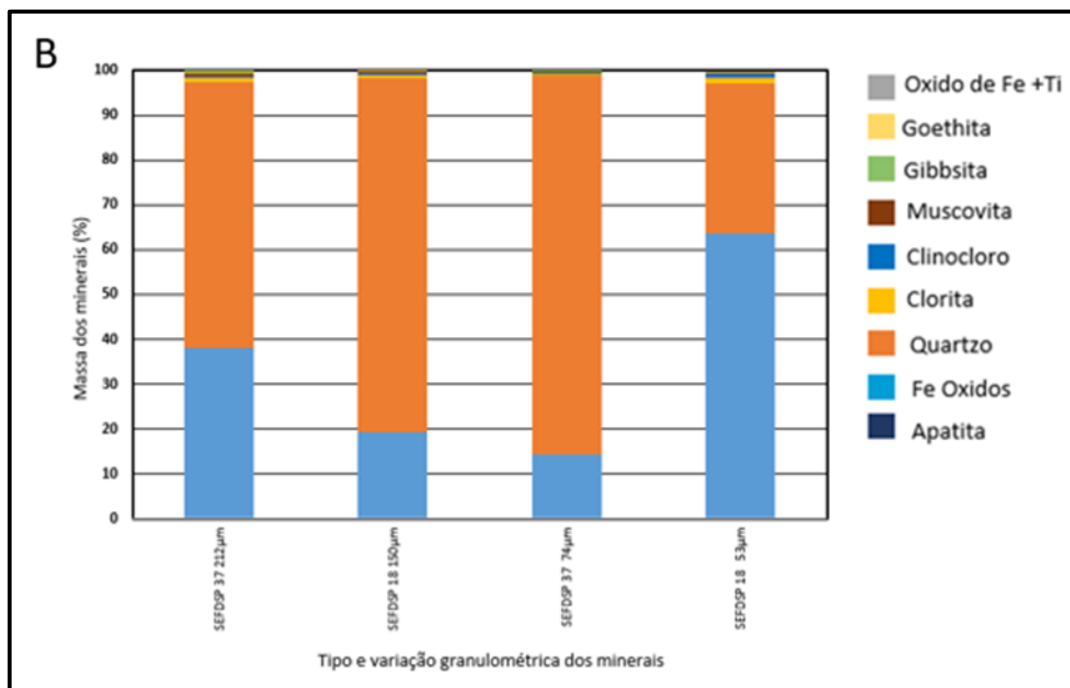


Figura 22- Associação dos minerais que compõem as amostras de IFX (A) (Amostras SEFDSP 46 300 μm ; 212 μm ; 150 μm ; 74 μm ; 53 μm ; -38 μm) e ITX (B) (Amostras SEFDSP 37 212 μm ; 74 μm e SEFDSP 18 150 μm ; 53 μm)

A amostra total de ITX é composta por 64,24% de quartzo, 33,8% de hematita, 0,71% de clorita, 0,22% de Goetita, 0,21% de moscovita e 0,22% de apatita. O conteúdo de hematita na fração 212 μm e de 38,06%, na fração mais fina de 53 μm o conteúdo de hematita é de 63,74%.

Tabela 6 – Composição mineralógica das amostras de IFX (MEV/MLA)

	Minerais (% em massa)	Fração (μm)					
		<38 μm	53 μm	74 μm	150 μm	212 μm	300 μm
IFX	Óxido de Ferro	54.55	32.21	39.75	42.89	44.30	51.51
	Quartzo	5.65	26.30	30.95	26.80	23.39	20.45
	Clorita	3.82	2.15	2.65	3.75	4.16	1.93
	Clinocloro (clorita rica em Mg)	11.91	13.58	8.93	10.80	10.37	9.40
	Moscovita	16.66	21.44	11.62	10.58	12.73	12.37
	Oxido de Fe + Ti	3.21	2.25	3.52	2.82	2.54	2.14
	Goetita	2.41	0.15	0.23	0.22	0.19	0.21
	Apatita	0.49	0.41	0.42	0.50	0.59	0.54
	Gibsita	0.01	0.01	0.02	0.04	0.07	0.10
	Outros	1.29	1.48	1.90	1.61	1.68	1.35

