



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**GÊNESE HIDROTHERMAL DO MINÉRIO DE FERRO DA JAZIDA  
MINERITA, PORÇÃO SUDOESTE DA SERRA DO CURRAL,  
QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS.**

**AUTORA:** ANNA ELISA PACHECO FURLAN JONAS

**ORIENTADORA:** PROF<sup>a</sup> DRA. LYDIA MARIA LOBATO

**CO-ORIENTADORA:** PROF<sup>a</sup> DRA. ROSALINE CRISTINA FIGUEIREDO E SILVA

Nº 197

**BELO HORIZONTE  
DATA (27/02/2019)**



## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

*GÊNESE HIDROTHERMAL DO MINÉRIO DE FERRO DA JAZIDA MINERITA, PORÇÃO SUDOESTE DA SERRA DO CURRAL, QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS.*

Anna Elisa Pacheco Furlan Jonas

**Dissertação de Mestrado** apresentada junto ao Colegiado de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de mestre.

**Banca Examinadora:** Dra. Mônica de Cássia Oliveira Mendes  
Dr. Lucas Eustáquio Dias Amorim

**Área de concentração:** Geologia Econômica

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2019.

J76g  
2019

Jonas, Anna Elisa Pacheco Furlan Jonas.

Gênese hidrotermal do minério de ferro da jazida minerita, porção sudoeste da Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais [manuscrito] / Anna Elisa Pacheco Furlan Jonas – 2019.

xv,118 f.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Lydia Maria Lobato.

Coorientadora: Rosaline Cristina Figueiredo e Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2019.

Área de concentração: Geologia Econômica.

Bibliografia: f. 109-118.

Inclui anexos e apêndices.

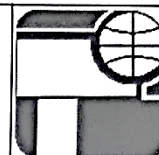
1. Geologia econômica – Minas Gerais – Teses. 2. Tempo geológico – Teses. 3. Minérios de ferro – Teses. 4. Alteração hidrotermal – Teses. 5. Quadrilátero Ferrífero (MG) – Teses. I. Lobato, Lydia Maria. II. Figueiredo e Silva, Rosaline Cristina. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 553 (815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Gênese hidrotermal do minério de ferro da jazida Minerita, porção sudoeste da Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**

**ANNA ELISA PACHECO FURLAN JONAS**

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 27 de fevereiro de 2019, pela banca constituída pelos membros:

Profa. Lydia Maria Lobato - Orientadora  
UFMG

Prof. Lucas Dias Amorim  
CDTN

Profa. Mônica de Cássia Oliveira Mendes  
VALE

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2019.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

À orientadora Prof<sup>a</sup> Dra. Lydia Maria Lobato por ter acreditado no projeto de pesquisa, não ter desistido mesmo com todas as dificuldades acadêmicas e financeiras, ter disponibilizado sua casa diversas vezes para análises petrográficas e discussões, por seus conselhos e por sua dedicação e preocupação.

À co-orientadora Prof<sup>a</sup> Dra. Rosaline Cristina Figueiredo e Silva por ter ajudado com dúvidas, dado dicas e ideias de como desenvolver o projeto, e pelo auxílio quando necessário.

Ao geólogo Luiz Eduardo Machado de Castro por ajudar na aquisição de todo material necessário.

Aos funcionários e diretoria da jazida Minerita por apoiarem o projeto de pesquisa e disponibilizarem amostras de testemunhos de sondagem, visitas e coleta de informações.

Ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) por toda infraestrutura disponibilizada, em especial aos funcionários da secretaria e aos do Laboratório de Laminação.

Ao Prof<sup>o</sup> Dr. Francisco Javier Rios e aos funcionários do Laboratório de Caracterização Mineral e Metalogenese do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) pelo auxílio nas análises de inclusões fluidas.

Ao Prof<sup>o</sup> Dr. Steffen Hagemann pelas análises de isótopos de enxofre na University of Western Australia.

Aos funcionários do Centro de Microscopia da UFMG pelas análises de microsonda, em especial ao Luis Garcia, Marcio Flores e Karina Costa.

Ao Prof<sup>o</sup> Cristiano Lana e as doutorandas Ana Alkmim e Adriana Trópia pelas análises de LA-ICP-MS em óxidos de ferro no Laboratório de ICP-MS do Departamento de Geociências (DGEO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UPOF).

A FAPEMIG pelo financiamento da pesquisa. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Aos colegas novos, em especial a doutoranda Carolin Kresse pela ajuda com as análises e interpretação de dados, ao Sylvio Gomes pelo auxílio na utilização do programa MacFlinco, ao Sergio Pereira pelas conversas e disposição, e a mestranda Joanna Araújo pelas viagens e troca de informações.

A todos os familiares pelo apoio, palavras de incentivo e confiança. Em especial à minha mãe e ao meu marido pelo estímulo em buscar novos conhecimentos, nunca desistir e estar sempre disposta a evoluir e alcançar novos objetivos de vida.

Aos meus amigos e colegas geológicos de longa data da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), e aos meus antigos professores que sempre estimularam à pesquisa.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. APRESENTAÇÃO .....	1
1.2. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO .....	3
1.3. OBJETIVO.....	3
1.4. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	4
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	5
2.1.1. Sequência estratigráfica.....	5
2.1.2. Evolução tectônica e geologia estrutural.....	7
2.1.3. Metamorfismo .....	9
2.2. FORMAÇÃO FERRÍFERA BANDADA (FFB) CAUÊ E SEUS CORPOS DE MINÉRIO DE FERRO.....	10
2.2.1. Itabiritos .....	10
2.2.2. Minério de ferro de alto teor .....	11
2.2.3. Gênese do minério de ferro de alto teor .....	12
2.2.4. Geoquímica da magnetita e hematita .....	13
2.3. GEOLOGIA DA JAZIDA MINERITA.....	14
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
3.2. ETAPA DE CAMPO .....	19
3.3. AMOSTRAGEM .....	19
3.4. ESTUDOS PETROGRÁFICOS .....	20
3.5. MICROTERMOMETRIA DE INCLUSÕES FLUIDAS .....	20
3.5.1. Generalidades .....	20
3.5.2. Procedimento analítico.....	21
3.6. MICROSSONDA ELETRÔNICA - EPMA.....	21
3.7. LA-ICP-MS EM ÓXIDOS DE FERRO .....	22

3.8. ANÁLISES DE ISÓTOPOS DE ENXOFRE EM PIRITA .....	23
3.8.1. Generalidades .....	23
3.8.2. Procedimento analítico .....	25
<b>CAPÍTULO 4 – AMOSTRAGEM E ESTUDOS PETROGRÁFICOS .....</b>	<b>26</b>
4.1. AMOSTRAGEM .....	26
4.1.1. Itabiritos silicosos e minério de ferro .....	29
4.1.2. Brecha com sulfetos .....	34
4.2. ESTUDOS PETROGRÁFICOS DOS LITOTIPOS AMOSTRADOS .....	36
4.2.1. Itabirito silicoso (IS).....	38
4.2.2. Itabirito silicoso quartzo venulado (ISQV) .....	41
4.2.3. Brecha itabirítica (BI).....	45
4.2.4. Minério de ferro de alto teor quartzo venulado (MQV).....	48
4.2.5. Minério de ferro de alto teor maciço (MM) .....	51
4.2.6. Brecha com sulfetos (BS).....	53
<b>CAPÍTULO 5 - ARTIGO .....</b>	<b>57</b>
5.1. INTRODUCTION .....	58
5.2. GEOLOGICAL BACKGROUNG.....	60
5.2.1. Regional geological setting .....	60
5.2.2. Itabirites and high-grade iron ores in Quadrilátero Ferrífero .....	61
5.2.3. Local geological setting .....	63
5.3. MATERIAL AND METHODS .....	66
5.3.1. Sampling and petrography .....	66
5.3.2. Fluid inclusion microthermometry .....	67
5.3.3. LA-ICP-MS of iron oxides.....	67
5.3.4. Secondary Ion Mass Spectroscopy - SIMS in pyrite.....	69
5.4. RESULTS.....	70
5.4.1. Petrographic analyses .....	70
5.4.2. Fluid inclusion analysis .....	76

5.4.3. LA-ICP-MS in iron oxides .....	82
5.4.4. Kenomagnetite as an initial iron oxide .....	91
5.4.5. Sulfur isotopes in pyrite .....	92
5.5. DISCUSSION .....	93
5.5.1. Zones of hydrothermal alteration/mineralization stages and sulfide breccia .....	94
5.5.2. Chemical alterations during mineralization .....	95
5.5.3. Source of sulfur in sulfide breccia.....	100
5.5.4. Hydrothermal fluid associated with iron mineralization.....	101
5.5.5. Hypogene model for the Minerita deposit.....	101
5.6. CONCLUSIONS.....	104
5.7. ACKNOWLEDGEMENTS .....	106
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>107</b>
<b>CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>122</b>
Perfis geológicos .....	123
Descrição pontos visitados em mapeamento geológico.....	128
<b>ANEXO C .....</b>	<b>130</b>
Dados de microsonda eletrônica.....	131
<b>ANEXO D .....</b>	<b>138</b>
Descrição furos de sondagem analisados .....	139
<b>ANEXO E.....</b>	<b>145</b>
Descrição detalhada de algumas lâminas analisadas .....	146
<b>ANEXO F.....</b>	<b>201</b>

“Supplementary Data” para o artigo “Hydrothermal genesis of the locally sulfidized itabirite-hosted Minerita iron mineralization, southwestern Serra do Curral Range, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais” .....	202
Appendix A .....	203
Appendix B .....	231

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 1

<b>Figura 1.1:</b> Mapa simplificado do Brasil com a localização do Quadrilátero Ferrífero no limite entre o cráton do São Francisco e o orógeno brasileiro Araçuaí (modificado de Amorim e Alkmim, 2011). .....	1
<b>Figura 1.2:</b> Mapa geológico simplificado da região do Quadrilátero Ferrífero, mostrando a Serra do Curral e a área da jazida Minerita (modificado de CODEMIG, 2004).....	2
<b>Figura 1.3:</b> Localização da jazida Minerita (fonte: Google Earth).....	3

### CAPÍTULO 2

<b>Figura 2.1:</b> Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Alkmim e Marshak, 1998).....	6
<b>Figura 2.2:</b> Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero mostrando arranjo domo-e-quilha e a localização aproximada da área de estudo (modificado de Lagoeiro, 1998).....	8
<b>Figura 2.3:</b> Esquema evolutivo para o desenvolvimento da geometria da Serra do Curral em junção com o sinclinal Moeda (modificado de Alkmim e Marshak, 1998; Sanglard et al., 2014).....	9
<b>Figura 2.4:</b> Mapa geológico da Serra Azul com a localização da jazida Minerita (reproduzido de Minerita, relatório interno inédito, 2007).....	15
<b>Figura 2.5:</b> Litotipos encontrados em mapeamento geológico de 2007 (modificado de Minerita, relatório interno inédito, 2007). <b>a)</b> Itabirito silicoso friável. <b>b)</b> Itabirito dolomítico friável. <b>c)</b> Lente de hematita envolta por brecha. Itabirito dolomítico friável. <b>d)</b> Quartzito ferruginoso friável. <b>e)</b> Itabirito anfíbolítico.....	17
<b>Figura 2.6:</b> Minério de ferro de alto teor da jazida Minerita.....	18

### CAPÍTULO 3

<b>Figura 3.1:</b> Localização espacial dos furos de sondagem amostrados na jazida Minerita (fonte: Google Earth).....	19
--	----

## CAPÍTULO 4

<b>Figura 4.1:</b> Principais feições geológicas encontradas nos itabiritos silicosos e minério de ferro da jazida Minerita.....	27
<b>Figura 4.2:</b> Amostras de itabirito e brecha itabirítica da mina Minerita. <b>a)</b> Itabirito. <b>b)</b> Brecha itabirítica.....	28
<b>Figura 4.3:</b> Exemplos de minério de ferro de alto teor e brecha com sulfetos. <b>a)</b> Minério maciço. <b>b)</b> Minério quartzo venulado com muitos aglomerados de quartzo. <b>c)</b> Brecha com sulfetos.....	28
<b>Figura 4.4:</b> Exemplos de itabirito, itabirito quartzo venulado, brecha itabirítica, e minério de ferro quartzo venulado e maciço no esquema do furo de sondagem FD021. Itab. = itabirito.....	30
<b>Figura 4.5:</b> Exemplos de itabirito, itabirito quartzo venulado e brecha itabirítica no esquema do furo de sondagem FD028. Itab. = itabirito.....	31
<b>Figura 4.6:</b> Exemplos de itabirito, itabirito quartzo venulado, brecha itabirítica e minério de ferro quartzo venulado no esquema do furo de sondagem FD029. Itab. = itabirito.....	32
<b>Figura 4.7:</b> Exemplos de itabirito, itabirito quartzo venulado e brecha itabirítica no esquema do furo de sondagem FD055. Itab. = itabirito.....	33
<b>Figura 4.8:</b> Cavidades com preenchimento na amostra 003 do furo de sondagem FD021. <b>a)</b> Cavidade com preenchimento de quartzo. <b>b)</b> Quartzo em pente.....	34
<b>Figura 4.9:</b> Exemplo da brecha com sulfetos no esquema do furo de sondagem FD048. Itab. = itabirito.....	35
<b>Figura 4.10:</b> Exemplos da brecha com sulfetos no esquema do furo de sondagem FD052. Itab. = itabirito.....	36
<b>Figura 4.11:</b> Amostras e lâminas de itabirito silicoso (IS) com microdobras; veio e vênulas de quartzo; e vênula de óxidos de ferro.....	39
<b>Figura 4.12:</b> Minerais do itabirito silicoso. <b>a)</b> Magnetita do itabirito (MagI). <b>b)</b> Kenomagnetita (Keno) com relicto no interior de martita. <b>c)</b> Martita (Mar). <b>d)</b> Hematita anédrica (HemA). <b>e)</b> Hematita lamelar (HemL). <b>f)</b> Hematita microlamelar (HemMI). <b>g)</b> Goethita (Gt). <b>h)</b> Muscovita (Ms). <b>i)</b> Quartzo recristalizado (Qtz) e venular (QtzV). Luz refletida, nicóis descruzados: <b>b</b> , <b>e</b> e <b>f</b> ; luz refletida, nicóis cruzados: <b>a</b> , <b>c</b> , <b>d</b> e <b>g</b> ; luz transmitida, nicóis cruzados: <b>h</b> e <b>i</b> .....	41
<b>Figura 4.13:</b> Amostras e lâminas de itabirito silicoso quartzo venulado (ISQV) com microdobras; microfalha; vênula, veio e aglomerado de quartzo; e áreas sem bandamento.....	43
<b>Figura 4.14:</b> Minerais no itabirito silicoso quartzo venulado. <b>a)</b> Kenomagnetita (Keno) como relicto no interior de martita. <b>b)</b> Martita (Mar). <b>c)</b> Hematita anédrica (HemA). <b>d)</b> Hematita lamelar (HemL). <b>e)</b> Hematita microlamelar (HemMI). <b>f)</b> Muscovita (Ms). <b>g)</b> Clorita (Chl). <b>h)</b> Quartzo recristalizado (Qtz) e venular (QtzV). Luz refletida, nicóis descruzados: <b>a</b> , <b>d</b> e <b>e</b> ; luz refletida, nicóis cruzados: <b>b</b> e <b>c</b> ; luz transmitida, nicóis cruzados: <b>f</b> , <b>g</b> e <b>h</b> .....	45

<b>Figura 4.15:</b> Amostras e lâminas de brecha itabirítica (BI) com microdobradas; microfalha; veio e vênulas de quartzo; vênulas de óxidos de ferro; e áreas sem bandamento.....	46
<b>Figura 4.16:</b> Minerais na brecha itabirítica. <b>a)</b> Kenomagnetita (Keno) com relicto no interior de martita. <b>b)</b> Martita (Mar). <b>c)</b> Hematita anédrica (HemA). <b>d)</b> Hematita lamelar (HemL). <b>e)</b> Hematita microlamelar (HemMI). <b>f)</b> Muscovita (Ms). <b>g)</b> Quartzo recristalizado (Qtz) e venular (QtzV). Luz refletida, nicóis descruzados: <b>a, d e e</b> ; luz refletida, nicóis cruzados: <b>b e c</b> ; luz transmitida, nicóis cruzados: <b>f e g</b> .....	48
<b>Figura 4.17:</b> Amostras e lâminas de minério de ferro quartzo venulado (MQV) com textura brechada; microfalha; veio, vênula e aglomerado de quartzo; e vênula de óxidos de ferro.....	49
<b>Figura 4.18:</b> Minerais no minério de ferro de alto teor quartzo venulado. <b>a)</b> Kenomagnetita (Keno) como relicto no interior de martita, e hematita microlamelar (HemMI). <b>b)</b> Martita (Mar). <b>c)</b> Hematita anédrica (HemA). <b>d)</b> Grunerita (Gru). <b>e)</b> Quartzo recristalizado (Qtz) e venular (QtzV). Luz refletida, nicóis descruzados: <b>a</b> ; luz refletida, nicóis cruzados: <b>b e c</b> ; luz transmitida, nicóis cruzados: <b>d e e</b> .....	51
<b>Figura 4.19:</b> Amostra e lâmina de minério de ferro maciço (MM) com textura homogênea; vênula e aglomerados de quartzo.....	52
<b>Figura 4.20:</b> Minerais no minério de ferro de alto teor maciço. <b>a)</b> Kenomagnetita (Keno) como relicto no interior de martita. <b>b)</b> Martita (Mar). <b>c)</b> Hematita anédrica (HemA). <b>d)</b> Hematita lamelar (HemL) e hematita microlamelar (HemMI). <b>e)</b> Quartzo venular (QtzV). Luz refletida, nicóis descruzados: <b>a e d</b> ; luz refletida, nicóis cruzados: <b>b e c</b> ; luz transmitida, nicóis cruzados: <b>e</b> .....	53
<b>Figura 4.21:</b> Amostras e lâminas de brecha com sulfetos (BS) com textura brechada e bandamento, aglomerados euédricos de óxidos de ferro, veio com sulfetos, e áreas desprovidas de bandamento.....	54
<b>Figura 4.22:</b> Minerais na brecha com sulfetos. <b>a)</b> Kenomagnetita (Keno) como relicto no interior de martita e hematita microlamelar (HemMI). <b>b)</b> Magnetita hidrotermal (MagII) e martita (Mar). <b>c)</b> Hematita anédrica (HemA) e hematita lamelar (HemL). <b>d)</b> Muscovita (Ms). <b>e)</b> Turmalina (Tur). <b>f)</b> Carbonato de granulação fina (Cb) e quartzo venular (QtzV). <b>g)</b> Carbonato de granulação média (CbM). Luz refletida, nicóis descruzados: <b>a</b> ; luz refletida, nicóis cruzados: <b>b e c</b> ; luz transmitida, nicóis descruzados: <b>g</b> ; luz transmitida, nicóis cruzados: <b>d, e e f</b> .....	56

## CAPÍTULO 5

<b>Figure 5.1:</b> Simplified geological map of the Quadrilátero Ferrífero region, emphasizing the main lithotypes and structures (modified from Alkmim and Teixeira, 2017). The approximate area of the Serra Azul is delimited by the orange rectangle, and the area of the Minerita deposit by the blue square. The area of the deposit is detailed in <b>Fig. 5.3</b> . SFC = São Francisco Craton; QF = Quadrilátero Ferrífero. ....	60
---	----



<b>Figure 5.2:</b> Schematic structural section of the Serra Azul, Quadrilátero Ferrífero (modified from Romano et al., 1991).	64
<b>Figure 5.3:</b> Lithological map of the Minerita deposit showing the location of drill holes sampled in the present study, in the fragmented quartz itabirite domain. The legend shows the nomenclature used at the Minerita mine (modified from Minerita, unpublished internal report, 2007).	66
<b>Figure 5.4:</b> Spectras showing the background and de composition obtained during the amplification of <sup>57</sup> Fe signal for <b>a)</b> Kenomagnetite, <b>b)</b> Martite, <b>c)</b> Anhedral hematite, and <b>d)</b> Hydrothermal magnetite.	69
<b>Figure 5.5:</b> Lithotypes in which quartz itabirites is found to be: <b>a)</b> Quartz itabirite (QI). <b>b)</b> Quartz-veined quartz itabirite (QVQI). <b>c)</b> Itabirite breccia (IB). High-grade iron ore: <b>d)</b> Quartz-veined iron ore (QVIO). <b>e)</b> Massive iron ore (MIO) (locally veined). <b>f)</b> Sulfide breccia (SB).	71
<b>Figure 5.6:</b> Photomicrographs of iron oxides and sulfides, and their substitution textures in itabirites, high-grade iron ores and sulfide breccia (Table 5.3). <b>a)</b> Quartz itabirite showing the initial formation of martite (Mar) from itabirite magnetite (MagI), surrounded by recrystallized quartz matrix (Qtz). <b>b)</b> Sulfide breccia where subhedral hematite (SHem) is formed from hydrothermal magnetite (MagII), in a quartz-carbonate matrix (Qtz-Cb). <b>c)</b> Chalcopyrite (Cpy) within pyrite and hydrothermal magnetite (MagII) in sulfide breccia. <b>d)</b> Pyrite (Py) and anhedral hematite (AHem) formed after hydrothermal magnetite (MagII) in sulfide breccia. <b>e)</b> Kenomagnetite (Keno) in martite (quartz-veined high-grade iron ore). <b>f)</b> Anhedral hematite (AHem) formed from martite (itabirite breccia). <b>g)</b> Microplaty hematite (MpHem) from martite (quartz itabirite). <b>h)</b> Kenomagnetite (Keno), platy hematite (PHem) from anhedral hematite (AHem1) in sulfide breccia. Reflected light, uncrossed nicols: <b>c, d, e, g</b> and <b>h</b> ; reflected light, crossed nicols: <b>a, b,</b> and <b>f</b> .	75
<b>Figure 5.7:</b> Photomicrographs of silicates, and their textures, in itabirites and sulfide breccia (Table 5.3). <b>a)</b> Grunerite (Gru) with radial texture in band of quartz and in vein of iron oxide in sulfide breccia. <b>b)</b> Recrystallized quartz (Qtz), and vein quartz (VQtz) with radial texture (quartz-veined quartz itabirite). <b>c)</b> Comb-textured vein quartz (VQtz) (quartz-veined quartz itabirite). <b>d)</b> Pyrite (Py) developed after medium carbonate (MCb) in a vein with quartz, carbonate, hydrothermal magnetite, anhedral hemati, pyrite and chalcopyrite (sulfide breccia). Reflected light, crossed nicols: <b>a, b, c</b> and <b>d</b> .	75
<b>Figure 5.8:</b> Schematic drill hole illustration showing intersection relationships of the various types of veins in itabirites, iron ore and sulfide breccia. Detail for quartz-veined iron ore and the quartz crystals analyzed in the study. Vi1 = extensional veins; Vi2 = oblique-extensional veins; Vbm = breccia-style veins in QVIO; Vbma = breccia-style veins in SB; Py = pyrite; Cpy = chalcopyrite; VQtz = vein quartz; Cb = fine carbonate; MCb = medium carbonate.	77