Tabela 7 – Composição mineralógica das amostras de ITX (MEV/MLA)

	Minerais (% em massa)	Fração (μm)			
		212 μm	74 μm	150 μm	53 μm
ITX	Óxido de Ferro	38.07	14.17	19.24	63.74
	Quartzo	59.48	84.79	79.16	33.54
	Clorita	0.92	0.34	0.61	0.99
	Clinocloro (clorita rica em Mg)	0.10	0.05	0.29	0.66
	Apatite	0.11	0.10	0.20	0.47
	Outros	1.32	0.55	0.51	0.59

4.2.3. Estudo do grau de liberação das amostras

Os estudos de grau de liberação dos óxidos/hidróxidos de ferro em relação a ganga seguem os conceitos de Gaudin (1971) e foram indicados de acordo com as proporções relativas dos minerais presentes e contabilizados nas partículas. A partir do grau de liberação e do entendimento da mineralogia das rochas que compõem a mineralização é possível entender e prever os diferentes comportamentos dos minerais em diferentes etapas do processo de beneficiamento visando a estabilidade na alimentação dos processos.

A figura 23 mostra as curvas de liberação das partículas de óxido de ferro para as amostras de IFX e ITX mostrando que a liberação diminui com o aumento da fração granulométrica.

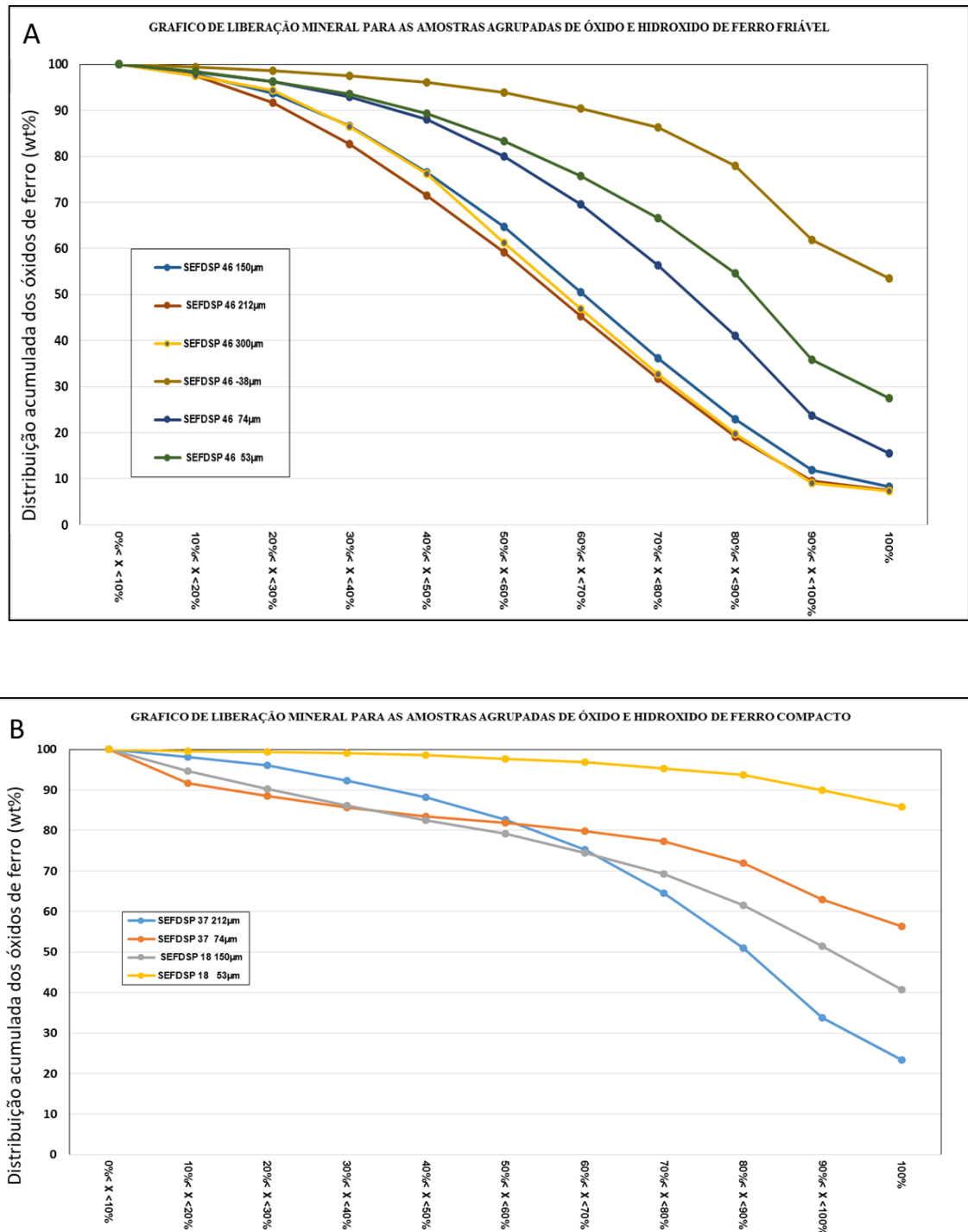


Figura 23 – Diagrama de liberação dos óxidos de ferro por composição de partícula. (A) Amostras de IFX e (B) amostras de ITX.

5. CONCLUSÕES

Os itabiritos da Serra do Sapo mostram diferentes níveis de teores de ferro e outros elementos de acordo com a ação de mecanismos suergênicos e hipogênicos de enriquecimento que podem ocorrer nesta região.