**Figure 5.9:** Examples of types 1 and 2 fluid inclusions in vein quartz (VQtz) analyzed using transmitted light photomicrographs (**b**, **d** and **f**; uncrossed nicols), and drafts/maps. **a**) Map of secondary FIA 3SA4 with type 1 inclusion (non-saline, aqueous, biphasic (L+V), elongated-rounded); and type 2 inclusion (aqueous-saline, biphasic (L+V), elongated-rounded, salinity of 1.82 % in weight of NaCl eq.). **b**) Photomicrograph of types 1 and 2 inclusions FIA 3SA4. **c**) Map of secondary FIA 5SA4 with type 2 inclusion (aqueous-saline, biphasic (L+V), elongated to irregular, salinity of 5.62 and 9.71 % in weight of NaCl eq.). **d**) Photomicrograph of type 2 inclusions in FIA 5SA4. **e**) Map of group FIA 6GA1 with type 2 inclusions (aqueous-saline, biphasic (L+V), elongated-rounded and rounded, salinity of 3.28 and 8.51 % in weight of NaCl eq.). **f**) Photomicrograph of type 2 inclusions in 6GA1. Sal = salinity in % in weight of NaCl eq. .... 79

**Figure 5.10:** Microthermometry results of fluid inclusions in vein quartz in quartz-veined high-grade iron ore from the Minerita deposit. **a**) Histogram showing the frequency of eutectic temperature ( $T_e$ ) and saline systems  $H_2O-NaCl-MgCl_2$  ( $T_e = -35\text{ }^\circ C$ ) and  $H_2O-NaCl-FeCl_2$  ( $T_e = -37\text{ }^\circ C$ ). **b**) Graph of salinity versus total homogenization temperature ( $Th_t$ ) with discrimination of types of FIs. .... 80

**Figure 5.11:** Box-and-whisker diagrams, in logarithmic scale, of discriminating elements, and Pb, for different types of iron oxides (1-12) from the various lithotypes analyzed at the Minerita deposit, obtained in ppm using the LA-ICP-MS technique (Table 5.6). Note that results for the sulfide breccia are indicated to the right of the stippled vertical line. Upper and lower limits of the box represent the upper and lower 50<sup>th</sup> percentile of the data. The whisker represents the 95<sup>th</sup> percentile of the upper and lower limits of values. The mean value is represented by solid black circles; the median, by solid black lines. QI = quartz itabirite; QVQI = quartz-veined quartz itabirite; IB = itabirite breccia; MIO = massive high-grade iron ore; SB = sulfide breccia. .... 85

**Figure 5.12:** Spider diagrams of REEs, shown ppm values, with data (values in Table 5.7) normalized to the PAAS (McLennan, 1986) for **a**) Kenomagnetite, **b**) Martite, **c**) Anhedral hematite in itabirites and iron ore, and to CN (Nakamura, 1974) for **d**) Hydrothermal magnetite and anhedral hematite in SB. QI = quartz itabirite; QVQI = quartz-veined quartz itabirite; IB = itabirite breccia; MIO = massive high-grade iron ore; SB = sulfide breccia. .... 85

**Figure 5.13:** Spider diagrams of discriminating elements, and Pb, for comparison between kenomagnetite in QVQI and MIO, from the Minerita deposit, and early-stage magnetite of slightly altered BIFs from the **a**) Yilgarn Craton (Algoma-type; Koolyanobbing, Windarling, Beebyn and Madoonga deposits) (Angerer et al., 2012, 2013; Duuring and Hagemann, 2012, 2018), **b**) Jharkhand-Orissa region (Algoma-type; Gandhamardan area) (Bhattacharya et al., 2007), and **c**) Minas Supergroup (Lake Superior-type; Esperança deposit) (Hensler et al., 2015). Data for Esperança deposit shown in mean ppm values. QVQI = quartz-veined quartz itabirite; MIO = massive high-grade iron ore. .... 91

- Figure 5.14:** Spider diagrams of discriminating elements, and Pb, for **a)** Martite, **b)** Anhedral hematite in itabirites and iron ore, and **c)** Hydrothermal magnetite and anhedral hematite in sulfide breccia, normalized for kenomagnetite in QVQI. QI = quartz itabirite; QVQI = quartz-veined quartz itabirite; IB = itabirite breccia; MIO = massive high-grade iron ore; SB = sulfide breccia. .... 92
- Figure 5.15:** Graph of  $\delta^{34}\text{S}$  versus  $\Delta^{33}\text{S}$  for all 66 grains of pyrite (Figs. 5.6c, d) from the five fragments in SB of the Minerita deposit. All values are within the MDF interval (-0.2 and 0.2 ‰) (Farquhar and Wing, 2003). Error bars are presented in both directions. MDF = mass-dependent fractionation. .... 93
- Figure 5.16:** Mineralogical parageneses of the Minerita deposit showing the **a)** Number of minerals in itabirites, iron ores and sulfide breccia. **b)** Hydrothermal alteration zones with various mineralization stages for the formation of high-grade iron ores, and sulfide breccia. .... 95
- Figure 5.17:** Schematic diagrams from Nadoll et al. (2014). **a)** Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) versus  $\log f\text{O}_2$  showing buffer condition in the Fe-Si-O system. Buffering for the quartz-iron-fayalite (QIF); iron-magnetite (IM); iron-wüstite (IW); magnetite-wüstite (MW); fayalite-magnetite-quartz (FMQ); and hematite-magnetite (HM) systems. **b)**  $f\text{O}_2$  versus  $f\text{S}_2$  for the Fe-O-S system. The geometry of the diagram is maintained even with significant changes of temperature. The solid red circle represents the balance point in which conditions of  $f\text{O}_2$  and  $f\text{S}_2$  allow the concomitant formation of magnetite, hematite and pyrite. .... 97
- Figure 5.18:** Diagrams showing anomalies and Y/Ho ratio for kenomagnetite, martite and anhedral hematite in itabirites and iron ore. **a)**  $\text{Pr}/\text{Pr}^*_{\text{PAAS}}$  versus  $\text{Ce}/\text{Ce}^*_{\text{PAAS}}$  results (Bau and Dulski, 1996), where most oxides show true positive La and Pr anomalies, and a negative Ce anomaly. Anomalies calculated using the formulas  $\text{Pr}/\text{Pr}^*_{\text{PAAS (mean)}} = \text{Pr}_{\text{PAAS}} / (0.5 * \text{Ce}_{\text{PAAS}} + 0.5 * \text{Nd}_{\text{PAAS}})$  and  $\text{Ce}/\text{Ce}^*_{\text{PAAS (mean)}} = \text{Ce}_{\text{PAAS}} / (0.5 * \text{La}_{\text{PAAS}} + 0.5 * \text{Pr}_{\text{PAAS}})$ . **b)**  $\text{Eu}/\text{Eu}^*_{\text{PAAS}}$  versus Y/Ho results with only a few grains of martite in QI, and anhedral hematite in IB, with positive Eu anomalies ( $\text{Eu}/\text{Eu}^*_{\text{PAAS}} > 1$ ). According to the Y/Ho ratio, most iron oxides are within the “CHARAC” interval. Eu anomalies were calculated using the formula  $\text{Eu}/\text{Eu}^*_{\text{PAAS}} = \text{Eu}_{\text{PAAS}} / (0.5 * \text{Sm}_{\text{PAAS}} + 0.5 * \text{Gd}_{\text{PAAS}})$ . Shaded areas define the seawater and “CHARAC” for the Y/Ho ratio (Bau and Dulski, 1996). QI = quartz itabirite; QVQI = quartz-veined quartz itabirite; IB = itabirite breccia; MIO = massive high-grade iron ore; SB = sulfide breccia. .... 100
- Figure 5.19:** Mineralization stages of iron oxides in the Minerita deposit with trends of gains and losses of discriminating elements, Pb and REEs + Y. MagII = hydrothermal magnetite; Keno = kenomagnetite; Mar = martite; AHem = anhedral hematite; Py = pyrite; SB = sulfide breccia. .... 103
- Figure 5.20:** Schematic hypogene model of the Minerita deposit. **a)** N-S profile, with squares **b, c, d** and **e** that present enrichment of itabirites, formation of sulfide breccia and physicochemical conditions of the fluids involved in mineralization stages. **b)** Distal hydrothermal zone showing the

transition from quartz itabirite into quartz-veined quartz itabirite. Basinal fluid (interaction with Batatal phyllite) and meteoric water. Intense martitization, moderate formation of anhedral hematite and high leaching of silica. **c)** Intermediate zone reflecting the transition from quartz-veined quartz itabirite into itabirite breccia. Basinal fluid (interaction with Mn-rich band and intrusive igneous rocks?) and meteoric water. Low martitization, moderate formation of anhedral hematite and high silicification. **d)** Proximal zone with transition from itabirite breccia into massive high-grade iron ore. Basinal fluid (interaction with intrusive igneous rocks?), meteoric water and metamorphic fluid. Low martitization, intense formation of anhedral hematite and leaching of silica. **e)** Sulfide breccia and formation of magnetite, anhedral hematite, pyrite, chalcopyrite and iron-dolomite in veins. Basinal fluid (interaction with intrusive igneous rocks?), meteoric water and metamorphic fluid. Intense silicification. Dolomite itabirite(?) at deeper levels originating the sulfide breccia. .... 104

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 3

**Tabela 3.1:** Lâminas escolhidas para análise e respectivos litotipos. ....20

**Tabela 3.2:** Lâminas escolhidas para análise em microsonda eletrônica. ....22

### CAPÍTULO 4

**Tabela 4.1:** Principais siglas utilizadas para litotipos e minerais.....37

**Tabela 4.2:** Principais características microestruturais das lâminas analisadas.....37

**Tabela 4.3:** Principais texturas observadas em cada litotipo estudado.....38

**Tabela 4.4:** Principais características dos minerais no itabirito silicoso.....39

**Tabela 4.5:** Principais características no itabirito silicoso quartzo venulado.....43

**Tabela 4.6:** Principais características dos minerais na brecha itabirítica.....47

**Tabela 4.7:** Principais características no minério de ferro de alto teor quartzo venulado.....50

**Tabela 4.8:** Principais características dos minerais no minério de ferro de alto teor maciço.....52

**Tabela 4.9:** Principais características dos minerais na brecha com sulfetos.....55

### CAPÍTULO 5

**Table 5.1:** Detail of sampling in drill holes and their lithotypes, including different types of itabirite and iron ore. .... 66

**Table 5.2:** Acronyms and their meaning used for lithotypes at the Minerita deposit (this study). ... 71

**Table 5.3:** Mineralogical composition of lithotypes organized by set of thin sections..... 72

**Table 5.4:** Vein system in the Minerita deposit indicating the main control structures, minerals, geometry and attitude of layers. Classification adapted from Robert and Poulsen (2001)..... 76

<b>Table 5.5:</b> FIAs and types of FIs identified according to petrographic and salinity characteristics, and microthermometry results for vein quartz in quartz-veined high-grade iron ore from the Minerita.	81
<b>Table 5.6:</b> Summarized LA-ICP-MS results of discriminating elements and Pb (minimum, maximum, mean and standard deviation) for all iron oxides of the various lithotypes analyzed from the Minerita deposit. Data in ppm.....	86
<b>Table 5.7:</b> Summarized LA-ICP-MS results of REEs (minimum, maximum, mean and standard deviation) for all iron oxides of the various lithotypes analyzed from the Minerita deposit. Data in ppm.....	88
<b>Table 5.8:</b> Main characteristics of discriminating elements, Pb, Y and REEs, and REEs anomalies (min. = minimum, max. = maximum and mean) in the iron oxides analyzed from the Minerita deposit. ....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>Table 5.9:</b> Summarized results (minimum, maximum, mean and standard deviation) of $\delta^{33}\text{S}$ , $\delta^{34}\text{S}$ and $\Delta^{33}\text{S}$ for all 66 grains of pyrite (Figs. 5.6c, d), from five fragments in SB of the Minerita deposit, analyzed through the SIMS technique. ....	93

## RESUMO

O sudoeste da Serra do Curral está localizado no domínio de baixa deformação do Quadrilátero Ferrífero, onde minérios de ferro hipogênicos de alto teor estão associados a sulfetos e são controlados por zonas de cisalhamento e dobras. Nesta área dominam os itabiritos silicosos, dolomíticos e anfibolíficos, com o primeiro constituindo a principal rocha hospedeira para o minério. Todas estas rochas estão dobradas, redobradas, e apresentam estratigrafia invertida com as unidades do Supergrupo Minas. A jazida Minerita está inserida nesta complexidade estrutural. Os principais litotipos que ocorrem na área de abrangência desta jazida são itabiritos silicosos hidrotermalizados, que caracterizam zonas de alteração distal e intermediária, com o minério de ferro representando a zona proximal. Um terceiro litotipo classificado como brecha com sulfetos também está presente, contém pirita e calcopirita e possui textura brechada. A paragênese de minerais dos itabiritos e minério incluem principalmente kenomagnetita, martita e hematita anédrica; quartzo recristalizado e venular. A composição mineralógica da brecha é dada por magnetita, hematita anédrica, pirita e calcopirita; quartzo recristalizado e venular; e carbonato fino a médio. A alteração hidrotermal dos itabiritos é acompanhada de martitização e formação de hematita anédrica, assim como lixiviação de sílica e silicificação pontual traduzida na formação de grande quantidade de veios. Na brecha há formação de magnetita, hematita anédrica, pirita e calcopirita, e carbonato em veios de quartzo. Resultados de LA-ICP-MS em óxidos de ferro sugerem que, durante a martitização, ocorreu pequeno ganho de Al, Cr, Ga, Pb e ETRs + Y, e perda de Mg, Zn, Mn, Co e V. Durante a formação de hematita anédrica, ganho de Al, Cr, V e Zn, e perda de Mg, Ti, Mn, Co, Pb e ETRs + Y foram registrados. Para magnetita e hematita anédrica da brecha com sulfetos, enriquecimento significativo de Zn, Ga e Pb, e empobrecimento de V e ETRs + Y. Resultados de isótopos de enxofre indicam origem magmática para a pirita na brecha com sulfetos. Em contraste, microtermometria de inclusões fluidas em quartzo venular de minério de ferro refletem o envolvimento de pelo menos um fluido de temperatura baixa (entre 108 °C a 142 °C) e salinidade baixa a moderada (0 a 14,26 % em peso de NaCl eq.). A mineralização, enriquecimento dos itabiritos e formação da brecha com sulfetos podem ter sido resultado da interação de fluido basinal e água meteórica, com fluido metamórfico subordinado, como já havia sido indicado para outros depósitos de ferro da região. O envolvimento de rochas intrusivas ou encaixantes do Supergrupo Rio das Velhas pode explicar a assinatura magmática para o enxofre.

**Palavras-chave:** jazida Minerita; minérios de ferro; inclusões fluidas; LA-ICP-MS em óxidos de ferro; SIMS em pirita.

## ABSTRACT

The southwestern portion of the Serra do Curral is located in the low deformation domain of the Quadrilátero Ferrífero region, where hypogene, high-grade iron ores are associated with sulfides and controlled by shear and fold zones. Quartz, dolomite and amphibole itabirites dominate in this area, with the former constituting the main host rock to ore. Rocks are folded, refolded, and present reverse stratigraphy of the Minas Supergroup units. The Minerita deposit is located within this structural complexity. The main lithotypes described in Minerita are hydrothermally altered quartz itabirites, characterizing distal and intermediate alteration zones, with iron ore representing the proximal zone. Mineral parageneses of itabirites and iron ore mainly include kenomagnetite, martite and anhedral hematite, recrystallized and vein quartz. A sulfide breccia is also present; it contains magnetite, anhedral hematite, pyrite, chalcopyrite, recrystallized and vein quartz, as well as fine- to medium-grained carbonate. Hydrothermal alteration of itabirites results in martitization with formation of anhedral hematite, leaching of silica and localized silicification with abundant veining. LA-ICP-MS results in iron oxides suggest that, during martitization, a small gain in Al, Cr, Ga, Pb and REE + Y occurred, with losses in Mg, Zn, Mn, Co and V. During the formation of anhedral hematite, gains of Al, Cr, V and Zn, and losses in Mg, Ti, Mn, Co, Pb and REEs + Y are recorded. For magnetite and anhedral hematite in sulfide breccia, there was significant enrichment of Zn, Ga and Pb, and impoverishment of V and REEs + Y. Sulfur isotope results indicate a magmatic origin for pyrite in the sulfide breccia. In contrast, fluid inclusion microthermometry in vein quartz of iron ore reflects the involvement of at least one low-temperature (between 108 °C and 142 °C) fluid with low to moderate-salinity (0 to 14.26 % in weight of NaCl eq.). Mineralization, itabirite enrichment and formation of sulfide breccia may have resulted from the interaction between basinal fluid and meteoric water, in addition to subordinate metamorphic fluid as previously indicated for other iron deposits in the region. The involvement of either intrusive country rocks or rocks from the Rio das Velhas Supergroup may explain the magmatic sulfur signature.

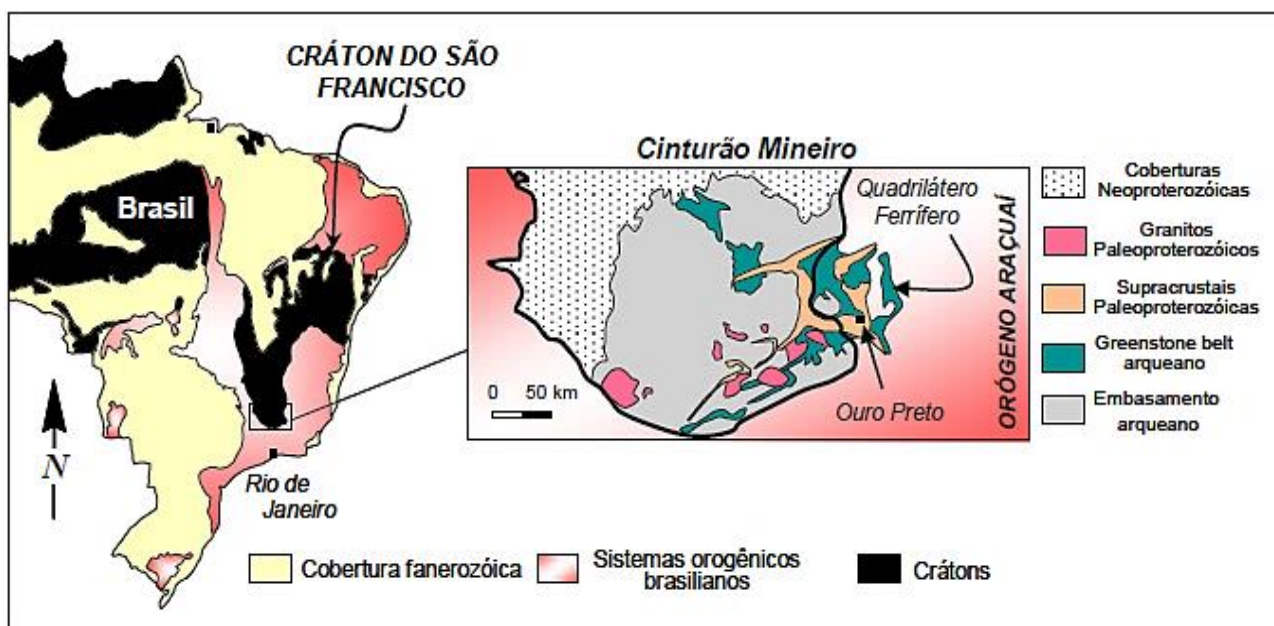
**Keywords:** Minerita deposit; iron ores; fluid inclusions; LA-ICP-MS in iron oxides; SIMS in pyrite.

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1. APRESENTAÇÃO

Formações ferríferas bandadas (FFB) proterozoicas são importantes objeto de estudo por serem as principais hospedeiras de minério de ferro de alto teor, e por possibilitarem o entendimento da evolução da atmosfera, hidrosfera, biosfera e litosfera terrestre (*e.g.* Dismukes et al., 2001; Bekker et al., 2004; Liang et al., 2006; Pufahl, 2010; Pufahl e Hiatt, 2012; Pufahl et al., 2013). Informações mineralógicas e geoquímicas das FFB de diversas partes do mundo têm contribuído para o entendimento do ciclo do ferro e sua evolução diagenética, metamórfica e hidrotermal (Harnmeijer, 2003; Klein, 2005; Rosière et al., 2008).

O distrito metalogenético do Quadrilátero Ferrífero (QF) possui importantes depósitos de minério de ferro que estão hospedados em FFB. Geologicamente se situa na borda sudeste do cráton do São Francisco e é circundado pelo orógeno Araçuai (Dorr, 1969; Almeida, 1977) (Fig. 1.1). Litoestratigraficamente pode ser dividido em quatro unidades principais (Amorim e Alkmim, 2011): embasamento cristalino, supergrupos Rio das Velhas e Minas, e Grupo Itacolomi (Fig. 2.1). É no Supergrupo Minas que se encontram as FFB paleoproterozoicas, com ampla distribuição por todo QF, e que sustentam o relevo da região (Dorr, 1969).