A caracterização mineral feita através dos estudos petrográficos nas amostras de IFX identificou a presença de minerais de mica branca (muscovita-sericita), akaganeita, clorita e gibsita como sendo as principais fontes de alumínio para este litotipo. A muscovita e a gibsita são encontradas no contato gradacional entre os xistos da Formação Meloso e entre os itabiritos da Formação Serra do Sapo. Os altos teores de Al_2O_3 e P_2O_5 destes litotipos também são explicados pelo processo supergênico, onde o espaço dos minerais lixiviados é preenchido por argilominerais e outros minerais como clorita e gibsita.

Nas amostras de ITX foram descritos com maior frequência a presença cristais de turmalina entre as fraturas dos grãos de quartzo e cristais de apatita que explicam os teores mais elevados de fósforo que ocorrem neste litotipo. Minerais de clorita, muscovita, anfibólio e zircão foram descritos como minerais acessórios.

Dados geoquímicos de rocha total mostram importantes diferenças entre os tipos de minério. As amostras de IFX tem mais alto teor de Fe e tem altos teores de contaminantes como Al e P. as amostras de ITX tem baixos valores de LOI refletindo seu baixo teor de elementos indesejáveis. Dados de Elementos Terras Raras mostram que as amostras de IFX são enriquecidas em ETRs leves, o que pode refletir na mobilidade desses elementos durante o processo de enriquecimento da rocha.

O padrão ETR das amostras IFX se diferencia do conjunto de dados das amostras ITX, estando estes normalizados tanto ao PAAS quanto ao condrito.

O grau de enriquecimento do ETRL em relação ao ETRP é apresentado na razão normalizada PAAS de Sm e Yb (Sm/Yb); os valores para as amostras de IFX variam de 0,552 até 1,767 e para as amostras de ITX variam de 0,339 até 0,617. As razões das amostras de ITX ficaram próximas das razões do itabirito 0,370, enquanto as razões do IFX ficaram muito longe das razões do IF com média de 0,268.

As amostras de IFX enriquecidas em ETR leves também são relativamente enriquecidas em elementos móveis como Ba e Sr, e possuem maiores teores de ETR (Figura 8); isso indica que o enriquecimento é devido à mobilidade dos ETR leves, em vez de enriquecimento relativo de ETR leves em um ambiente intemperizado sem ETR pesados.

A evidência para a mobilização de ETRs leves é apoiada por correlações com as anomalias de Ce, e as amostras com o mais forte enriquecimento de ETRs leves apresentando anomalias de Ce negativas (Figura 12B). Isto mostra que o enriquecimento observado em ETR leves, Sr e Ba está associado à remobilização destes elementos durante a fase de enriquecimento supergênico. A observação de que a maioria das amostras de IT e ITX não mostram nenhum enriquecimento relativo em REE pode indicar que os processos de hipogênicos, em vez de supergênicos, foram importantes na formação de minério.

Os dois litotipos também mostram diferentes razões de Y/Ho com variação de 20,526 até 30,693 para o IFX e 38,000 até 48,400 para o ITX. A razão Y/Ho típica da água do mar fica entre 60 e 90, enquanto os valores para água continentais variam de 26 a 27 (Planavsky et al, 2010). Isto mostra que todas as amostras têm alguma influência de água continental.

Os valores elevados de Cu, Pb e Sb para as amostras FD37_07 e FD 46_05 sugerem uma contribuição hidrotermal na formação destas amostras.

Os estudos efetuados pelo MLA indicam que apesar de ambas as amostras mostrarem a mesma associação mineralógica existe uma diferença entre as proporções dos minerais de ganga que ocorrem nas amostras de itabirito friável contaminado, IFX e a associação mineralógica do ITX. A amostra de ITX mostrou uma menor quantidade de hematita (33,8%) e uma grande quantidade de grãos de quartzo (64,24 %). Para todos os intervalos granulométricos deste litotipo o quartzo se mostrou o principal mineral de ganga. Apatita e goetita apesar de ocorrerem em pequena proporção são os principais minerais portadores de fósforo da amostra de ITX. Apenas a fração 53 µm da amostra SEFDSP 18 mostrou concentrações granulométricas compatíveis aos intervalos granulométricos do IFX.

Para o IFX, os principais minerais de ganga são quartzo (22,25%) e moscovita (14,23%) podendo ser descrita também como sericita na descrição macroscópica. No intervalo granulométrico SEFDSP 46 53 µm a quantidade de moscovita é superior a de quartzo. Clorita e clinocloro ((Mg,Fe²⁺)₅Al(OH)), em concentrações maiores, juntamente com a moscovita e a gibsita aparecem como os principais minerais de Al.

REFERÊNCIAS

- Almeida Abreu, P. A. & Rolim, V. K.; Quintão N. H.; Magalhães, P. M.; Abreu, F. R. (1988) - Tectônica de Nappes na Região de Ouro Fino, Conceição do Mato Dentro, MG. *Revista Brasileira de Geociências*, 18 (2), 141-148.
- Almeida Abreu P. A. (1989). *Geologia das quadrículas Onça e Cuiabá (Gouveia-MG) – região meridiana central da Serra do Espinhaço Meridional*. Dissertação (Mestrado), Rio de Janeiro: Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 75 p.
- Almeida-Abreu P.A. (1993). *A evolução geodinâmica da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil*. Tese (Doutorado). Freiburg Alemanha: University Freiberg, 150 p.
- Almeida-Abreu P.A. & Renger F.E. (2002). Serra do Espinhaço Meridional: um orógeno de colisão do mesoproterozóico. *Revista Brasileira de Geociências*, 32(1): 1-14.
- Andersen, J.C.Ø., Rollinson, G.K., Snook, B., Herrington, R., Fairhurst, R.J., (2009). Use of QEMSCAN® for the characterization of Ni-rich and Ni-poor goethite in laterite ores. *Miner. Eng.* 22, 1119–1129.
- Anderson, K.F.E, Wall,F., Rollinson, G.K.,Moon,C.J.(2014) Quantitative mineralogical and chemical assessment of the Nkout iron ore deposit, Southern Cameroon. *Ore Geology Reviews*.(62) 25-39p.
- Appel, P.W.U. (1987). Geochemistry of the Early Archean Isua Iron Formation, West Greenland. In: P.W.U. Appel & G.L. LaBerge (eds.) *Precambrian Iron-Formations*. Athens. Theophrastus Publications, p. 31-69.
- Bekker, A., Slack, J.F., Planavsky, N., Krapez, B., Hofmann, A., Konhauser, K. O., Rouxel, O. J. (2010). Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. *Economic Geology*, 105: 467-508.
- Bau, M., Dulski, P. (1996). Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron- formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 79 (1-2): 37-55.
- Brown, P. E. (2008). Brief history of high-grade iron ore mining in North America (1948 - 2008). *Econ. Geol. (SEG Reviews)* 15, 361-380.