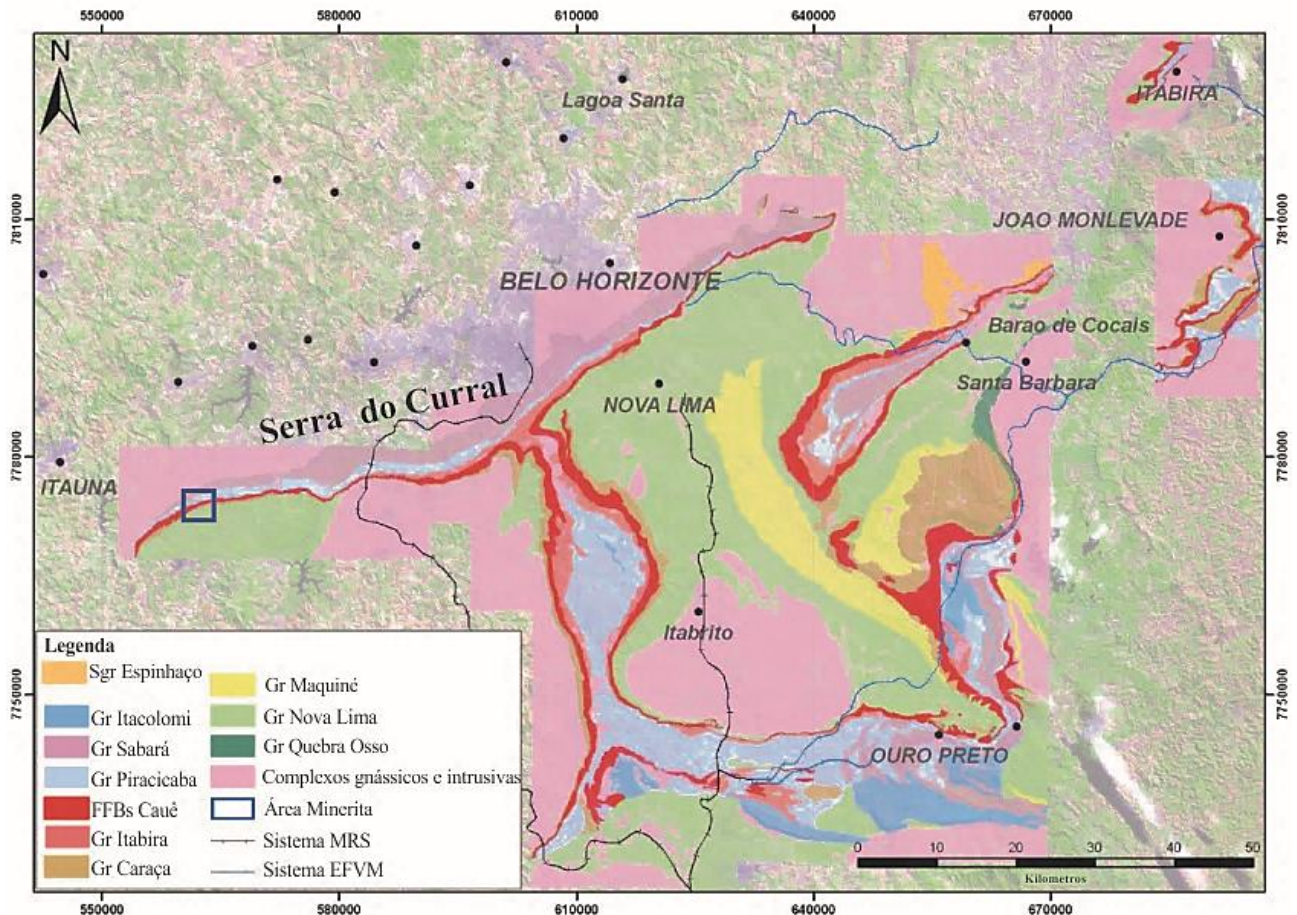


**Figura 1.1:** Mapa simplificado do Brasil com a localização do Quadrilátero Ferrífero no limite entre o cráton do São Francisco e o orógeno brasileiro Araçuai (modificado de Amorim e Alkmim, 2011).

O estudo das FFB do QF representa papel fundamental para a indústria mineral brasileira por facilitar a extração de minério de ferro através do entendimento dos processos formadores dos corpos, e o controle geológico das mineralizações. Ainda são muitas as questões a serem estudadas nas FFB do QF, principalmente no que diz respeito aos processos de formação do minério de ferro de alto teor,



entre eles a alteração hidrotermal do protominério da região, itabirito (FFB metamorfisadas) (Eschwege, 1822). Raras são as ocorrências de FFB associadas com sulfetos (*e.g.* Sampaio et al., 2018), estudos geoquímicos de elementos traço, em especial os elementos terras raras (ETR), e de geoquímica isotópica com vistas à caracterização da alteração hipogênica (Mendes et al., 2017). Mais raros ainda são estes tipos de ocorrência e estudos na porção sudoeste da Serra do Curral (Mendes, 2015; Mendes et al., 2017), onde se encontra a jazida Minerita (Fig. 1.2).



**Figura 1.2:** Mapa geológico simplificado da região do Quadrilátero Ferrífero, mostrando a Serra do Curral e a área da jazida Minerita (modificado de CODEMIG, 2004).

É neste cenário que se insere o presente estudo. A jazida Minerita possui exemplares de itabiritos silicosos, dolomíticos e anfibolíticos, e corpos de minério de ferro friável e compacto. Amostras de testemunho de sondagem, doadas pela Minerita, foram coletadas de diferentes pontos, incluindo itabiritos silicosos, minério de ferro de alto teor e brecha com sulfetos.

O financiamento para as análises petrográficas, geoquímicas e isotópicas foi adquirido pelo projeto FAPEMIG intitulado “Fluidos hidrotermais de jazidas de ouro e ferro no distrito mineral do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil”.

## 1.2. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A jazida Minerita – Minérios de Itaúna Ltda. está inserida no município de Itatiaiuçu, região central do Estado de Minas Gerais. Compreende parte da Serra Azul, extensão oeste da Serra do Curral (Fig. 1.3).



**Figura 1.3:** Localização da jazida Minerita (fonte: Google Earth).

O acesso pode ser feito a partir de Belo Horizonte, pela BR 381 – Fernão Dias, percorrendo-se cerca de 60 km. Após passar pela ponte sobre o Rio Veloso, deve-se percorrer cerca de 3 km e entrar em estrada secundária, à direita, que é utilizada pela Minerita e pela Mineração Serra Azul, da Arcelor Mittal. Depois, segue-se placas indicativas até a portaria das instalações de Minerita em um percurso total de, aproximadamente, 4 km. Informações adicionais acerca da mina Minerita encontram-se no Anexo A.

## 1.3. OBJETIVO

O presente trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de um modelo hipogênico para a jazida, incluindo a caracterização dos fluidos hidrotermais responsáveis pela mineralização e enriquecimento dos itabiritos silicosos. Isso é alcançado a partir da realização dos seguintes estudos:

- Caracterização dos principais litotipos;
- Definição da paragênese dos minerais, suas características e interações;



- Determinação das zonas de alteração hidrotermal;
- Elucidação das mudanças químicas durante os estágios de mineralização a partir de estudos de LA-ICP-MS em diferentes gerações de óxidos de ferro;
- Caracterização da brecha com sulfetos com base em análises de isótopos de enxofre.

#### **1.4. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação de mestrado está estruturada na forma de capítulos e anexos. Nos capítulos há informações adicionais à do artigo. Nos anexos, há complementos dos capítulos através de mapas, perfis, tabelas e descrições.

O Capítulo 1 (Introdução) e 2 (Revisão Bibliográfica) apresenta informações gerais do trabalho e contextualização geológica regional e local da jazida Minerita. São utilizadas revisões bibliográficas para o entendimento geral do ambiente em estudo.

O Capítulo 3 (Materiais e Métodos) discorre sobre a etapa de campo, os critérios de amostragem e os métodos analíticos aplicados para a caracterização das amostras selecionadas. Os métodos envolvem estudos petrográficos, de inclusões fluidas, de elementos traço em óxidos de ferro, e de isótopos de enxofre em pirita.

No Capítulo 4 (Amostragem e Estudos Petrográficos) são definidos características petrológicas, mineralógicas e paragênese dos litotipos estudados.

O Capítulo 5 se refere ao artigo intitulado “Hydrothermal genesis of the locally sulfidized itabirite-hosted Minerita iron mineralization, southwestern Serra do Curral Range, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais”, submetido à revista “Ore Geology Reviews”. Esse expõe informações relevantes sobre a geologia local da jazida e os principais resultados dos estudos petrográficos. Nele há todos os dados de inclusões fluidas, elementos traço em óxidos de ferro, e isótopos de enxofre.

O Capítulo 6 (Conclusões) representa o fechamento da dissertação.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

#### 2.1.1. Sequência estratigráfica

Quatro unidades litoestratigráficas são descritas sucintamente, da base para o topo (Fig. 2.1), sendo a mais importante para este estudo o Supergrupo Minas. Rochas intrusivas máficas, na forma de *sills* e diques, cortam estas unidades e possuem *trends* preferenciais de N-S e NW-SE (Amorim e Alkmim, 2011).

O embasamento cristalino, de idade arqueana, é formado predominantemente por gnaisses bandados e migmatizados, com rochas trondhjemiticas, tonalíticas e graníticas (TTGs), de três gerações diferentes que vão de 3,2 a 2,9 Ga (Machado e Carneiro, 1992; Carneiro et al., 1992; Carneiro et al., 1995; Lana et al., 2013). Há duas associações de granitóides potássicos que intrudiram os demais pacotes entre 2,75 e 2,70 Ga (Romano, 1989; Carneiro, 1992; Carneiro et al., 1994; Noce, 1995; Romano et al., 2013).

O Supergrupo Rio das Velhas, de idade arqueana, repousa sobre o embasamento cristalino em contato tectônico, e é subdividido nos grupos Nova Lima (base) e Maquiné (topo). O grupo Nova Lima tem rochas verdes, referidas como *greenstone belt*, como komatiitos, basaltos, e rochas vulcânicas ácidas a intermediárias (lavas riolíticas) (Machado et al., 1989). Evoluem para formações ferríferas (FF) tipo Algoma e rochas siliciclásticas (Ladeira, 1980; Schrank et al., 1990; Baltazar e Zuccheti, 2007). O Grupo Maquiné possui contato gradacional e discordante com Nova Lima, subdividido nas formações Palmital e Casa Forte (Dorr, 1969).

O Supergrupo Minas sobrepõe-se ao Rio das Velhas e embasamento cristalino em contato discordante (Dorr, 1969). É o maior pacote metassedimentar do Quadrilátero Ferrífero (QF) e representa um ciclo de Wilson completo, desenvolvido a partir da evolução de margem passiva e seu envolvimento em sistema colisional durante o Paleoproterozoico (Alkmim e Marshak, 1998; Alkmim e Martins-Neto, 2012). É subdividido, da base para o topo, nos grupos Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (Dorr, 1969).

O Grupo Caraça marca o início da sedimentação em ambiente plataformar de margem passiva (Alkmim e Marshak, 1998). É composto por metaconglomerados auríferos e quartzitos de ambiente aluvial a deltaico que gradam para metapelitos de ambiente marinho raso. É dividido nas formações Moeda (Wallace, 1958) e Batatal (Maxwell, 1958).

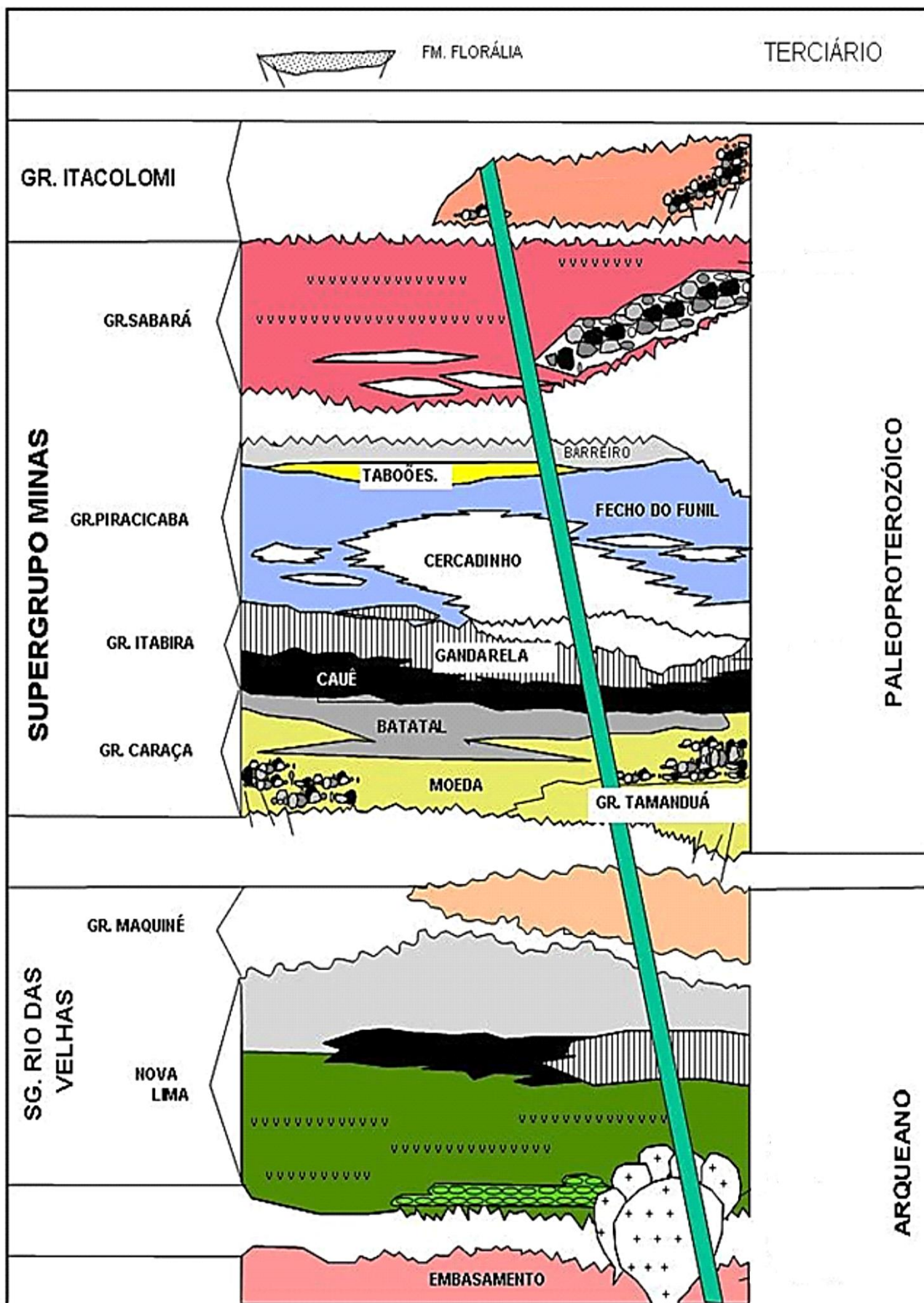


Figura 2.1: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Alkmim e Marshak, 1998).

O Grupo Itabira, sobreposto ao Caraça em contato gradacional, representa o maior período de sedimentação química do ambiente plataformal (e.g. Sanglard et al., 2014). É subdividido nas formações Cauê e Gandarela (Dorr, 1969), sendo a primeira a que hospeda a maior quantidade de formações ferríferas bandadas (FFB) e corpos de minério do QF. A Formação Gandarela possui contato gradacional com a Cauê (Dorr, 1969) e é composta por rochas calcíticas e dolomíticas, com filitos subordinados, metaconglomerados intraformacionais e finas camadas de FFB (Dorr, 1969). Foi depositada quimicamente em ambiente plataformal raso.

O Grupo Piracicaba, sobreposto ao Grupo Itabira em discordância erosiva, representa sequência predominantemente clástica (e.g. Sanglard et al., 2014). É subdividido, da base para o topo, nas formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro (Dorr, 1969). É composto por rochas sedimentares clásticas (pelíticas e psamíticas) e químicas (filitos carbonáceos e ferrugionosos, dolomitos e FFB) (e.g. Dorr, 1969; Rosière e Chemale Jr, 2000; Mendes, 2015), depositadas após a emersão e erosão de parte do Itabira (Renger et al., 1994).

O Grupo Sabará, sobreposto ao Piracicaba em discordância erosiva, é a unidade mais jovem do Supergrupo Minas. Representa o fechamento da bacia marinha no último estágio do Ciclo de Wilson, sincrônico à orogenia Riacciana. É composto por sequência *flysch* de metagrauvas, filitos carbonáceos, metadiamicritos, metaconglomerados e rochas metavulcânicas félsicas a intermediárias (Dorr, 1969).

O Grupo Itacolomi repousa sobre o Supergrupo Minas em contato discordante angular e erosivo (Dorr, 1969), e representa sequência molássica que se acumulou em bacias intermontanas lacustres (Barbosa, 1968; Dorr, 1969) após a fase de colapso da orogenia Riacciana (Alkmim e Martins-Neto, 2012). É a unidade mais jovem, composta por quartzitos, metacócio e metaconglomerados que podem conter seixos de FF (Dorr, 1969).

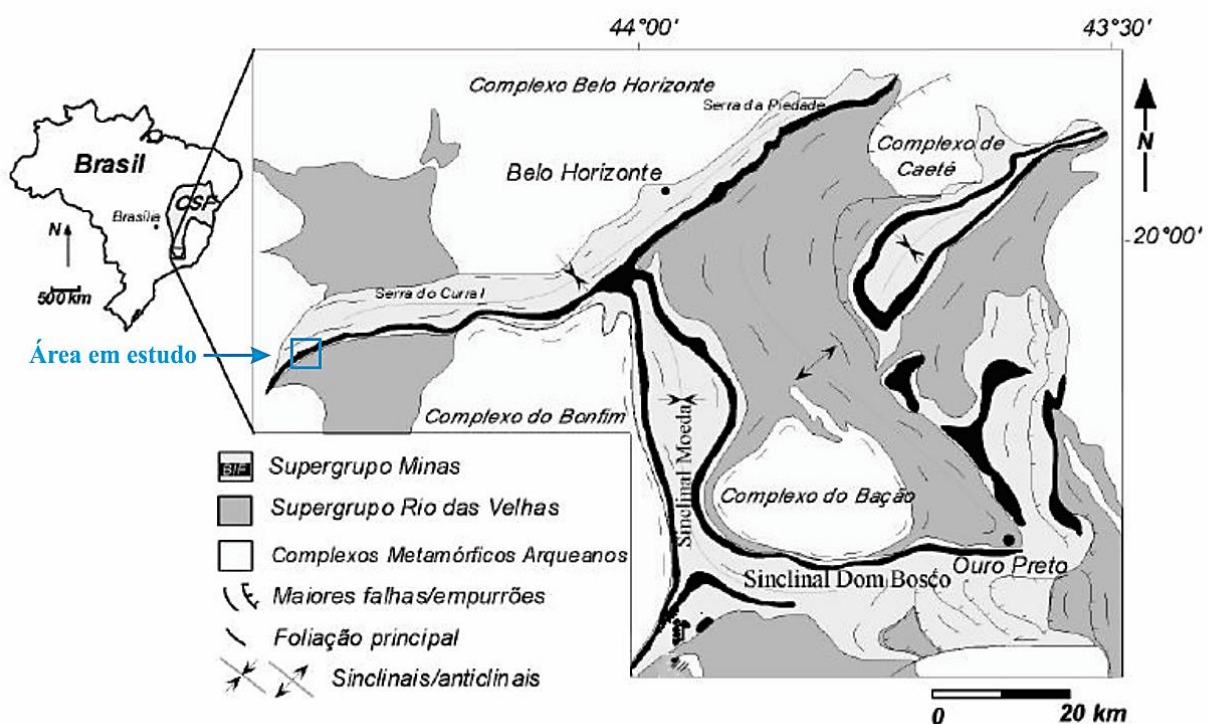
### **2.1.2. Evolução tectônica e geologia estrutural**

Chemale Jr et al. (1994) e Alkmim e Marshak (1998) propõem um modelo de evolução tectônica ligado a três fases deformacionais para o QF.

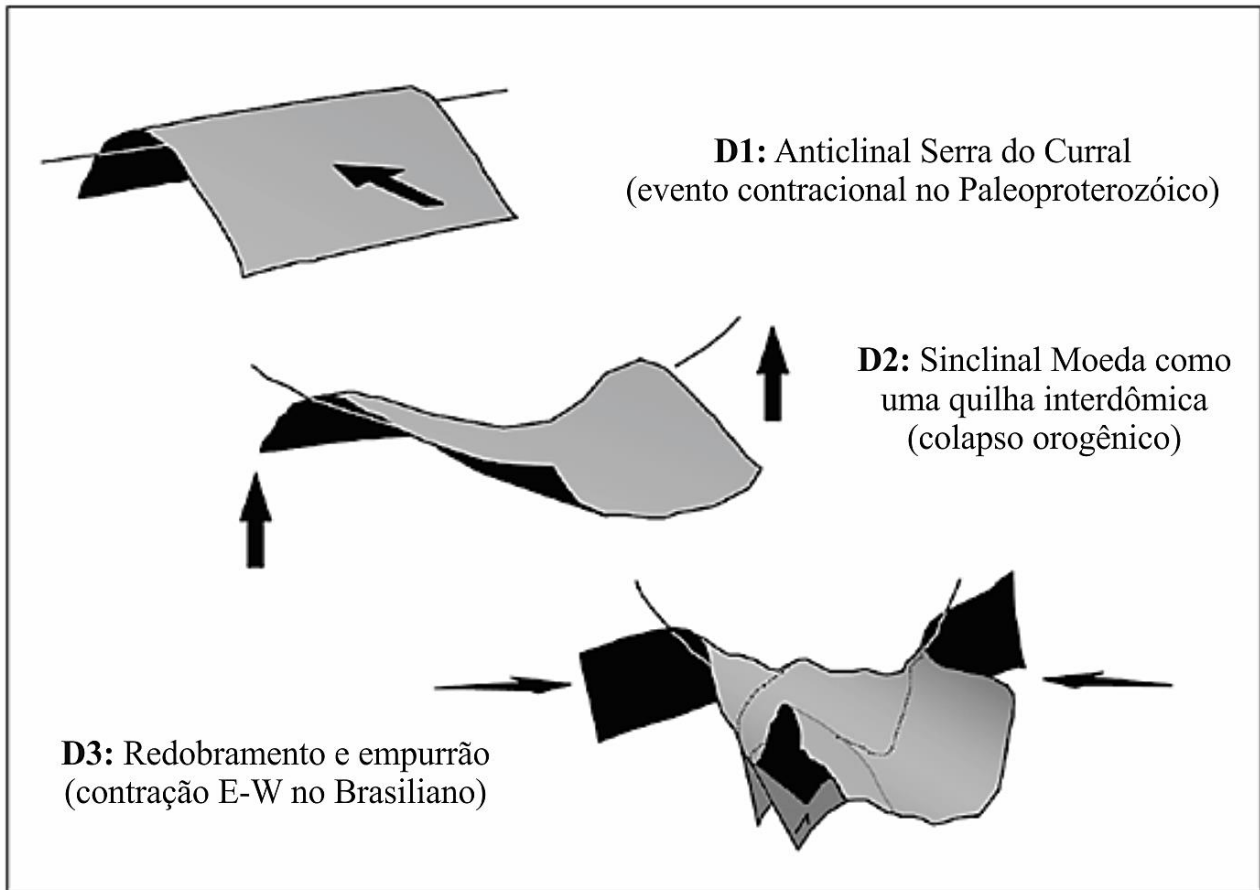
A primeira está relacionada ao evento contraccional da orogenia Riacciana (2,1 Ga). Este evento formou o cinturão de empurrões e dobras, com propagação em direção ao *foreland* da bacia formando, em escala regional, dobras parasíticas de direção NE-SW, com vergência NW (e.g. Serra do Curral) e zonas de cisalhamento. Na porção oeste do QF são descritos diversos sistemas de empurrões que possuem vergência para NW. Esta fase não provocou deformação significativa nas rochas do QF (Alkmim e Marshak, 1998).

A segunda fase com tectônica regional extensional associada ao colapso orogênico no Riáciano. Gerou a estruturação domo-e-quilha, com soerguimento dos domos arqueanos e formação dos grandes sinclinais paleoproterozoicos (Alkmim e Marshak, 1998). Os domos são compostos pelo embasamento cristalino e rochas do Supergrupo Rio das Velhas (Dorr, 1969; Chemale Jr et al., 1994; Alkmim e Marshak, 1998). Seus principais exemplares são o complexo Bonfim, Bação, Caeté e Belo Horizonte (Fig. 2.2). As quilhas, que circundam os domos, correspondem aos sinclinais formados por rochas do Supergrupo Minas. Seus principais exemplares são sinclinais Moeda, de direção NW-SE; Dom Bosco, aproximadamente E-W; Santa Rita, Gandarela, João Monlevade; sinclinório de Itabira, de direção NE-SW; e homoclinal Serra do Curral, de direção geral NE-SW (Dorr, 1969; Chemale Jr et al., 1994; Alkmim e Marshak, 1998) (Figs. 2.2, 2.3).

A terceira fase deformacional corresponde à sobreposição às estruturas anteriores, com formação de falhas de empurrão (Sistema Cambotas-Fundão), dobras e zonas de cisalhamento de transporte regional W-E (Sistema de Falhas do Engenho). Estaria ligada ao ciclo Brasileiro (0,7-0,45 Ga) (Chemale Jr et al., 1994; Alkmim e Marshak, 1998) e teria formado zonas de cisalhamento transpressivos a partir da reativação de zonas de cisalhamento preexistentes (Alkmim e Marshak, 1998).



**Figura 2.2:** Mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero mostrando arranjo domo-e-quilha e a localização aproximada da área de estudo (modificado de Lagoeiro, 2004).



**Figura 2.3:** Esquema evolutivo para o desenvolvimento da geometria da Serra do Curral em junção com o sinclinal Moeda (modificado de Alkmim e Marshak, 1998; Sanglard et al., 2014).

### 2.1.3. Metamorfismo

Herz (1978) reconheceu dois tipos de metamorfismo nas unidades do Supergrupo Minas: metamorfismo regional e termal, com o último presente nos contatos entre os domos TTGs e as rochas metassedimentares.

Segundo Pires (1995) o metamorfismo regional é de baixo grau, com temperaturas entre 300° C e 600° C, e pressões estimadas entre 3 kbar e 5 kbar. Varia de fácies xisto verde baixa (domínio de baixa deformação no oeste do QF) à fácies anfibolito baixo à intermediário (domínio de alta deformação no leste do QF, e na base das rochas) (Rosière et al., 2001).

O termal está relacionado com a fase extensional de colapso orogênico (Marshak e Alkmim, 1989), com metamorfismo de fácies anfibolito baixo à intermediário no contato entre os domos TTGs e as rochas metassedimentares (Herz, 1978).



## **2.2. FORMAÇÃO FERRÍFERA BANDADA (FFB) CAUÊ E SEUS CORPOS DE MINÉRIO DE FERRO**

As FFB da Formação Cauê são classificadas como tipo Lago Superior (Dorr, 1969), definição essa de Gross (1983), e também são referidas como FF que experimentaram baixo grau de metamorfismo ao longo do tempo (Clout e Simonson, 2005).

Na definição de Gross (1983) FFB do tipo Lago Superior possuem extensa continuidade lateral, são depositadas em plataformas continentais marinhas e bacias rifte. Associam-se à sedimentação química e deposição clástica durante o Paleoproterozoico, com desenvolvimento de boa maturidade.

No QF as FFB também são denominadas itabiritos (Eschwege, 1822), termo utilizado no Brasil para se referir a FF que já experimentaram metamorfismo e oxidação.

Itabiritos podem conter corpos com alto teor em ferro, maciços e friáveis. Estão presentes na forma de lentes e camadas, com diferentes espessuras, e baixa à média continuidade lateral.

### **2.2.1. Itabiritos**

Os itabiritos possuem estrutura bandada dada pela alternância de bandas ferríferas e não ferríferas. As primeiras normalmente contêm magnetita, martita (hematita pseudomorfa de magnetita, derivada de oxidação) e hematita, e as últimas quartzo, carbonato e anfibólio. Nelas há minerais acessórios que incluem filossilicatos (muscovita, clorita, biotita, sericita, talco, pirofilita, flogopita), além de stilpnomelano, granada, caolinita, cloritóide, cianita, estaurolita, apatita, fuchsite, crisotila e titanita (Pires, 1995; Rosière e Chemale Jr, 2000).

A magnetita está na forma de kenomagnetita (fase entre maghemita e magnetita que é deficiente em  $Fe^{+2}$ ) (Kullerud et al., 1969), como relicto no interior de martita. A hematita é o principal óxido de ferro, tanto granoblástica como especular, de diferentes gerações (Rosière et al., 2001). A primeira está relacionada com a recristalização da martita devido ao metamorfismo (*e.g.* Mendes, 2015). Hematita microlamelar indica continuação da oxidação de magnetita e martita (Lagoeiro, 1998; Mendes, 2015). A lamelar está associada também com o aumento da intensidade deformacional (Mendes e Lagoeiro, 2012).

A partir da composição principal de suas bandas, os itabiritos são classificados em diferentes fácies mineralógicas: silicosos, dolomíticos, anfibolíticos, magnetíticos e manganésíferos (Dorr, 1969; Pires et al., 2005; Rosière et al., 2008; Spier et al., 2007; Amorim e Alkmim, 2011). O silicoso é o principal no QF, enquanto os outros formam camadas, ou lentes, no interior da Formação Cauê

(*e.g.* Alkmim, 2014). O itabirito magnético normalmente se encontra intemperizado, com intensa coloração ocre e composição goetítica. Onde preservado apresenta coloração esverdeada, forte magnetismo sendo constituído por magnetita (de granulação fina), martita, grunerita-cummingtonita, quartzo, dolomita, stilpnomelano e hematita subordinada (Alkmim, 2009). O manganífero, se alterado, gera depósitos de manganês e ferro-manganês na porção basal da Formação Cauê (*e.g.* Alkmim, 2014).

O metamorfismo gera transformações mineralógicas nos óxidos de ferro das FF do QF. O aumento do metamorfismo está relacionado com o aumento do tamanho dos cristais de quartzo e hematita, e a formação de especularita ao longo dos planos de deformação (hematita especular de hábito lamelar), em porções ricas em óxidos de ferro (Herz, 1978; Pires, 1995). A presença de fluidos hidrotermais circulantes acarreta também em modificações na composição original da rocha devido a lixiviações e substituições (Rosière et al., 2008).

Segundo Rosière e Chemale Jr (2000) nos itabiritos ocorrem múltiplas alterações causadas por metamorfismo e hidrotermalismo o que provoca martitização de magnetita; blastese da hematita; dolomitização em itabiritos silicosos, com posterior transformação da dolomita em hematita; formação de microestruturas que indicam mobilização sintectônica de ferro (Lagoeiro, 1998); e de veios de hematita que cortam bandamentos (*e.g.* Alkmim, 2014).

### **2.2.2. Minério de ferro de alto teor**

A complexidade dos processos atuantes no QF levam a formação de diferentes tipos de minério de ferro de alto teor. Segundo Rosière e Chemale Jr (2000), o minério pode ser dividido em três grupos: o não-tectônico (hipogênico ou supergênico), sem relação genéticas com as estruturas tectônicas; o sin-tectônico (hipogênico), com relação genética com as estruturas tectônicas; e o pós-tectônico (supergênico), onde as estruturas tectônicas facilitam a percolação de fluidos, mas não são uma condicionante genética para sua formação.

O não-tectônico é exemplificado por corpos de hematita compacta que possuem dimensões variadas, e ocorrem na forma de lentes concordantes, decimétricas a decamétricas (*e.g.* Alkmim, 2014). São observados dentro dos níveis filíticos da base da Formação Cauê e no interior de gigantescos corpos de minério friável. Há corpos compactos, de estrutura brechóide, que são gerados em brechas hidráulicas devido à alta pressão dos fluidos hidrotermais (*e.g.* Alkmim, 2014). Ambos os exemplos apresentam uma trama granoblástica que pode ser porosa ou maciça.

Neste caso a hematita encontra-se parcialmente orientada paralelamente ao bandamento, podendo ser resultado da orogenia responsável pela geração dos megassinclinais (Chemale Jr et al.,

1994). A oxidação de magnetita original dá origem às hematitas durante o início do metamorfismo ou até mesmo na diagênese. A estruturação diagenética, e sedimentar, encontra-se totalmente preservada, e os minerais de ganga lixiviados se depositam concomitantemente aos óxidos/hidróxidos de ferro (Rosière et al., 2001).

O sin-tectônico é encontrado na extremidade leste e nordeste do QF, no domínio de alta deformação que possui mais zonas de cisalhamento que cortam os bandamentos. Os fluidos hidrotermais sin-tectônicos são os maiores responsáveis pela lixiviação dos minerais de ganga, remobilização do  $Fe^{+2}$  da estrutura da kenomagnetita original e precipitação de especularita, produzindo minério de teores variados (e.g. Alkmim, 2014). Ainda não se sabe exatamente quando foram gerados estes fluidos, podendo estar relacionados à orogenia Riacciana ou ao ciclo Brasileiro.

O pós-tectônico está relacionado com o enriquecimento supergênico sofrido pelas FFB. As condições climáticas do QF, juntamente com processos morfotectônicos desde o Paleoceno (Spier et al., 2006), favorecem a circulação de água, na vertical e na horizontal, o que causa lixiviação de sílica e dolomita, e formação de minério supergênico (Dorr, 1964, 1965; Eichler, 1967; Ramanaidou et al., 1996; Spier et al., 2003). Pode ser encontrado no domínio de baixa e de alta deformação do QF. No de baixa o minério supergênico é proveniente dos itabiritos magnetíticos e/ou martíticos, e possui goethita como cimento e contaminante. No de alta ele é proveniente do itabirito friável com especularita (Rosière e Chemale Jr, 2000).

Os três tipos de minério sofrem processos intempéricos quando próximos à superfície. De acordo com Rosière e Chemale Jr (2000) os principais produtos do intemperismo dos itabiritos, e dos minérios, são: itabiritos tipo chapinha, onde suas bandas são parcialmente preservadas após a lixiviação dos minerais de ganga; cangas e rolados, produtos da erosão de corpos de hematita compacta.

### **2.2.3. Gênese do minério de ferro de alto teor**

Rosière et al. (2008) propõem modelo hidrotermal para a mineralização primária, e modelo de enriquecimento supergênico secundário para formação do minério de ferro residual. A mineralização primária, causada por fluidos hidrotermais, forma corpos de minério sin-tectônicos, ou hipogênicos, presentes nos domínios de deformação do QF.

Rosière e Rios (2004) descrevem estes fluidos com base nas características texturais do minério, e nas inclusões fluidas presentes em hematitas, concluindo que a alteração hipogênica causadora da mineralização primária se desenvolveu em três estágios durante a orogenia Riacciana.

O primeiro está relacionado com o estágio contraccional inicial em que fluidos metamórficos redutores lixiviaram a sílica e os carbonatos, e remobilizaram o ferro, formando corpos de magnetita, de itabiritos ricos em ferro e de veios de óxidos de ferro (Rosière e Rios, 2004).

No segundo fluidos de baixa temperatura, e de baixa a média salinidade, causaram oxidação da magnetita em hematita, formando minério poroso e maciço de trama granular (Rosière e Rios, 2004).

No terceiro a formação de hematita tabular e lamelar reflete envolvimento de fluidos de alta salinidade. Ambos os tipos de hematita são vistos em zonas de cisalhamento (locais preferenciais de percolação de fluidos) do domínio de alta deformação. Se formaram durante a orogenia Riacciana, em níveis crustais mais profundos (maior temperatura) e foram trazidas, posteriormente, a níveis crustais superiores durante o ciclo Brasileiro (Rosière et al., 2008).

#### **2.2.4. Geoquímica da magnetita e hematita**

Magnetita e hematita são óxidos de ferro comuns em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares (Dupuis e Beaudoin, 2011), e ocorrem principalmente em depósitos magmáticos-hidrotermais como minerais principais (*e.g.* depósitos de óxidos de ferro, cobre e ouro – IOCG; e FFB) ou acessórios (*e.g.* depósitos de sulfetos maciços vulcanogênicos – VMS) (Makvandi et al., 2017). Suas assinaturas geoquímicas têm sido muito utilizadas na exploração mineral (Dare et al., 2014) uma vez que condições físico-químicas distintas para formação de cada tipo de depósito controlam também a composição química destes óxidos de ferro. Muito se tem estudado a respeito da geoquímica da magnetita em diferentes tipos de depósitos do mundo (*e.g.* Dare et al., 2012; Nadoll et al., 2014; Duuring et al., 2018), mas ainda são poucos os estudos em hematita, em especial hematita de FFB (*e.g.* Hensler et al., 2015; Gomes et al., 2018; Duuring et al., 2018).

Magnetita pertence ao grupo do espinélio, possui estrutura cúbica inversa e fórmula estequiométrica geral  $XY_2O_4$  (Fleet, 1981), com X representando cátion divalente como Mg,  $Fe^{+2}$ , Ni, Mn, Co e Zn, e Y cátion trivalente Al,  $Fe^{+3}$ , Cr, V, Mn e Ga (Lindsley, 1976; Wechsler et al., 1984). Titânio também pode ocupar Y quando há substituição acoplada com cátion divalente (Wechsler et al., 1984). Magnetita também apresenta fases de transição com outros minerais do grupo do espinélio, podendo formar soluções sólidas completas ou parciais com espinélio ( $MgAl_2O_4$ ), ulvöespinélio ( $Fe_2TiO_4$ ), ilmenita ( $FeTiO_3$ ), cromita ( $FeCr_2O_4$ ) e gahnita ( $ZnAl_2O_4$ ) (Nadoll et al., 2014).

Hematita ( $Fe_2O_3$ ) têm a mesma estrutura cristalina que ilmenita e coríndon ( $Al_2O_3$ ), sendo romboédrica. Acima de  $1050^\circ C$  forma solução sólida completa com ilmenita e limitada com

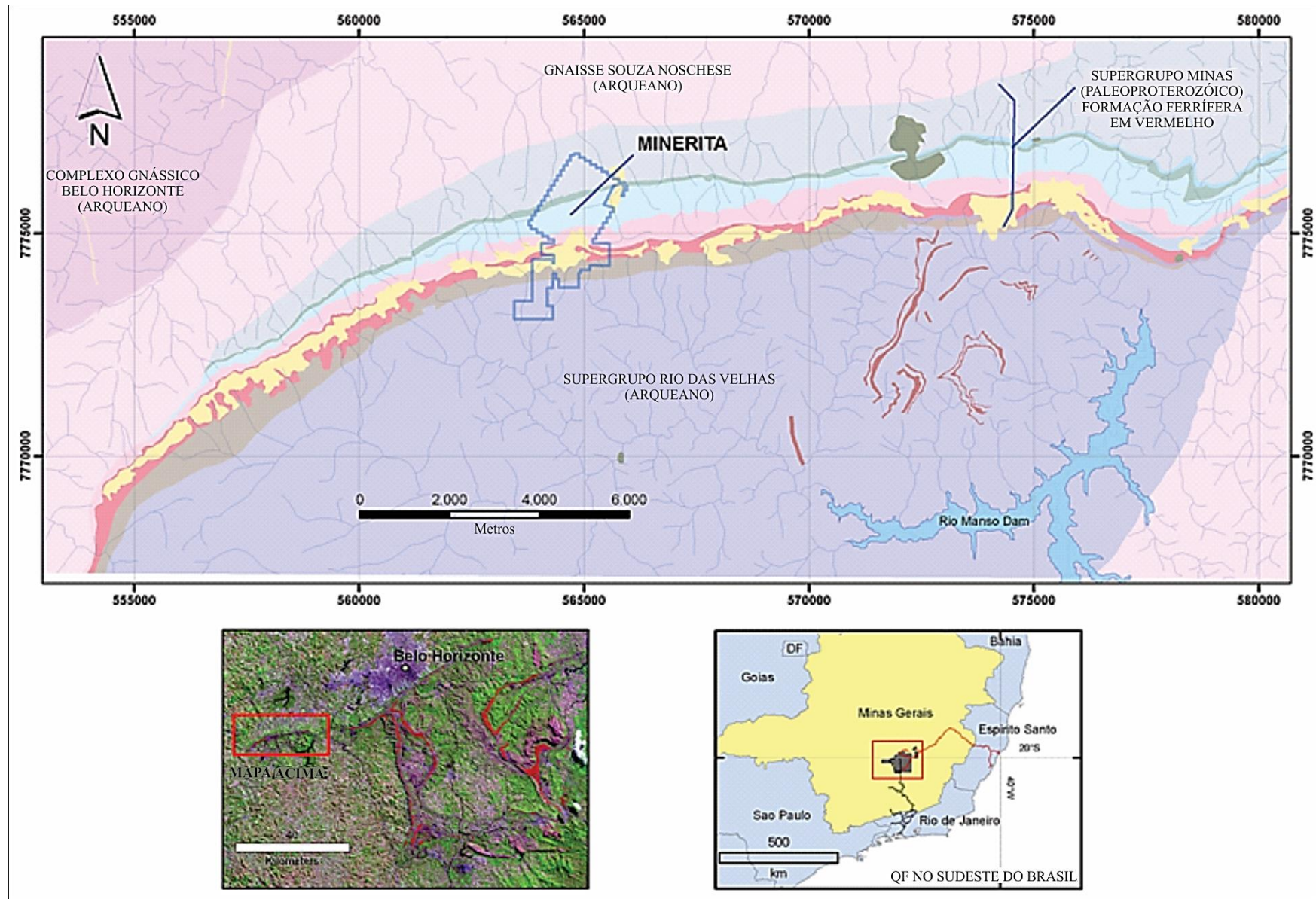
magnetita, coríndon e bixbyita ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ) (Dupuis e Beaudoin, 2011). Em diferentes condições redutoras hematita se transforma em magnetita (Mücke e Cabral, 2005; Barbosa e Lagoeiro, 2010), mas quando há  $\text{Fe}^{+3}$  permanece estável em diferentes fugacidades de oxigênio ( $f\text{O}_2$ ) (Otake et al., 2007). Água e lugares vazios em sua estrutura cristalina também afetam a química da hematita (Dang et al., 1998).

Dentre todos os elementos que podem ser compatíveis com a estrutura de magnetita e hematita, Lindsley (1976) e Nadoll et al. (2014) definiram um grupo, com concentrações detectáveis, composto por Mg, Al, Ti, V, Co, Ni, Zn, Cr, Mn, Ga e Sn, e denominado como elementos discriminadores. Há diferentes fatores que controlam a assinatura geoquímica de magnetita de diferentes tipos (magmática, metamórfica e hidrotermal) e de hematita. No caso de magnetita magmática, sua extensa variação química é controlada pela (1) composição do magma ou da fonte da rocha; (2) temperatura; (3) pressão; (4)  $f\text{O}_2$ ; e (5) fugacidade de enxofre ( $f\text{S}_2$ ) (Nadoll et al., 2014). Na magnetita metamórfica a temperatura e  $f\text{O}_2$  são os principais fatores de controle (Frost, 1991c). Para a magnetita hidrotermal e hematita os principais fatores são: composição do fluido e da rocha encaixante, interação fluido-rocha, temperatura, pressão,  $f\text{O}_2$  e  $f\text{S}_2$ , e reequilíbrio mineral (Dare et al., 2014).

Em geral, a assinatura geoquímica de magnetita magmática e metamórfica varia bastante dependendo das condições físico-químicas de formação e ambiente de deposição. Já na magnetita hidrotermal e hematita é frequentemente observado empobrecimento de elementos imóveis durante a alteração hidrotermal com possível enriquecimento em elementos incompatíveis, como Si e Ca (Dare et al., 2014). Magnetita hidrotermal e hematita, formadas por fluido de baixa temperatura, possuem menor conteúdo de elementos traço (*e.g.* Araújo, 2018).

### **2.3. GEOLOGIA DA JAZIDA MINERITA**

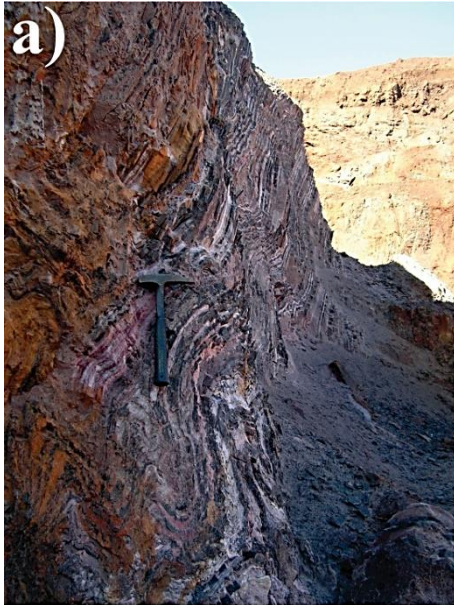
A jazida Minerita está inserida na porção sudoeste da Serra do Curral, em uma localidade denominada Serra Azul, e faz parte do domínio oeste de baixa deformação do QF (Rosière et al., 2001) (Fig. 2.4).