- Cabral, A.R.; Tupinambá, M.; Lehmann, B. (2013). Spessartine in compact-hematite rock, Southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, and genesis of compact hematite. *Mineralogical Magazine*, 77(8), 3197-3215.
- Carmo, S. S. (2015). Avaliação de procedimentos de preparação de amostras e rotinas de análises de imagem automatizada por microscopia eletrônica de varredura. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). 152p.
- Chemale, Jr, F., Dussin, I. A., Martins, M.S., dos Santos, M.N. (2011). Nova abordagem tectono-estratigráfica do Supergrupo Espinhaço em sua porção meridional (MG). *Geonomos*, 19(2), 173-179.
- Chemale Jr.F., Dussin I.A., Alkmim F.F., Martins M.S., Queiroga G., Armstrong R., Santos M.N., (2012). Unraveling a Proterozoic basin history through detrital zircon geochronology: The case of the Espinhaço Supergroup, Minas Gerais, Brazil. *Gondwana Research*. 22(1), 200–206.
- Chescoe, D.C., Goodhew, P.J., 1990. The Operation of Transmission and Scanning Electron Microscopes, *Microscopy Handbook*, first ed. Oxford University Press, Oxford, p. 20
- Conliffe, J. (2016). Geology and Geochemistry of high-grade iron-ore deposits in the Kivivic, Timmins and Ruth lake areas, western Labrador. Current Research, Report 16 – 1, 1- 26.
- Couto, M.L.F. (2009). *Caracterização de Alumínio e Fósforo em Minério de Ferro*. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas UFOP. 102p.
- Dantas A.R. (2017). *Petrografia e litoquímica de rochas ferríferas na região central do estado de Rio Grande do Norte (Domínio Rio Piranhas – Seridó, NE da Província Borborema)*. Dissertação (Mestrado). Natal: Centro de Ciências exatas e da Terra UFRN. 170p
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., (1992). *An Introduction to the Rock Forming Minerals* Longman Group, UK.
- Delbem, I.D., 2010. Digital Image Analysis and Processing Applied to Mineral Liberation Studies, (in Portuguese). Master Degree, Mineral Technology, PPGEM, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p.99.

Eriko, N.P.Z (2010) – Integração de dados aerogeofísicos, estruturais e geoquímicos para caracterização de formação ferrífera bandadas na região de Itapanhoacanga, MG. Tese (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências UNB. 96 p.

Eschwege W.L.V. (1822). Geognostisches Gemälde von Brasilien und wahrscheinliches Muttergestein der Diamanten. Weimar, *Landes Industrie Comptoir*, 44p.

Figueiredo e Silva, R. C., Lobato, L. M., Rosiere, C. A., Hagemann, S., Zucchetti, M., Barrs, F. J., Morais, R. and Andrade, I. (2008). A hydrothermal origin for the jaspilite-hosted, giant Serra Norte iron ore deposits in the Carajas mineral province, Para State, Brazil. *Econ. Geol. (SEG Reviews)* 15, 255- 290.

GAUDIN, A. M. (1971). Principles of Mineral Dressing. MacGraw-Hill Publishing Company.