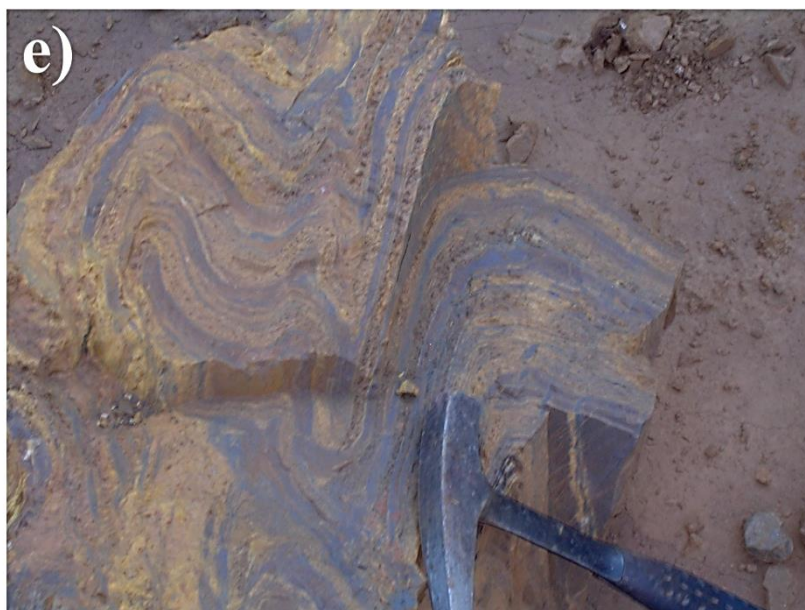


**Figura 2.4:** Mapa geológico da Serra Azul com a localização da jazida Minerita (reproduzido de Minerita, relatório interno inédito, 2007).



Os principais litotipos de Mínerita são itabiritos da Formação Cauê, quartzito sotoposto da Formação Cercadinho e filito sobreposto da Formação Batatal. Em mapeamento geológico de 2007 foram encontrados itabiritos friáveis (pulverulentos) e compactos, lentes de hematita maciça, brechas e quartzito ferruginoso intemperizado (Fig. 2.5) (Tabela 1B no Anexo B).





**Figura 2.5:** Litotipos encontrados em mapeamento geológico de 2007 (modificado de Minerita, relatório interno inédito, 2007). **a)** Itabirito silicoso friável. **b)** Itabirito dolomítico friável. **c)** Lente de hematita envolta por brecha. Itabirito dolomítico friável. **d)** Quartzito ferruginoso friável. **e)** Itabirito anfibolítico.

Itabiritos friáveis são os principais produtos de extração na jazida. Há ainda itabiritos compactos, que são pouco explorados. Ambos são silicosos e carbonáticos, com anfibolíticos subordinados. Há lentes de hematita, localmente com magnetita. Itabiritos são cortados por zonas de cisalhamento (falhas de empurrão), de direção geral NE-SW, forte ângulo de mergulho para SW (Minerita, relatório interno inédito, 2007) (Figs. 1B a 7B no Anexo B).

Corpos hematíticos são raros na cava e, onde presentes, possuem espessura centimétrica a métrica, sendo representantes do minério de ferro de alto teor (Fig. 2.6). Historicamente já foram lavrados pequenos corpos hematíticos encaixados em quartzito da Formação Cercadinho (Minerita, relatório interno inédito, 2007).





**Figura 2.6:** Minério de ferro de alto teor da jazida Minerita.

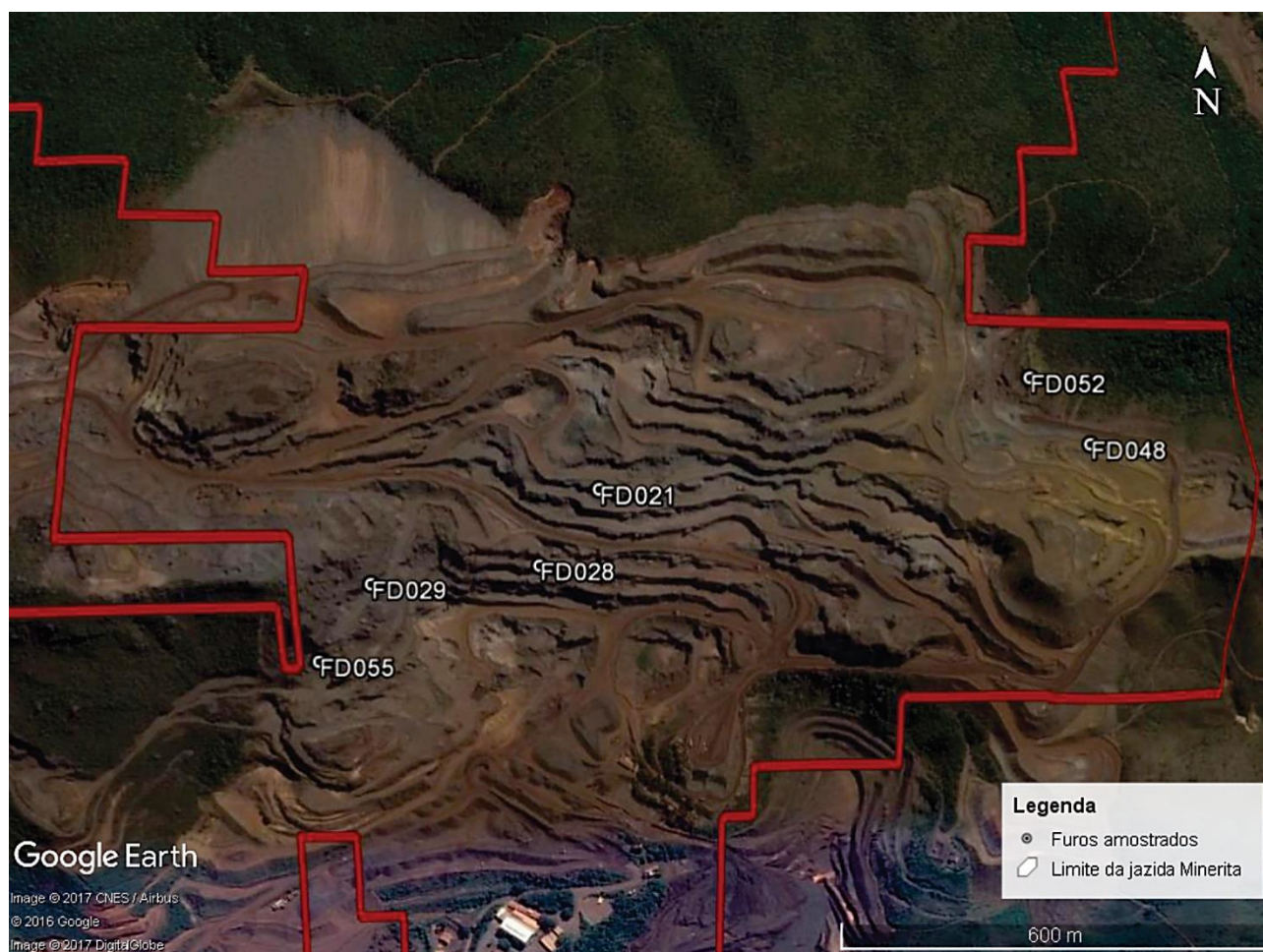
## CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Antes da etapa de campo foi realizado estudo inicial sobre as formações ferríferas bandadas (FFB) da Formação Cauê, em especial dos itabiritos e do minério de ferro de alto teor presentes no sudoeste da Serra do Curral. Isso ajudou na escolha dos furos e das amostras que seriam utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

### 3.2. ETAPA DE CAMPO

A campanha de sondagem aconteceu entre janeiro de 2014 e maio de 2015. Neste período foram realizadas descrições geológicas e geotécnicas de itabiritos, minério de ferro de alto teor e filito dos testemunhos de sondagem. Com intuito de se analisar amostras de diferentes graus de alteração hidrotermal, em um perfil L-O, seis furos de sondagem (FD021, FD028, FD029, FD048, FD052, FD055) foram escolhidos para estudo. A localização espacial encontra-se na Figura 3.1.



**Figura 3.1:** Localização espacial dos furos de sondagem amostrados na jazida Minerita (fonte: Google Earth).

### 3.3. AMOSTRAGEM

A amostragem inclui itabiritos silicosos compactos com bandamento evidente, com bandamento e textura brechada (venulações de quartzo), e com textura brechada; minério de ferro de



alto teor compacto com textura homogênea (maciço) e brechada (venulações de quartzo); e brecha compacta com sulfetos. Os diferentes tipos de itabiritos estão intercalados em toda a extensão dos furos, e os minério na forma de lentes e camadas. A brecha com sulfetos é somente identificada nos furos FD048 e FD052. Foi escolhido amostrar somente itabirito silicoso para facilitar a comparação dos resultados. Os dados resumidos a respeito da quantidade de amostras coletadas em cada furo, e os respectivos litotipos, seguem na Tabela 5.1 do artigo.

### 3.4. ESTUDOS PETROGRÁFICOS

Do total de 42 amostras, 32 foram escolhidas para confecção de lâminas polidas delgadas (Tabela 3.1). Maiores informações no artigo.

**Tabela 3.1:** Lâminas escolhidas para análise e respectivos litotipos.

<b>Furo</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Lâminas</b>	<b>Litotipos</b>
FD021	37,10 a 117,40	001, 002, 003, 005, 006, 008, 009 e 010	- Itabiritos silicosos com bandamento evidente, com bandamento e textura brechada, e com textura brechada; minério com textura homogênea e brechada.
FD028	7,05 a 140,95	001, 002, 003, 004, 005, 007 e 008	- Itabiritos silicosos com bandamento evidente, com bandamento e textura brechada, e com textura brechada.
FD029	15,10 a 212,60	001, 002, 003, 005, 007, 009 e 011	- Itabiritos silicosos com bandamento evidente, com bandamento e textura brechada, e com textura brechada; minério com textura homogênea e brechada.
FD048	178,95 a 179,75	001	- Brecha com sulfetos.
FD052	127,00 a 223,95	001, 003, 005, 006 e 007	- Brecha com sulfetos.
FD055	115,85 a 172,05	001, 002, 003 e 004	- Itabiritos silicosos com bandamento evidente, com bandamento e textura brechada, e com textura brechada.

### 3.5. MICROTERMOMETRIA DE INCLUSÕES FLUIDAS

#### 3.5.1. Generalidades

Inclusões fluidas (IFs) são pequenos resquícios de fluidos aprisionados nos minerais durante seu crescimento e posterior deformação. Seu estudo fornece informações a respeito da salinidade, densidade, pressão, temperatura mínima de formação e composição iônica. Isso permite estabelecer uma sucessão de eventos (metamórficos, ígneos e hidrotermais) ocorridos em determinada região (Fuzikama, 1985).

As etapas do estudo das IFs incluem caracterização petrográfica dos litotipos; definição dos veios e brechas e suas correlações, e os minerais nos quais são observadas as IFs; e determinação, através de mapeamento, de todas as características morfológicas, de composição e as relações entre as IFs e os cristais hospedeiros (Roedder, 1984; Fuzikama, 1985; Robert e Poulsen, 2001).

O conhecimento da existência de IFs, e seu estudo, tiveram início no século IV a partir de registros de observação. Nos séculos subsequentes à Renascença, vários registros também foram catalogados por estudiosos naturalistas da época (Roedder, 1972). Na primeira metade do século XIX

ocorreram as primeiras tentativas de análises das IFs, sendo o maior salto e marco publicado em extenso artigo escrito por Sorby (1858). A maioria dos trabalhos publicados neste período são descritivos, porém, autores como Zirkel (1870) tentaram desenvolver análises do conteúdo das inclusões (Roedder, 1972).

Só após mais de três quartos de século do tempo de Sorby e Zirkel é que novos estudos sobre as IFs começaram a ser desenvolvidos. Somente na segunda metade do século XX é que realmente o interesse por este conhecimento foi retomado e, desde o início da década de 60, o número de trabalhos publicados tem aumentado (Fuzikama, 1985). Destaque especial deve ser dado ao pesquisador Edwin Roedder que propôs métodos e técnicas confiáveis para o estudo das IFs.

Atualmente novos pesquisadores vêm aprimorando metodologias de trabalho e interpretações de resultados, sendo dado destaque especial para as técnicas e informações sugeridas por Roedder (1984), Fuzikama (1985), Shepperd et al. (1985), Richards e Kerrich (1993), Godstein e Reynolds (1994), Lüders e Ziemann (1999), Bailly et al. (2000), Rosière e Rios (2004) e Oliveira et al. (2015).

### **3.5.2. Procedimento analítico**

Para jazida Minerita a análise de IFs foi realizada em cristais de quartzo venular da amostra de minério de ferro de alto teor com textura brechada. Lâmina espessa bipolida foi confeccionada em laboratório externo à UFMG (Fernando Soares de Souza, Belo Horizonte, Minas Gerais). Informações a respeito do equipamento e metodologia empregados encontram-se no artigo.

Todos os dados e informações foram tratados em planilhas e gráficos do pacote Microsoft Office Excel, e em programa de imagens CorelDrawX8. A salinidade foi calculada pelo programa MacFlinCor (Brown e Hagemann, 1995).

### **3.6. MICROSSONDA ELETRÔNICA - EPMA**

A técnica de microanálise por microsonda eletrônica (*Electron Microprobe Microanalysis - EPMA*) fornece informações qualitativas e quantitativas da concentração dos elementos químicos em um determinado material. São adquiridas através da interação de feixes de elétrons com a superfície do material, devidamente metalizada. A interação pode gerar diferentes sinais (elétrons secundários, elétrons retroespalhados e emissões de raios X), captados por espectrômetros de energia dispersiva (EDS) ou por espectrômetros de comprimento de onda dispersivo (WDS). No caso de informações qualitativas, um dos produtos os dados de EDS são os mapas de concentrações, onde colorações mais escuras indicam concentrações elevadas de determinado elemento químico. Já para informações quantitativas, dados de WDS são comparados com padrões estabelecidos anteriormente à análise (Milani et al., 2016).

Recomenda-se que esta técnica de EPMA seja utilizada para limites de detecção superiores a 0,1 % em peso, ou 1000 ppm. Para valores inferiores, como no caso de elementos traço, outras técnicas devem ser empregadas, como a *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy* (LA-ICP-MS).

Para o caso de Minerita, a análise de óxidos de ferro por microsonda eletrônica foi realizada com o intuito de se obter o padrão interno dos óxidos, com vistas às análises por LA-ICP-MS, e a presença de zoneamento mineral e porosidade. Foram selecionadas seis amostras para confecção de seções polidas a partir do espelho das respectivas lâminas delgadas (Tabela 3.2).

**Tabela 3.2:** Lâminas escolhidas para análise em microsonda eletrônica.

Furo	Lâmina	Quantidade	Litotipos
FD021	FD021-006	1	- Minério de ferro com textura homogênea.
	FD029-001	1	- Itabirito silicoso com bandamento evidente.
FD029	FD029-003	1	- Itabirito silicoso com textura brechada.
	FD029-007	1	- Itabirito silicoso com bandamento e textura brechada.
FD052	FD052-005	1	- Brecha com sulfetos.
	FD052-007	1	- Brecha com sulfetos.

As seções foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do Centro de Pesquisas Manuel Teixeira da Costa (CMPTC), Instituto de Geociências (IGC), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), sendo posteriormente demarcada áreas nas quais martita, hematita (de diferentes tipos) e magnetita estavam presentes. A demarcação foi realizada em microscópio óptico Leica DM 2500P de luz transmitida e refletida, com captura de fotomicrografias, localizado no Laboratório de Metalogenia do CMPTC, IGC, UFMG.

Camada de 15 nm de carbono foi utilizada para metalizar as seções polidas. A metalização foi feita em Metalizadora *Bal-Tec*, modelo MD20, localizada no Centro de Microscopia da UFMG. Foram quantificados MgO, TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, SiO<sub>2</sub> e Fe<sub>2</sub>O em Microsonda Eletrônica Jeol, modelo JXA 8900RL WD/ED, com quatro espectrômetros de WDS, pré-calibrada, no Centro de Microscopia da UFMG. A análise foi feita a partir de feixe com diâmetro 5 µm, voltagem de 15 kV, corrente elétrica de 20 nA e captação de dados a cada 50 msec. Os padrões utilizados para cada elemento foram: MgO Ian Steele, Rutilo Ian Steele, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ian Steele, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ian Steele, Rodonita Astimex, Quartzo Smithsonian (MNNHR17701) e Magnetita Smithsonian (MNNH114887).

Os resultados foram adquiridos em % peso, tratados em planilhas do pacote Microsoft Office Excel, e se encontram nas Tabelas 1C a 6C do Anexo C. O limite de detecção (LD) é de 0,001 ppm.

### 3.7. LA-ICP-MS EM ÓXIDOS DE FERRO

A técnica *in situ* LA-ICP-MS permite a quantificação de elementos traço o que auxilia no estudo da gênese de diferentes tipos de depósitos (Oliveira, 2015). Combina alta resolução espacial,

elevada sensibilidade, baixos *backgrounds*, baixos limites de detecção (de 1 a 10  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  em 40  $\mu\text{m}$  de ablação para alguns elementos) (Günther et al., 1997), e capacidade de análise de multielementos (Allan et al., 2005). Para jazidas de ferro, esta técnica vem sendo cada vez mais utilizada em óxidos de ferro *in situ*, de diferentes gerações. No Quadrilátero Ferrífero (QF) alguns estudos já foram conduzidos principalmente em magnetita, com dados em hematita pouco frequentes (Hensler et al., 2015; Gomes et al., 2018; Araújo, 2018).

As seções polidas, com áreas demarcadas, são colocadas em uma célula de geometria constante. Com auxílio de microscópio óptico, acoplado à célula de laser, o material é ablado em uma atmosfera de gás de classe analítica (*e.g.* hélio) e transportado até o interior da câmara de plasma indutivamente acoplado, onde íons são criados e acelerados. Os íons são separados por campos magnéticos no espectrômetro de massa através de sua razão massa/carga. Os sinais gerados são encaminhados até um detector que os converte em sinais elétricos que, posteriormente, são convertidos em espectros pelo microcomputador (Longerich e Diegor, 2001). Os espectros são tratados em programas específicos, de acordo com os padrões utilizados e a finalidade da pesquisa.

Para o estudo da gênese da jazida Minerita, análises de LA-ICP-MS *in situ* em magnetita e hematita de diferentes gerações dos itabiritos e minério com textura homogênea, e de magnetita e hematita anédrica da brecha com sulfetos, foram feitas a partir de seis seções polidas demarcadas, utilizadas anteriormente nas análises de microsonda (Tabela 3.2). Maiores informações sobre o equipamento, considerações e metodologia utilizados seguem no artigo.

### **3.8. ANÁLISES DE ISÓTOPOS DE ENXOFRE EM PIRITA**

#### **3.8.1. Generalidades**

Estudos de isótopos de enxofre começaram a serem melhor conduzidos na década de 1980, onde já se percebia a estreita relação entre formação de pirita e surgimento de depósitos de ouro (Phillips et al., 1986; Clout et al., 1989).

No final da década de 1990 e início do ano 2000, análises de isótopos de enxofre *in situ* a laser foram aperfeiçoadas para se obter informações a respeito das diferentes gerações de pirita (Hagemann et al., 1999; Bateman e Hagemann, 2004; Hodkiewicz et al., 2009).

Atualmente muito tem se avançado sobre os melhores métodos para quantificação destes isótopos (*Secondary Ion Mass Spectrometry* - SIMS e Fluorescência a laser), principalmente dos menos abundantes (Whitehouse, 2013; LaFlamme et al., 2016).

A técnica SIMS é utilizada para quantificação dos isótopos de enxofre  $^{32}\text{S}$ ,  $^{33}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$  e  $^{36}\text{S}$ . Sua aplicação permite a separação entre o fracionamento dependente da massa (*mass-dependent fractionation* - MDF) e o independente da massa (*mass-independent fractionation* - MIF) (Farquhar et al., 2013), e entre processos bióticos e abióticos. O avanço no entendimento do surgimento da vida, do grande evento de oxidação (GOE) da Terra e da gênese de depósitos metálicos vem sendo aprimorado nos últimos anos devido a aplicação desta técnica.

O MDF é causado pelo efeito cinemático isotópico, e caracterizado por valores de  $\Delta^{33}\text{S}$  próximos a zero (-0,2 ‰ a +0,2 ‰). Indica que a fonte do enxofre é mantélica/magmática e que não foi exposta à uma atmosfera arqueana. Quando há forte influência de fatores diferentes do da massa do isótopo na reação há variação nos valores de  $\Delta^{33}\text{S}$  e  $\Delta^{36}\text{S}$  para pequenas mudanças nos valores de  $\delta^{34}\text{S}$ , com surgimento do MIF (Farquhar et al., 2000).

O MIF é característico de ambientes arqueanos a proterozoicos, com idades inferiores a ~2,45 Ga (Farquhar e Wing, 2003). Neste cenário havia baixas concentrações de  $\text{O}_2$  e  $\text{O}_3$  na atmosfera o que permitia que os raios ultravioletas causassem reações de fotólise no  $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}$  (fornecidos por erupções vulcânicas antigas) e fracionamento dos isótopos independentemente da massa. O resultado seriam espécies na forma reduzida (e.g. aerossol  $\text{S}_8$ ) que carregavam assinatura positiva de  $\Delta^{33}\text{S}$ , e espécies oxidadas (e.g. aerossol  $\text{SO}_4$ ) com assinatura negativa de  $\Delta^{33}\text{S}$  (Farquhar e Wing, 2003).

A assinatura geoquímica gerada era transferida para os sedimentos arqueanos através de processos bióticos ou abióticos, que incluíam redução do sulfato via bactérias (*bacterial sulfate reduction* – BSR) e oxidação/redução do enxofre na atmosfera (*disproportionation of elemental sulfur* – BSD) (Farquhar et al., 2000; Philippot et al., 2007; Lyons, 2009; Jamieson et al., 2013). Esta transferência também era possível devido a concentrações de oxigênio abaixo de  $10^{-5}$  PAL (*present atmospheric level*) (Pavlov e Kasting, 2002), onde todo o enxofre presente na atmosfera seria incorporado nos sedimentos arqueanos.

Casos onde há assinatura positiva de  $\Delta^{33}\text{S}$  e de  $\delta^{34}\text{S}$  indicam incorporação de enxofre nos sedimentos via processos abióticos atmosféricos (Thomassot et al., 2015); com  $\Delta^{33}\text{S}$  e de  $\delta^{34}\text{S}$  próximos a zero, incorporação de  $\text{SO}_2$  diretamente do vulcanismo; e com  $\Delta^{33}\text{S}$  negativo e  $\delta^{34}\text{S}$  variável, mostram redução de sulfato via bactérias (Hou et al., 2007).

Desde o final do Paleoproterozoico até os dias atuais o MDF se sobrepôs ao MIF, sendo o principal processo de fracionamento isotópico de enxofre. Isso confirma que a partir de ~ 2,0 Ga os níveis de oxigênio na atmosfera eram altos o suficiente ( $> 10^{-2}$  PAL) para impedir a fotólise de  $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}$  por raios ultravioletas (Farquhar e Wing, 2003).

### **3.8.2. Procedimento analítico**

Na jazida Minerita foi aplicada a técnica SIMS em sessenta e seis grãos de pirita de cinco fragmentos da amostra 005 do furo de sondagem FD052. Equipamento e metodologia utilizados são explicados no artigo.

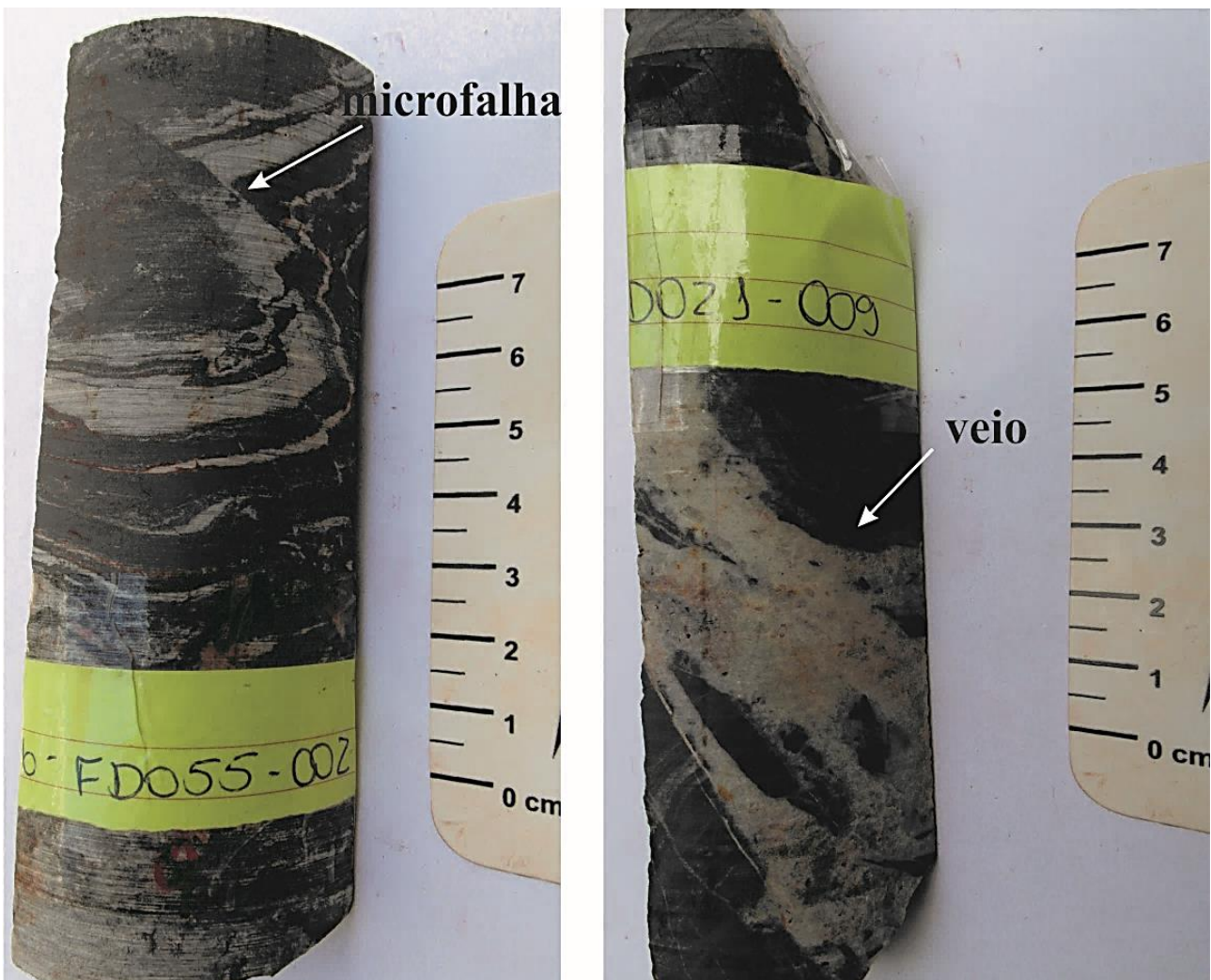


## CAPÍTULO 4 – AMOSTRAGEM E ESTUDOS PETROGRÁFICOS

### 4.1. AMOSTRAGEM

Para o estudo da jazida Minerita foram amostrados itabiritos silicosos, minério de ferro de alto teor e brecha com sulfetos. Os itabiritos apresentam ou não cavidades que normalmente são preenchidas por quartzo e óxidos de ferro. Possuem direção geral NE-SW e mergulhos variando de 20° a 90° para SW.

Nos itabiritos as bandas milimétricas são definidas e alternadas, comumente dobradas e seccionadas por microfalhas, veios, vênulas e brechas (Fig. 4.1). Elas são compostas por quartzo e óxidos de ferro variados.





**Figura 4.1:** Principais feições geológicas encontradas nos itabiritos silicosos e minério de ferro da jazida Minerita.

A classificação dos litotipos estudados é separada em tipos de itabiritos silicosos (1), de minérios de ferro de alto teor (2), e em um terceiro que contém sulfetos (3).

(1) Itabiritos silicosos que possuem bandas bem definidas e alternadas são classificados como **itabirito silicoso** (Fig. 4.2a). Já os que apresentam bandamento e textura brechada são definidos como **itabirito quartzo venulado**. Onde não há estruturação definida (bandamento totalmente obliterado), sendo predominante a textura brechada com clastos de itabirito em matriz itabirítica, são referidos como **brecha itabirítica** (Fig. 4.2b).

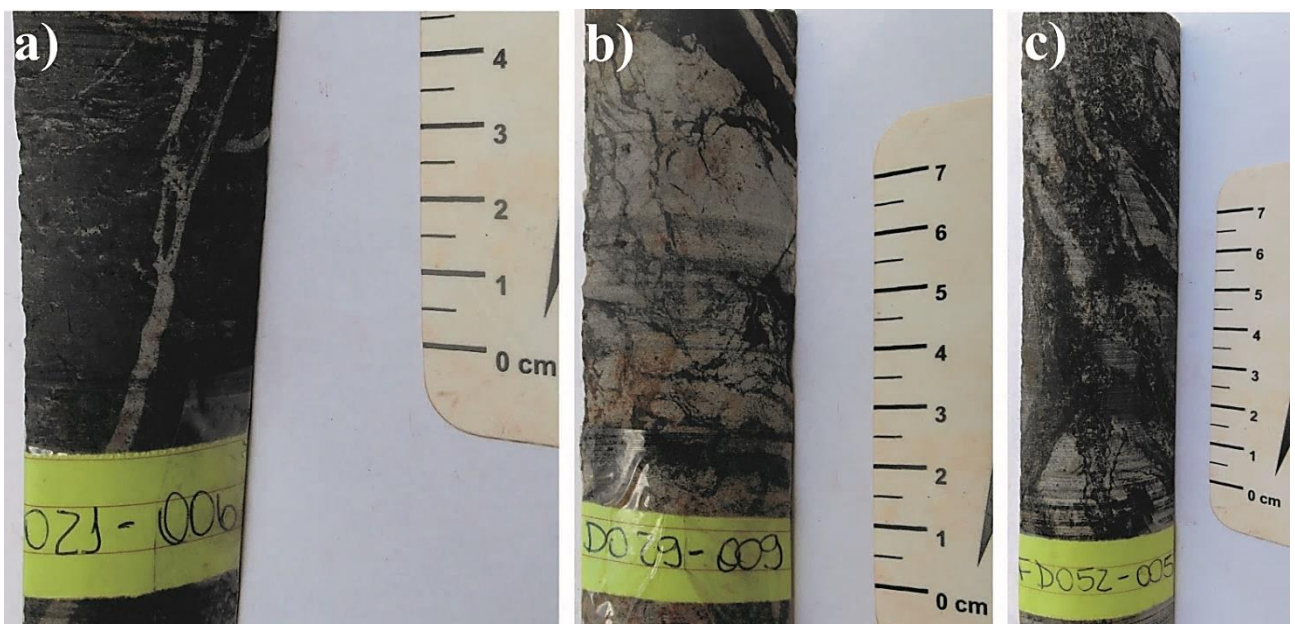
(2) Minério de ferro de alto teor forma lentes alternadas nos itabiritos silicosos. Podem possuir textura homogênea e brechada. Minério com textura homogênea e pouca quantidade de quartzo, é referido como **minério maciço** (Fig. 4.3a). O com textura brechada, maior quantidade de quartzo que o maciço, e clastos de minério em matriz quartzosa, é classificado como **minério quartzo venulado** (Fig. 4.3b).



(3) O terceiro litotipo que contém sulfetos é definido como **brecha com sulfetos**. Ela possui textura brechada com clastos compostos de óxidos de ferro, quartzo, carbonato e sulfetos em matriz quartzosa (Fig. 4.3c).



**Figura 4.2:** Amostras de itabirito e brecha itabirítica da mina Minerita. **a)** Itabirito silicoso. **b)** Brecha itabirítica.



**Figura 4.3:** Exemplos de minério de ferro de alto teor e brecha com sulfetos. **a)** Minério maciço. **b)** Minério quartzo venulado com muitos aglomerados de quartzo. **c)** Brecha com sulfetos.

Os itens que seguem apresentam maiores informações sobre as amostras estudadas nos furos de sondagem analisados (Fig. 3.1), com descrição detalhada nas Tabelas 1D a 6D do Anexo D.

#### **4.1.1. Itabiritos silicosos e minério de ferro**

O itabirito é identificado em todos os furos de sondagem. Possui bandas alternadas compostas por quartzo e óxidos de ferro. As bandas estão levemente dobradas e microfahadas, têm pequenas crenulações, vênulas concordantes e discordantes ao bandamento, pequenos aglomerados de quartzo (Fig. 4.4), e cavidades com e sem preenchimento (Figs. 4.4, 4.5, 4.6, 4.7).

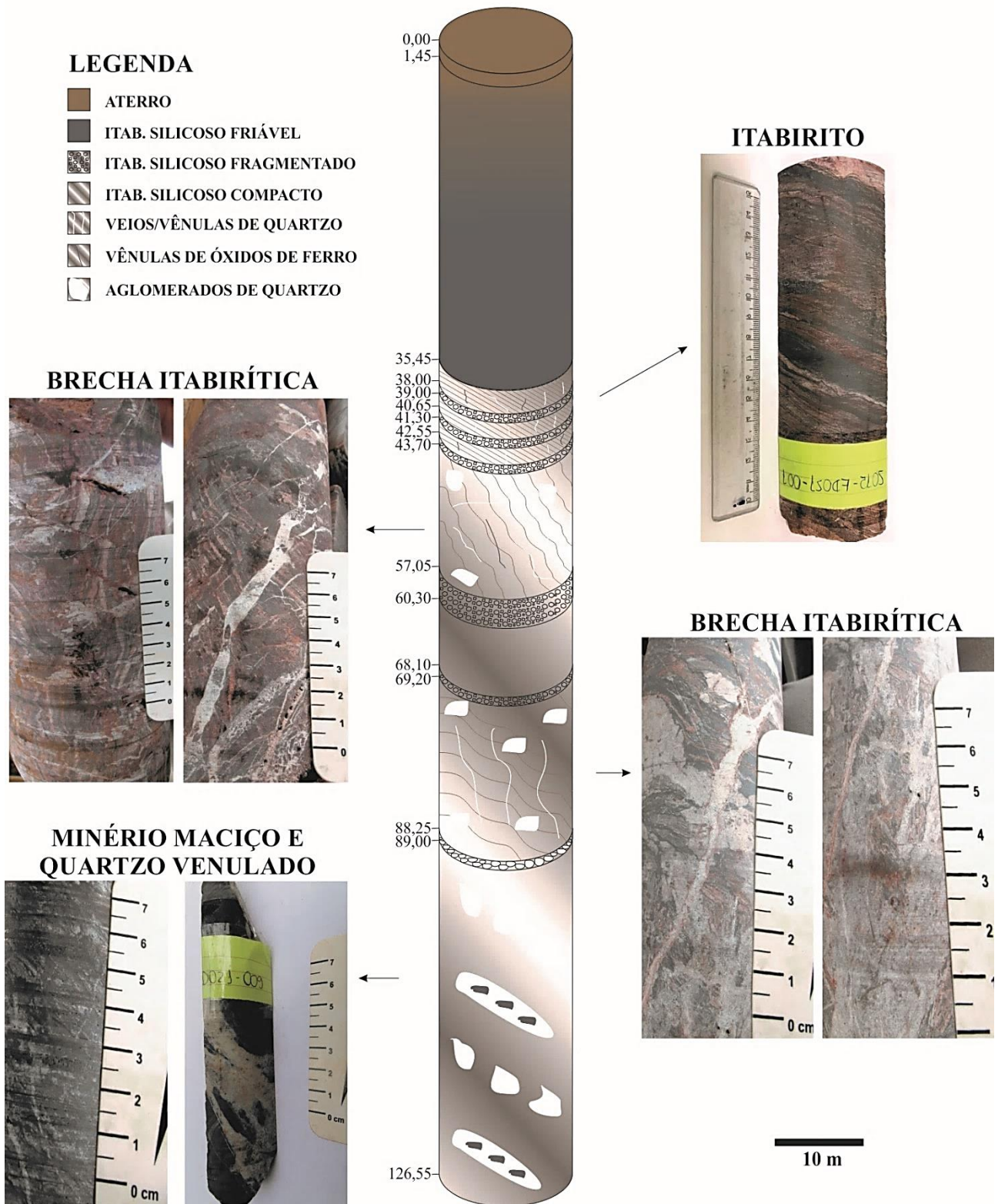
No itabirito quartzo venulado, visto nos furos FD028, FD029 e FD55, o bandamento é fortemente obliterado, com aumento da espessura das bandas, da quantidade de dobras, de pequenas crenulações, e de microfahas. Há maior quantidade de aglomerados e veios de quartzo e de óxidos de ferro que os bandado (Figs. 4.5, 4.6, 4.7), e finas cavidades com e sem preenchimento.

A brecha itabirítica está presente em todos os furos de sondagem. Apresenta bandamento totalmente obliterado. Onde há bandas essas estão dobradas e seccionadas, com textura brechada (Figs. 4.4, 4.5, 4.6, 4.7). Além disso, aumenta-se a quantidade de veios de quartzo e de óxidos de ferro, concordantes e discordantes ao bandamento, de aglomerados de quartzo e de óxidos de ferro, de microfahas, crenulações, e de cavidades sem preenchimento. Há crescimento de quartzo em pente em veios em amostras do furo de sondagem FD021 (Fig. 4.8).

O minério quartzo venulado é identificado nos furos de sondagem FD021 e FD029. Apresenta quantidade moderada de aglomerados, veios e vênulas de quartzo (Figs. 4.4, 4.6). O minério maciço é visto somente no furo FD021 (Fig. 4.4). Neste caso a quantidade de aglomerados de quartzo diminui quase por completo, mas não some totalmente, sendo concentrada principalmente em aglomerados e estruturas parecidas com vênulas (Fig. 4.4). Em ambos os tipo de minério observa-se cavidades sem preenchimento, o que sugere desenvolvimento de porosidade.

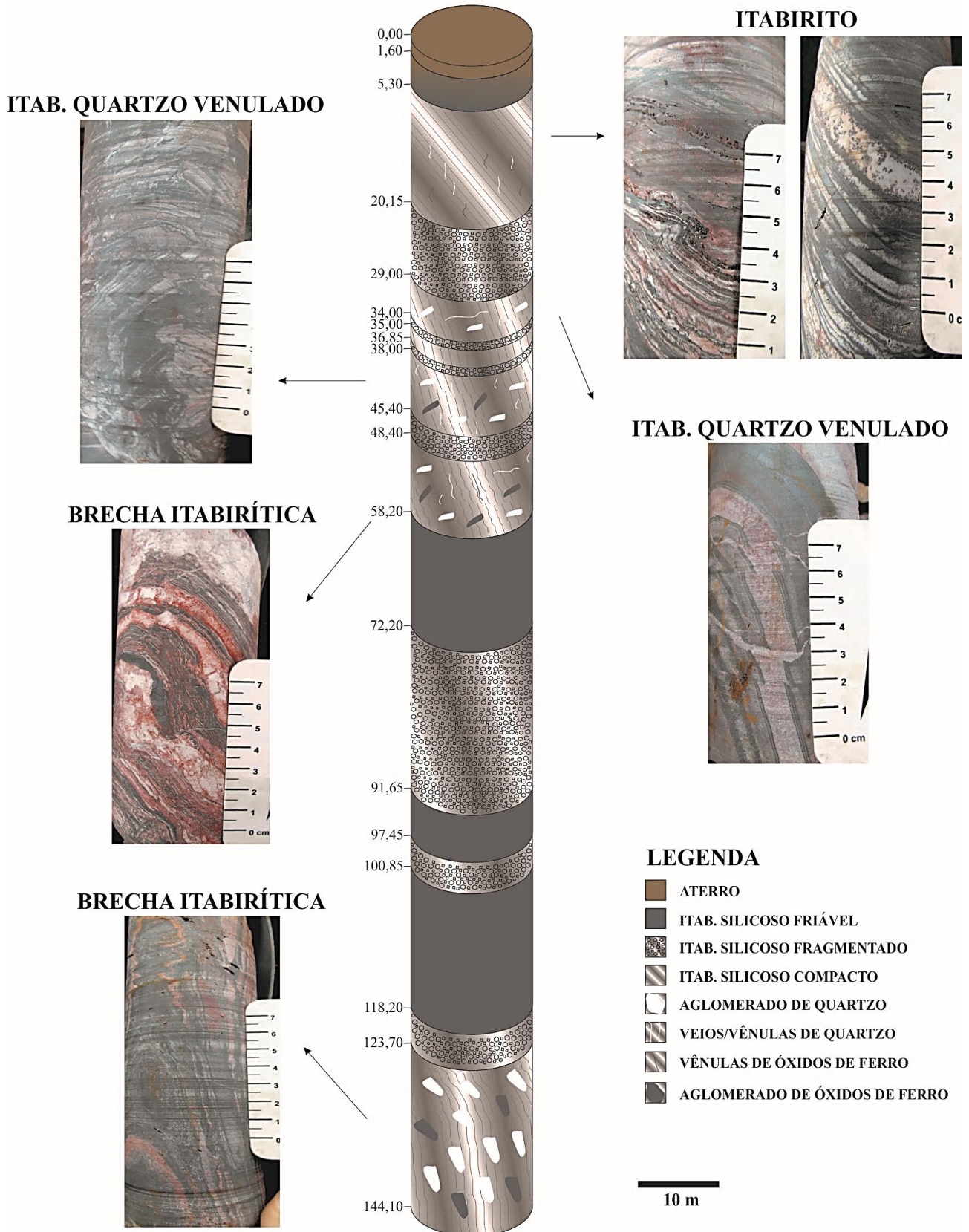


# ESQUEMA DO FURO FD021



**Figura 4.4:** Exemplos de itabirito, itabirito quartzo venulado, brecha itabirítica, e minério de ferro quartzo venulado e maciço no esquema do furo de sondagem FD021. Itab. = itabirito.

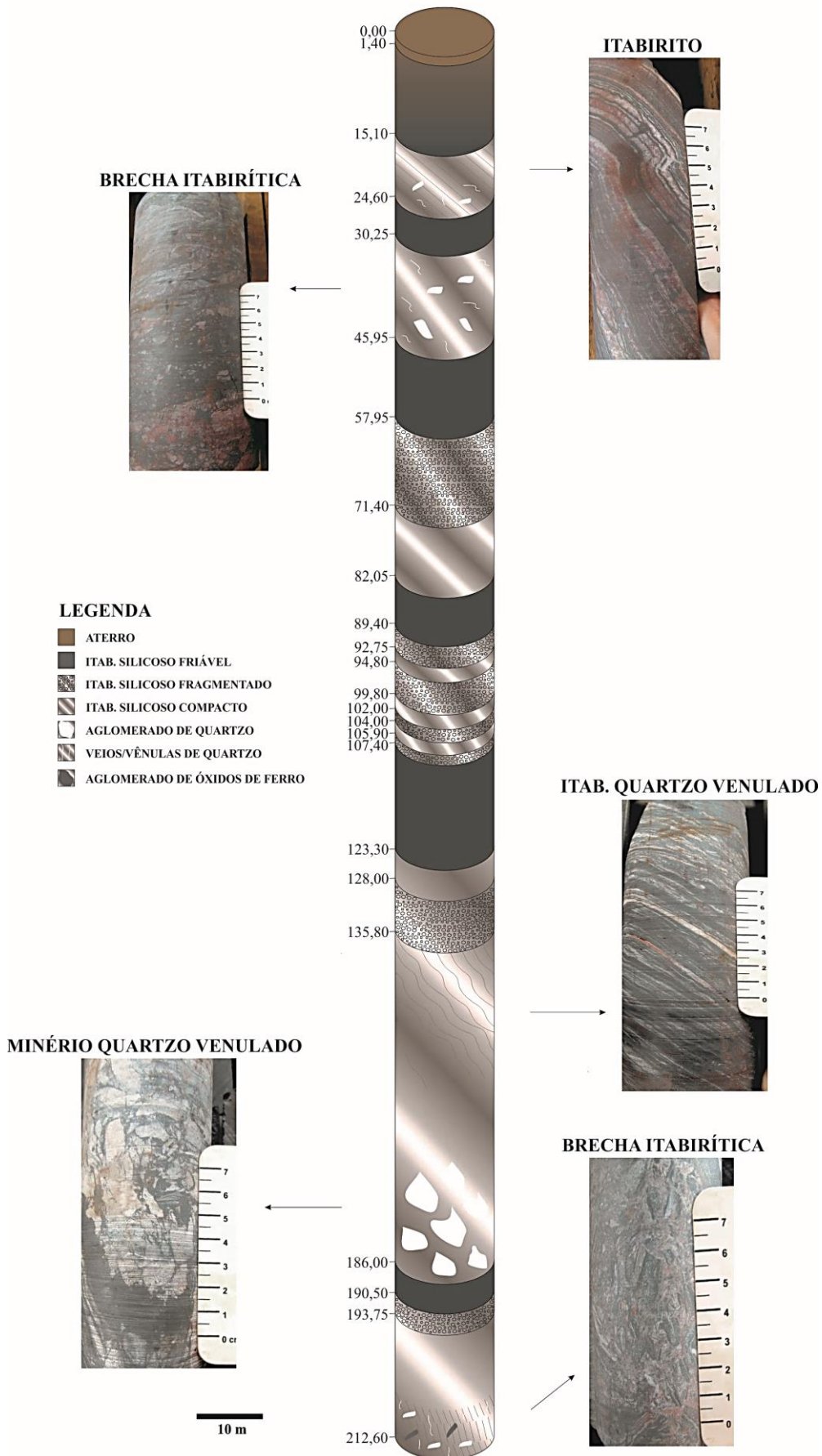
# ESQUEMA DO FURO FD028



**Figura 4.5:** Exemplos de itabirito, itabirito quartzo venulado e brecha itabirítica no esquema do furo de sondagem FD028. Itab. = itabirito.