Gross, G.A. (1996): Algoma-type Iron-formation, *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles, 2 - Metallic Deposits*, Lefebvre, D.V. and Höy, T, Editors, British Columbia Ministry of Employment and Investment, Open File 1996-13, pages 25-28. Grossi-Sad J. H., Mourão M. A. A., Guimarães M. L. V., Knauer L. G. (1997). Geologia da Folha Conceição do Mato Dentro. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coordenadores e editores). Projeto Espinhaço em Cd-Rom (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG, 2533-2693

GU, Y. (2003). Automated scanning electron microscope based liberation analysis. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, v.2, p. 33-41.

Gutzmer, J., Chisonga, B.C., Beukes, N.J. and Mukhopadhyay, J. (2008). The geochemistry of banded iron formation-hosted high-grade hematite-martite iron ores. *Reviews in Economic Geology*, 15, 157 – 183.

Hagemann S.G., Rosiere C., Gutzmer J., Beukes N.J. (2008). Glossary of Terms Banded Iron-Formation related high-grade iron ore. In: Hagemann S.G., Rosiere C., Gutzmer J., Beukes N. (eds.) High-grade BIF-related iron mineralization. *Reviews in Economic Geology*, 15, 411-414.

Klein, C. (2005). Some Precambrian banded iron- formations (BIFs) from around the world: Their age, geologie, setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry and origin. *American Mineralogist*, 90; 1473-1499.

Knauer L. G. (1990). *Evolução geológica do Pré-cambriano da porção centro-leste da Serra do Espinhaço Meridional e metalogênese associada*. Dissertação (Mestrado). Campinas: Instituto de Geociências Unicamp, 298 p.

Knauer L.G., Schrank A. (1993). A origem dos filitos hematíticos da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais. *Geonomos*, 1, 33-38.

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

Lobato, L.M., Baltazar, O.F., Reis, L. B., Achtschin, A. B., Baars, F.J., Timbó, M.A., Berni, G.V., Mendonça, B.R.V, Ferreira, D.V. (2005). Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG Nota Explicativa. Belo Horizonte, CODEMIG.

McLennan, S.M. (1989) Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of Provenance and Sedimentary Process. *Review of Mineralogy*, 21, 169-200.

Martins-Neto M.A. (1998). O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: registro de uma bacia rifte-sag do Paleo/ Mesoproterozóico. *Rev. Bras. Geociências*, 28, 151 – 168

Neri, M.E.V.; Rosiere, C.A.; Lana, C.C. (2013). Supergrupo Minas na serra do Bom Sucesso, extremo sudoeste do Quadrilátero Ferrífero- MG: Petrografia, geoquímica e isótopos de U-Pb. *Geol. São paulo, USP. Série Científica v.13 (2)*, 175-202.

Nunes, A.P.L., (2009). *Flotação de fosfatos presentes em minérios de ferro brasileiros*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Pós-Graduação em Engenharia metalúrgica e de Minas UFMG. 170p.

Pflug, R. (1965). *A geologia da parte meridional da Serra do Espinhaço e zonas adjacentes*. Rio de Janeiro: DNPM/DGM, 226. 51 p.

Pflug, R. (1968). *Observações sobre a estratigrafia da Série Minas na região de Diamantina, Minas Gerais*. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, 142. 20 p.

Pirard, E., Lebichot, S., Krier, W., (2007). Particle texture analysis using polarized light imaging and grey level intercepts. *Int. J. Miner. Process.* 84, 299–309.