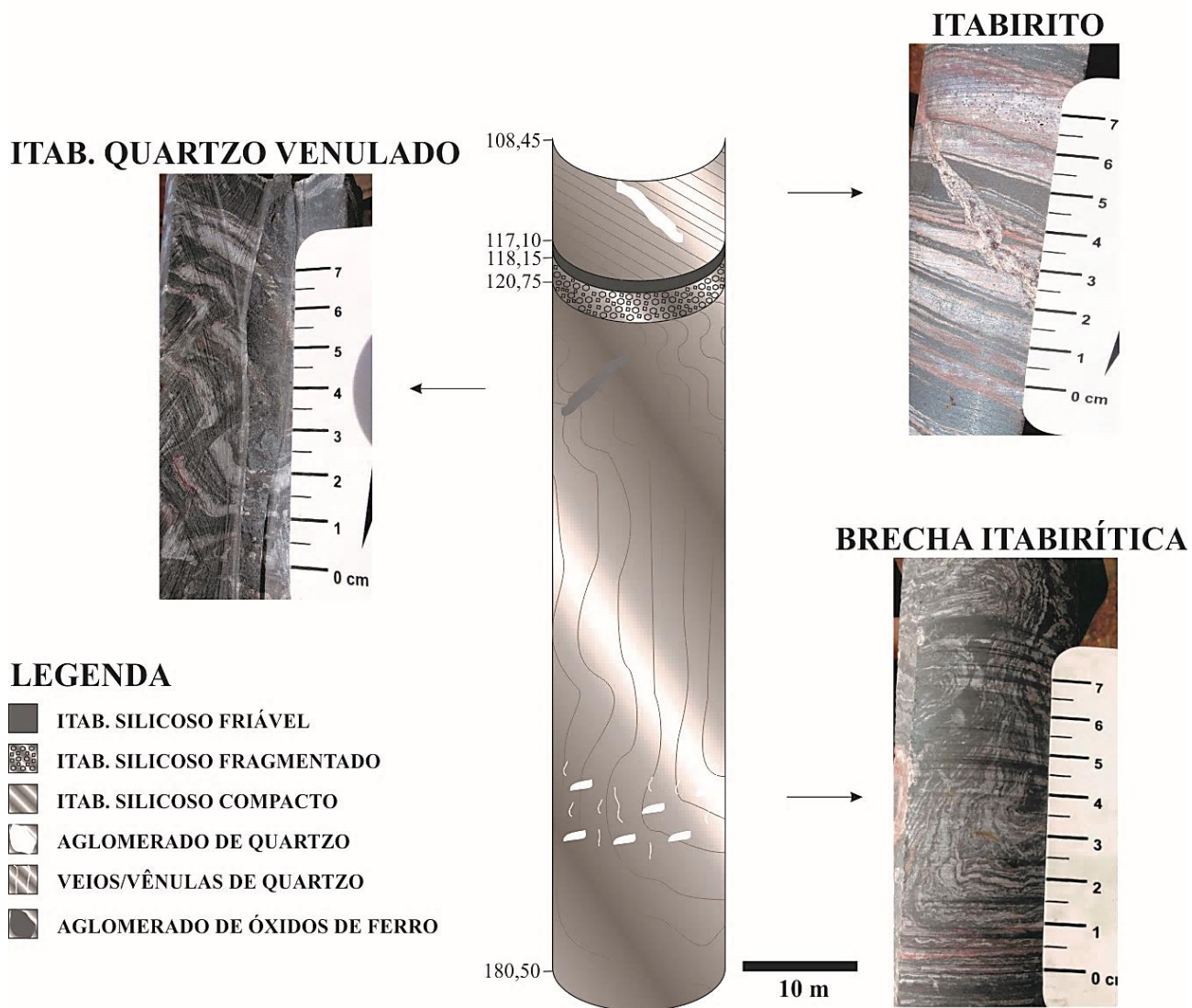
## ESQUEMA DO FURO FD029



**Figura 4.6:** Exemplos de itabirito, itabirito quartzo venulado, brecha itabirítica e minério de ferro quartzo venulado no esquema do furo de sondagem FD029. Itab. = itabirito.



# ESQUEMA DO FURO FD055



**Figura 4.7:** Exemplos de itabirito, itabirito quartzo venulado e brecha itabirítica no esquema do furo de sondagem FD055.

Itab. = itabirito.



**Figura 4.8:** Cavidades com preenchimento na amostra 003 do furo de sondagem FD021. **a)** Cavidade com preenchimento de quartzo. **b)** Quartzo em pente.

#### **4.1.2. Brecha com sulfetos**

A brecha com sulfetos é identificada nos furos de sondagem FD048 e FD052. Apresenta sulfetos e aglomerados de óxidos de ferro junto com quartzo e carbonato, e veios e vênulas discordantes as demais estruturas (Figs. 4.9, 4.10). No furo FD048 encontra-se avermelhada. Onde possível medir, as camadas mergulham entre 40° a 90° para SW.

# ESQUEMA DO FURO FD048

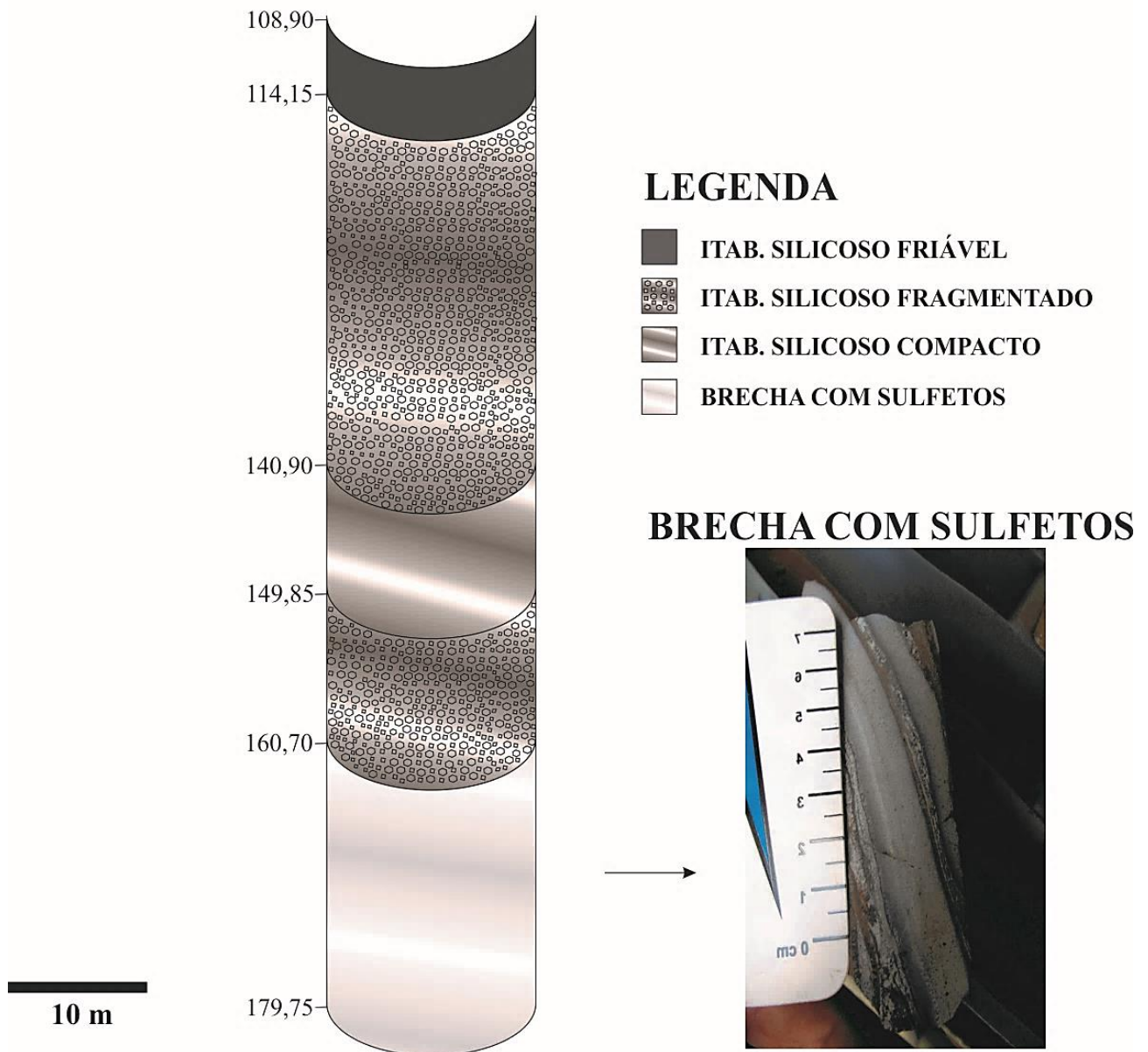
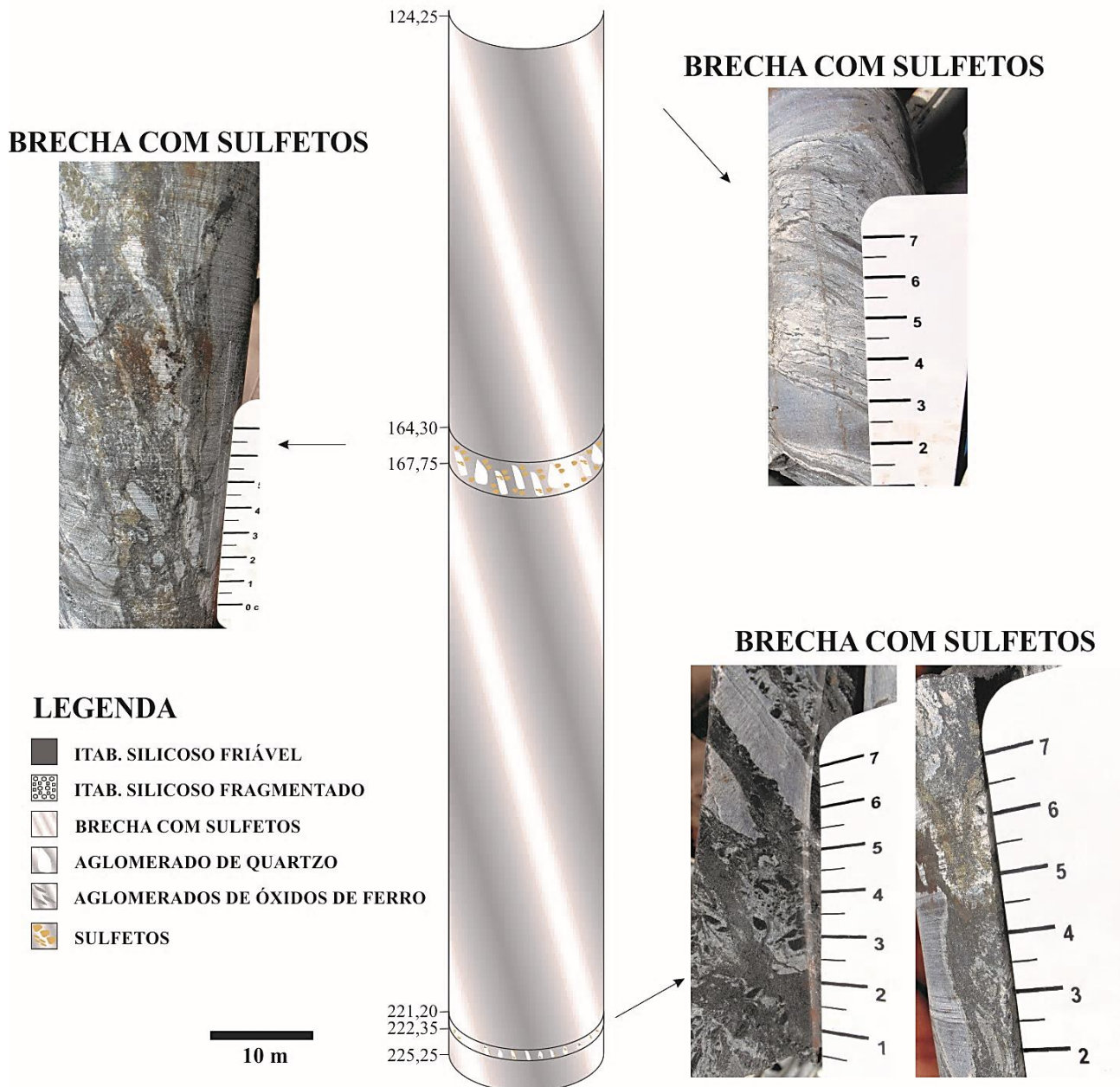


Figura 4.9: Exemplo da brecha com sulfetos no esquema do furo de sondagem FD048. Itab. = itabirito.



## ESQUEMA DO FURO FD052



**Figura 4.10:** Exemplos da brecha com sulfetos no esquema do furo de sondagem FD052. Itab. = itabirito.

### 4.2. ESTUDOS PETROGRÁFICOS DOS LITOTIPOS AMOSTRADOS

A Tabela 4.1 apresenta as siglas mais importantes utilizadas na dissertação incluindo litotipos e nome de minerais. O termo martita é utilizado neste estudo para se referir a hematita pseudomorfa de magnetita.

As microestruturas e texturas observadas em lâmina, e particulares de cada litotipo, estão resumidas na Tabela 4.2 e Tabela 4.3, respectivamente. As descrições detalhadas das principais lâminas se encontram no Anexo E. Maiores informações também no artigo.

**Tabela 4.1:** Principais siglas utilizadas para litotipos e minerais.

<b>Siglas</b>	<b>Significado</b>
<b>Litotipos</b>	
IS	Itabirito silicoso
ISQV	Itabirito silicoso quartzo venulado
BI	Brecha itabirítica
MQV	Minério de ferro de alto teor quartzo venulado
MM	Minério de ferro de alto teor maciço
BS	Brecha com sulfetos
<b>Minerais</b>	
MagI	Magnetita do itabirito
MagII	Magnetita hidrotermal
Keno	Kenomagnetita
Mar	Martita
HemS	Hematita subédrica
HemA	Hematita anédrica
HemMI	Hematita microlamear
HemL	Hematita lamelar
Gt	Goethita
Py	Pirita
Cpy	Calcopirita
Qtz	Quartzo recristalizado
QtzV	Quartzo venular
Cb	Carbonato de granulação fina
CbM	Carbonato de granulação média
Gru	Grunerita
Chl	Clorita
Ms	Muscovita
Tur	Turmalina

**Tabela 4.2:** Principais características microestruturais das lâminas analisadas.

<b>Classificação</b>	<b>Furos de sondagem</b>	<b>Lâminas</b>	<b>Microestruturas</b>
Itabirito silicoso (IS)	FD021	001 e 002	Alternância de bandas e menor quantidade de microdobras, microfalhas, vênulas e aglomerados que os demais litotipos.
	FD028	001, 002 e 007	
	FD029	001	
Itabirito silicoso quartzo venulado (ISQV)	FD055	001	Bandas espessas e textura brechada.
	FD028	003 e 005	
	FD029	002, 005 e 006	
Brecha itabirítica (BI)	FD055	002 e 003	Textura brechada com clastos de itabirito.
	FD021	003, 005 e 008	
	FD028	004 e 008	
Minério de ferro de alto teor quartzo venulado (MQV)	FD029	003 e 011	Textura brechada com clastos de minério e maior quantidade de aglomerados de quartzo que os demais litotipos.
	FD055	004	
	FD021	009 e 010	
Minério de ferro de alto teor maciço (MM)	FD029	009	Textura homogênea e menor quantidade de vênulas e aglomerados de quartzo que os demais litotipos.
	FD021	006	
Brecha com sulfetos (BS)	FD048	001	Textura brechada e veios com sulfetos e óxidos ferro.
	FD052	001, 003, 005, 006 e 007	



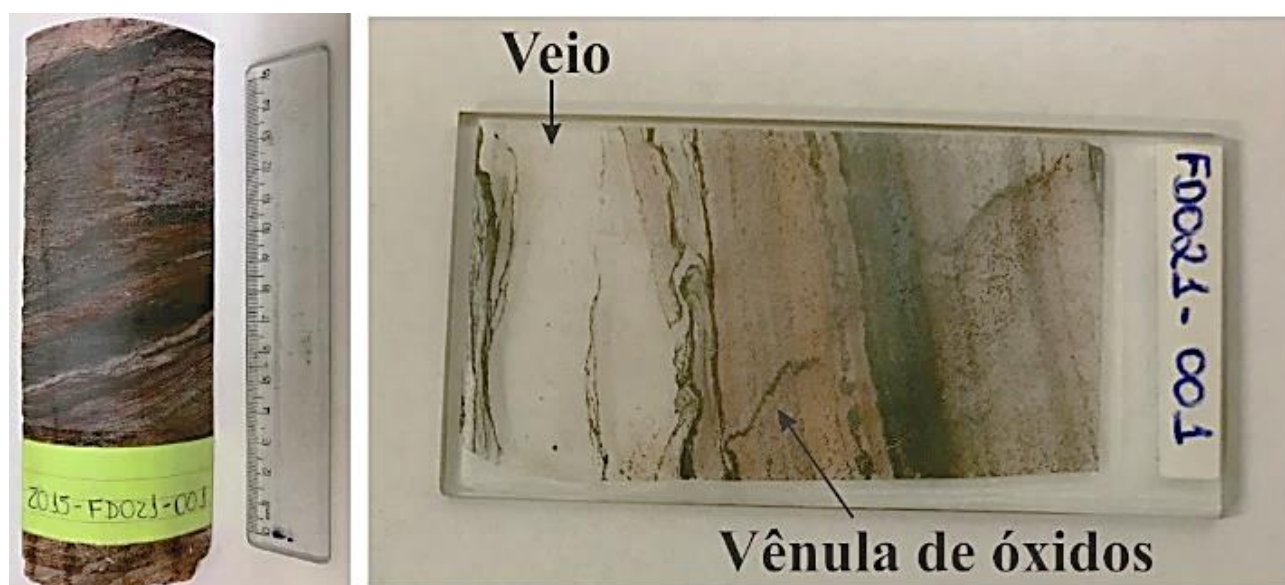
**Tabela 4.3:** Principais texturas observadas em cada litotipo estudado.

<b>Classificação</b>	<b>Furos de sondagem</b>	<b>Lâminas</b>	<b>Texturas</b>
Itabirito silicoso (IS)	FD021	001 e 002	- Contato interlobado na HemA; - Textura de substituição de óxidos de ferro.
	FD028	001, 002 e 007	
	FD029	001	
	FD055	001	
Itabirito silicoso quartzo venulado (ISQV)	FD028	003 e 005	- Contato interlobado na HemA; - Vênulas de QtzV com textura em pente.
	FD029	002, 005 e 006	
	FD055	002 e 003	
	FD021	003, 005 e 008	
Brecha itabirítica (BI)	FD028	004 e 008	- Contato interlobado na HemA; - Textura substituição de óxidos de ferro.
	FD029	003 e 011	
	FD055	004	
	FD021	009 e 010	
Minério de ferro de alto teor quartzo venulado (MQV)	FD029	009	- Contato interlobado na HemA.
	FD021	006	- Contato interlobado na HemA; - Textura substituição de óxidos de ferro.
Brecha com sulfetos (BS)	FD048	001	- Contato interlobado na HemA; - Textura substituição óxidos de ferro; e de Py, Cpy e HemA a partir MagII; - Qtz e Gru com textura radial.

Os itens que seguem apresentam maiores informações de microestruturas e mineralogia de cada litotipo estudado. As texturas observadas estão descritas no artigo.

#### 4.2.1. Itabirito silicoso (IS)

O itabirito silicoso apresenta alternância de bandas de quartzo e de óxidos de ferro, com 1 a 2 cm, e menor quantidade de microdobras (Fig. 4.11), microfalhas, veios, vênulas e aglomerados que os demais litotipos. Veios e vênulas são concordantes ou discordantes ao bandamento, sendo veios e aglomerados compostos por quartzo, e vênulas de quartzo ou de óxidos de ferro (Fig. 4.11).





**Figura 4.11:** Amostras e lâminas de itabirito silicoso (IS) com microdobras; veio e vênulas de quartzo; e vênula de óxidos de ferro.