- Pires e Souza, A. A. (2014). Caracterização Mineralógica de itabiritos da Serra do Sapo, MG: Aplicação da técnica mineral liberation analyser – MLA.. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências UFMG. 121p.
- Pires e Souza, A. A., Figueiredo e Silva, R. C. Rosière, C. A. Dias, G. S. Morais, F.P. (2014). Estudos Geoquímicos de itabiritos da Serra do Sapo, Espinhaço Meridional, Minas Gerais. *Geonomos*, 22 (2), 1-17.
- Plnavsky, N., Bekker, A., Rouxel, J. O., Kamber, B., Hofmann, A., Knudsen, A., Lyons, T.W., (2010). Rare Earth Element and yttrium compositions of Archean and Paleoproterozoic Fe formations revisited: New perspectives on the significance and mechanisms of deposition. *Geochimica et Cosmochimica* (74).6387-6405.
- Queiroz, J R C et al (2012). Effect of airborne particle abrasion protocols on surface topography of Y-TZP ceramic. *Cerâmica*, 58; 253-261.
- Renger F. (1972). As rochas ultrabásicas da Serra do Espinhaço, MG. *Rev. Bras. Geociências*, 2.151–160.
- Rolim, V. K. (2016). As formações ferríferas da região de Conceição do Mato Dentro- MG: Posicionamento Estratigráfico, Evolução tectônica, geocronologia, características geoquímicas e gênese dos minérios. Tese (Doutorado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências – UFMG.
- Rolim, V. K.; Rosiere, C. A.; Santos, J.O. S.; McNaughton, N.J. (2016). The Orosirian-Statherian banded iron formation-bearing sequences of the southern border of the Espinhaço Range, Southeast Brazil. *Journal Of South American Earth Science*.65, 43-66.
- Rollinson, G.K., Andersen, J.C.Ø., Stickland, R.J., Boni, M., Fairhurst, R., (2011). Characterization of non-sulphide zinc deposits using QEMSCAN®. *Miner. Eng.* 24, 778–787.
- Rosiere, 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.
- Roy, S.; Venkatesh, A. S. (2009). Mineralogy and geochemistry of banded iron formation and iron ores from eastern India with implications on their genesis. *J. Earth Syst. Sci.* 118 (6), 619-641.

Santos, L.D. Brandão, P.R. G. (2002). Mineralogical, microchemical and microstructural study of brazilian iron ores. In. Proceeding of the Second International Conference on the Iron Ore Industry: Today and Tomorrow (TIOITT), *Kiruna*, 90-103.

Silva, J. P. P., Pinheiro, V. S., Araújo, F. S. D. e Leite, J. Y. P. (2009), Caracterização do rejeito de lavra garimpeira de esmeralda. Belém-PA: *IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica*.

Scholl W.U. & Fogaça A.C.C. (1979). *Estratigrafia da Serra do Espinhaço na região de Diamantina. Diamantina: Anais Simp. Geol. MG*, 55-73.

Schulze, D.G. and Schwertmann, U. (1987). The influence of aluminum on iron oxides. XIII. Properties of goethite synthesized in 0.3 M KOH at 25°. *Clay Miner.*22, 83-92.

Silva, J. P. P., Pinheiro, V. S., Araújo, F. S. D. e Leite, J. Y. P. (2009). Caracterização do rejeito de lavra garimpeira de esmeralda. Belém –PA: *IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica*.

Souza, D.V.M. (2016). *Estudo Geoquímico-Mineral das formações ferríferas bandadas do sinclinal gandarela, Quadrilátero Ferrífero-MG*. Dissertação (Mestrado). Ouro Preto: Departamento de Geologia UFOP. 109p

Spier, C.A (2005). Geoquímica e Gênese das formações ferríferas bandadas e do minério de ferro da mina de águas claras, quadrilátero ferrífero, MG. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.

Stanjek, H. and Schwertmann, U, (1992).The influence of aluminum on iron oxide.Part. XVI; Hydroxyl and aluminum substitution in synthetic hematite. *Clays and Clay Minerals*, 40 (3), 347-354.

Taylor, St.R., McLennan, S.M., (1985). The Continental Crust: its Composition and Evolution. *Blackwell Scientific Publications*. Geoscience texts. 312p

Volkert, C. A. and Minor, A. M.; (2007). Focused Ion Beam Microscopy and Micromachining; *MRS BULLETIN*, 32 (5). 389-399.