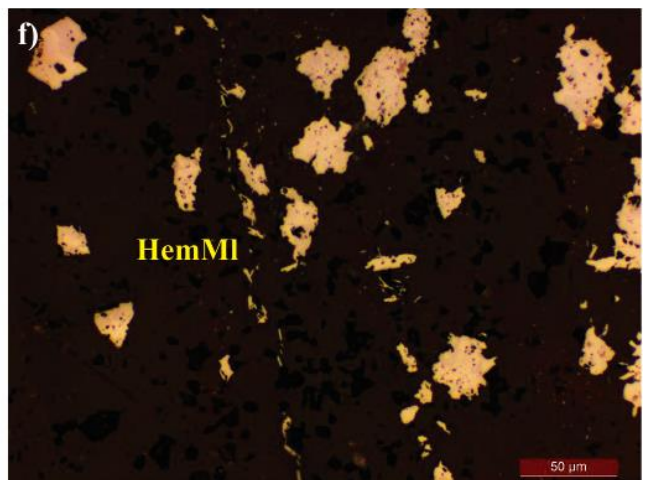
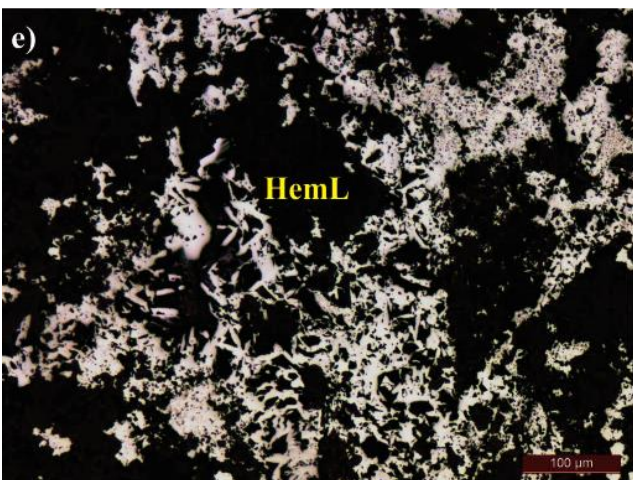
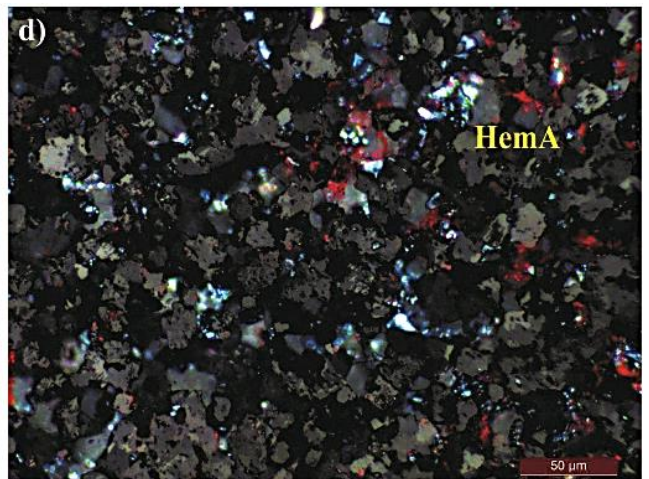
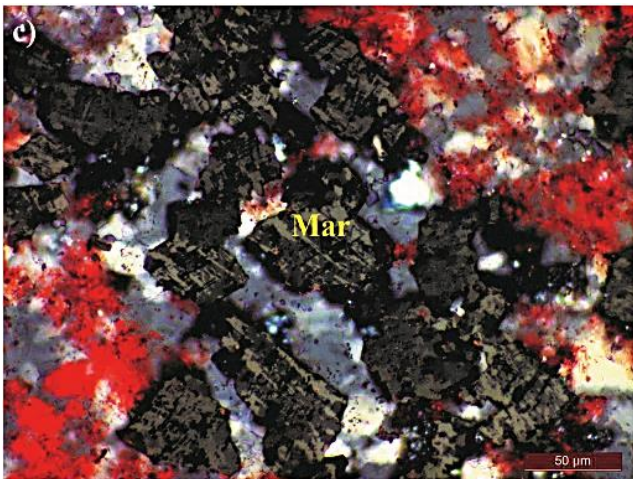
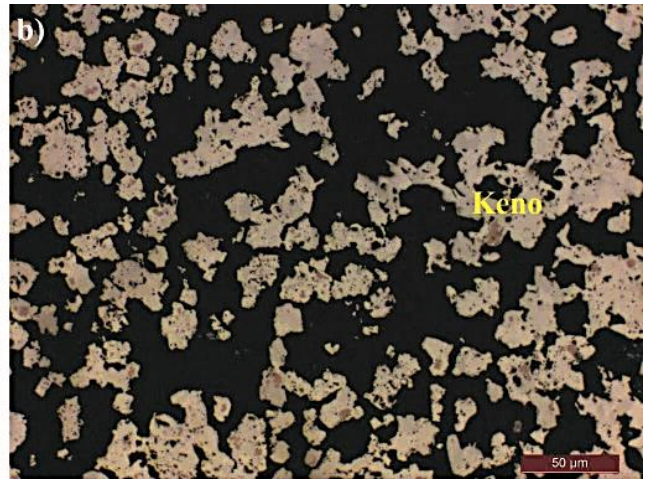
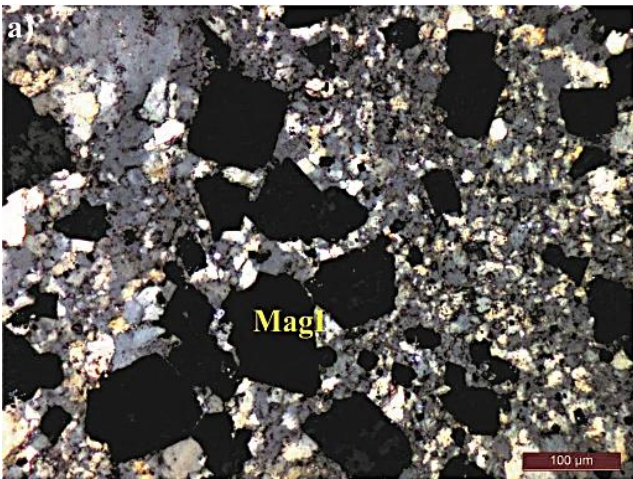
A paragênese mineralógica do itabirito silicoso, e suas principais características, estão descritas e exemplificadas na Tabela 4.4 e na Figura 4.12, respectivamente. O significado das siglas utilizadas para os minerais encontra-se na Tabela 4.1. O itabirito silicoso é caracterizado pela maior quantidade de martita, kenomagnetita e quartzo recristalizado do que os demais litotipos. Apresenta magnetita do itabirito (MagI), resultante da recristalização do itabirito silicoso.

**Tabela 4.4:** Principais características dos minerais no itabirito silicoso.

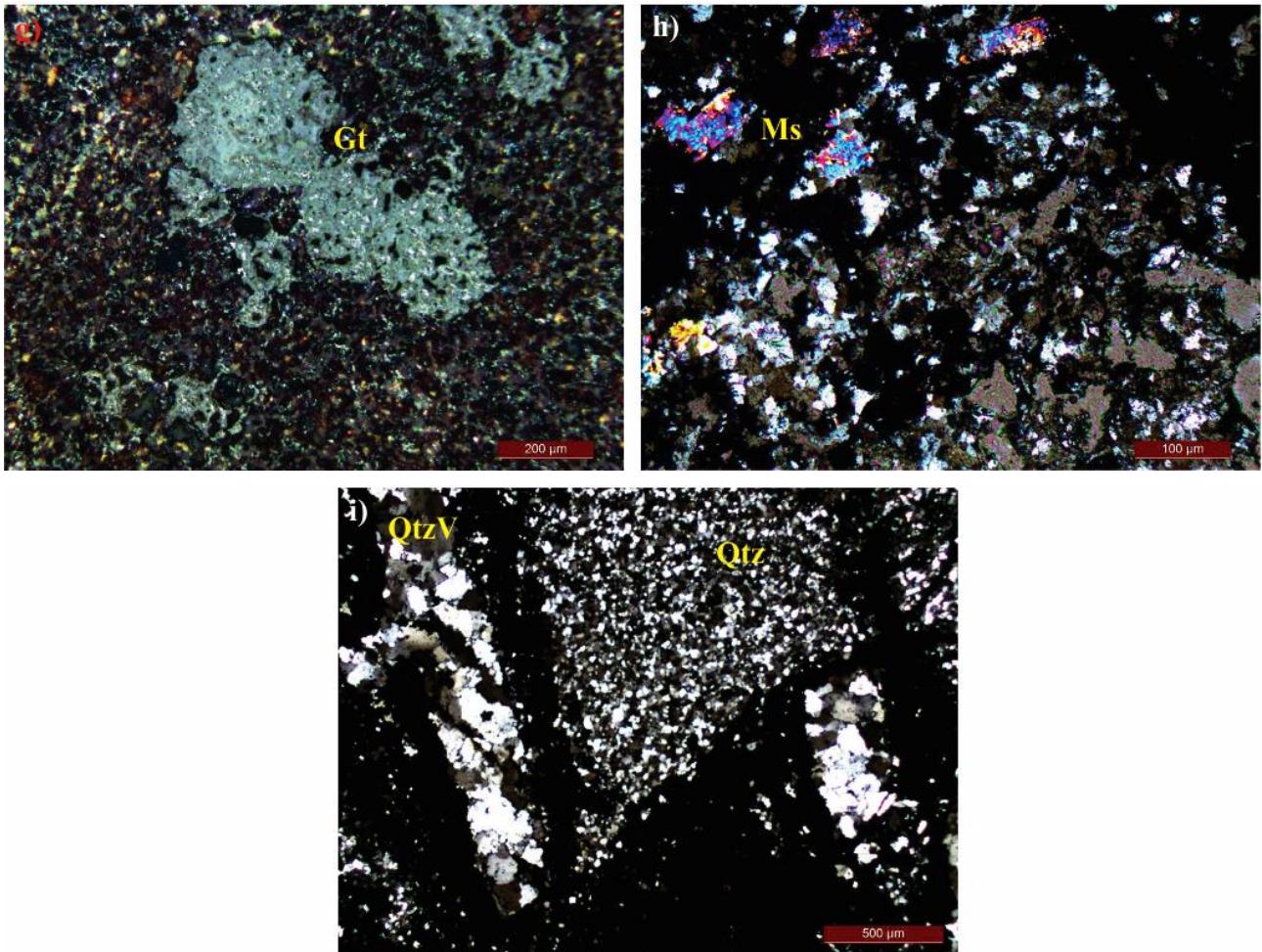
Minerais	Forma	Bordas	Granulação*	Observações
<b>Opacos</b>	MagI	subédrica	regulares	fina a média - menor quantidade que os demais litotipos; - Figura 4.12a.
	Keno	anédrica	irregulares	muito fina - quantidade intermediária que ISQV e BI; - Figura 4.12b.
	Mar	euédrica a subédrica	regulares	fina - maior quantidade que ISQV e BI; - Figura 4.12c.
	HemA	anédrica	irregulares	muito fina a fina - menor quantidade que ISQV e BI; - Figura 4.12d.
	HemL	euédrica tabular a subédrica	regulares	muito fina - maior quantidade que ISQV e BI; - Figura 4.12e.
	HemMI	euédrica tabular a subédrica	regulares	muito fina - menor quantidade que ISQV e BI; - Figura 4.12f.
<b>Trans-parentes</b>	Gt	anédrica	irregulares	média - menor profundidade; -Figura 4.12g.
	Qtz	anédrica	irregulares	muito fina a fina - maior quantidade que ISQV e BI; - Figura 4.12i.
	QtzV	euédrica a subédrica	regulares a irregulares	fina a média - menor quantidade que ISQV e BI; - Figura 4.12i.
	Ms	euédrica	regulares a irregulares	muito fina - maior quantidade que ISQV e BI; - Figura 4.12h.

\*Granulação de acordo com escala de Wentworth (granulação muito fina:  $\emptyset < 0,004$  mm; granulação fina:  $0,004 < \emptyset < 0,064$  mm; e granulação média:  $0,064 < \emptyset < 2$  mm).





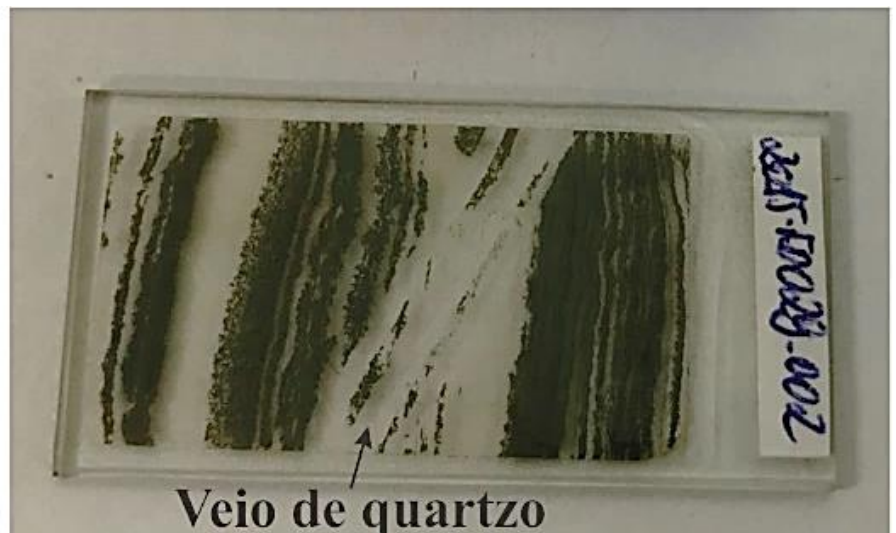
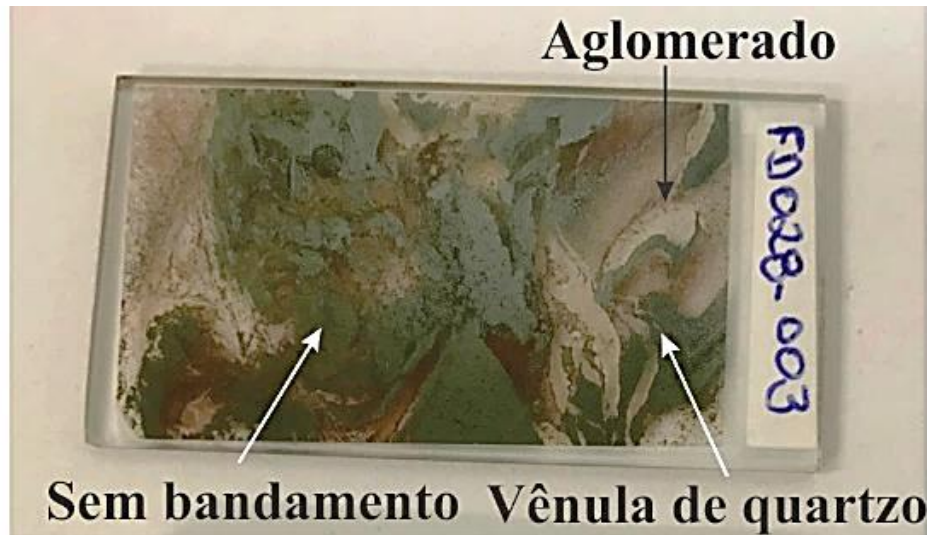




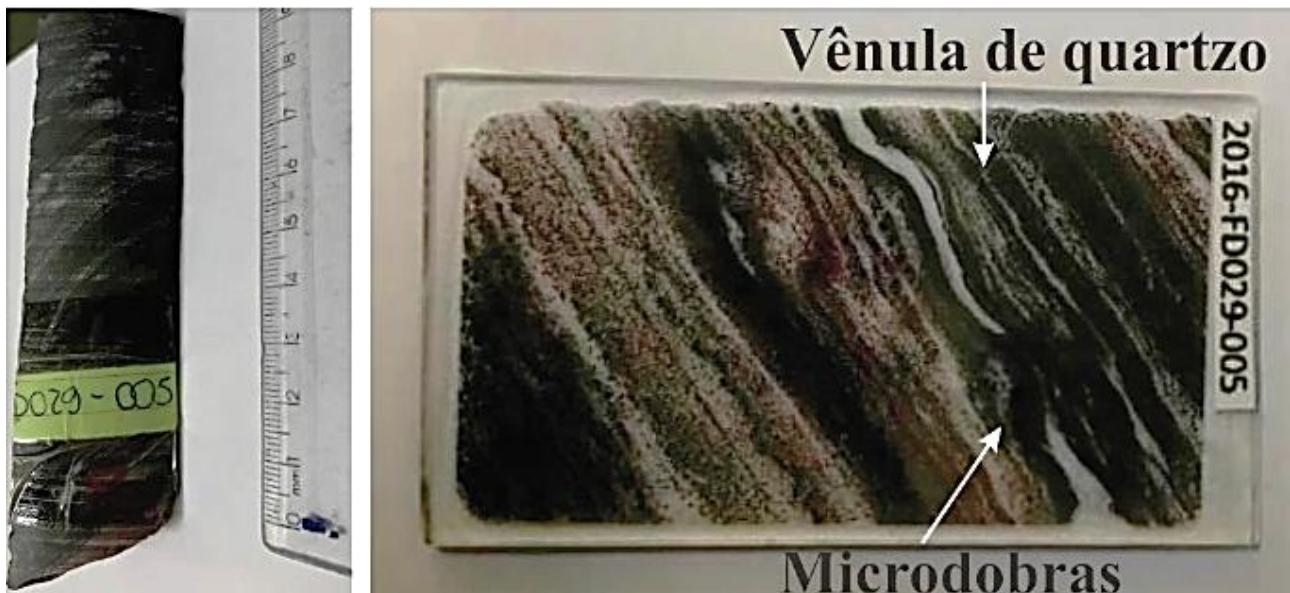
**Figura 4.12:** Minerais do itabirito silicoso. **a)** Magnetita do itabirito (MagI). **b)** Kenomagnetita (Keno) com relicto no interior de martita. **c)** Martita (Mar). **d)** Hematita anédrica (HemA). **e)** Hematita lamelar (HemL). **f)** Hematita microlamelar (HemMI). **g)** Goethita (Gt). **h)** Muscovita (Ms). **i)** Quartzo recristalizado (Qtz) e venular (QtzV). Luz refletida, nicóis descruzados: **b**, **e** e **f**; luz refletida, nicóis cruzados: **a**, **c**, **d** e **g**; luz transmitida, nicóis cruzados: **h** e **i**.

#### 4.2.2. Itabirito silicoso quartzo venulado (ISQV)

No itabirito silicoso quartzo venulado as bandas são espessas (4 a 5 cm) e possuem microdobras, microfalhas, veios, vênulas e aglomerados com a mesma composição do itabirito silicoso (Fig. 4.13). Há áreas sem bandamento, com textura brechada (Fig. 4.13).







**Figura 4.13:** Amostras e lâminas de itabirito silicoso quartzo venulado (ISQV) com microdobras; microfalha; vênula, veio e aglomerado de quartzo; e áreas sem bandamento.

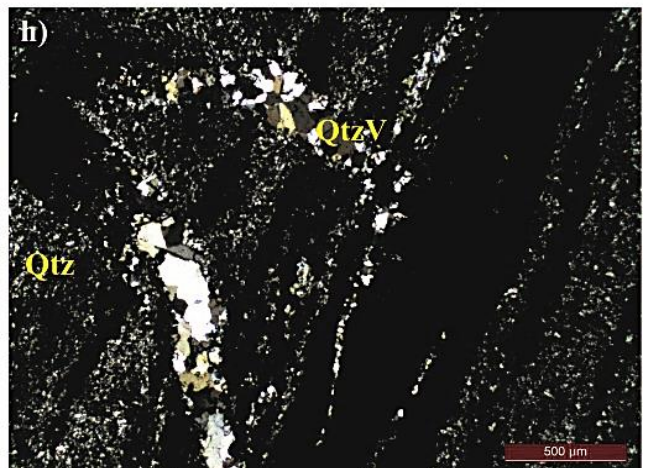
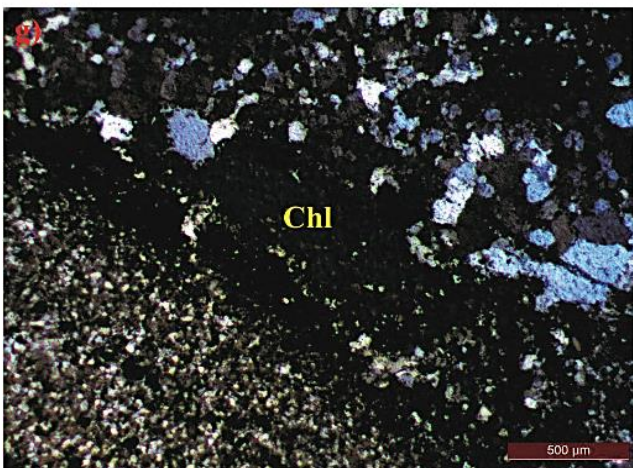
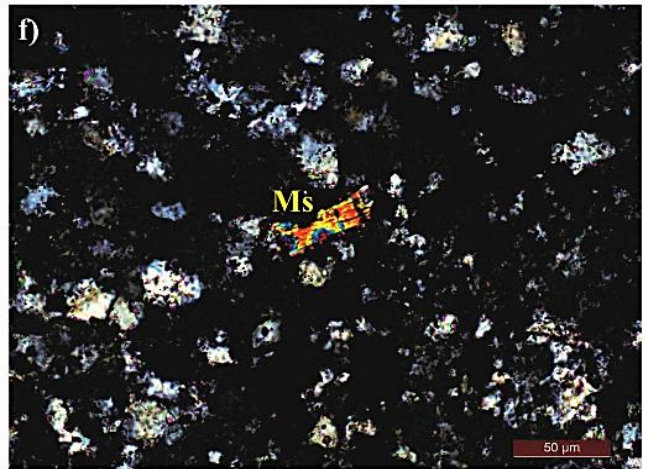
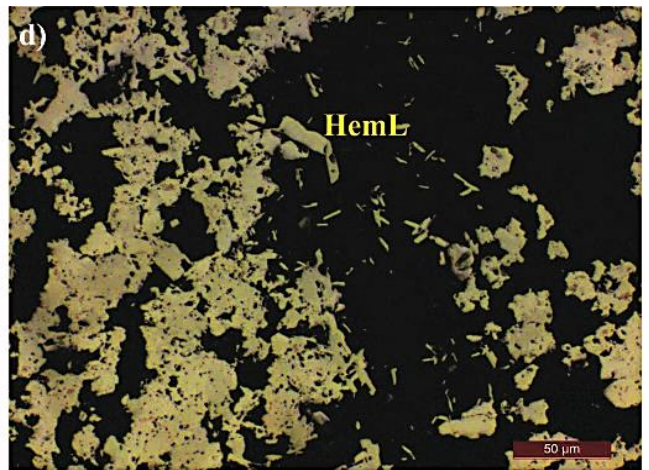
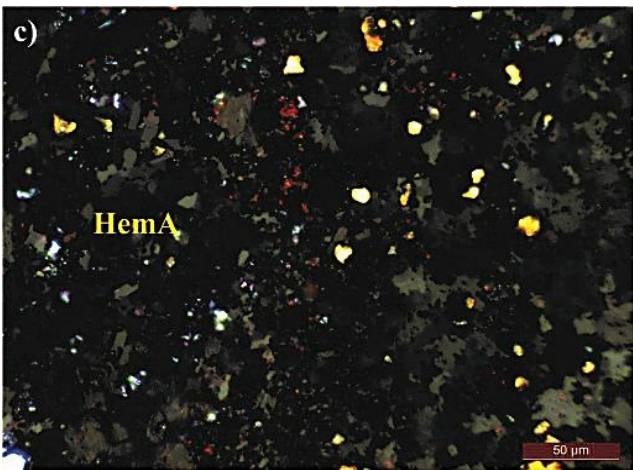
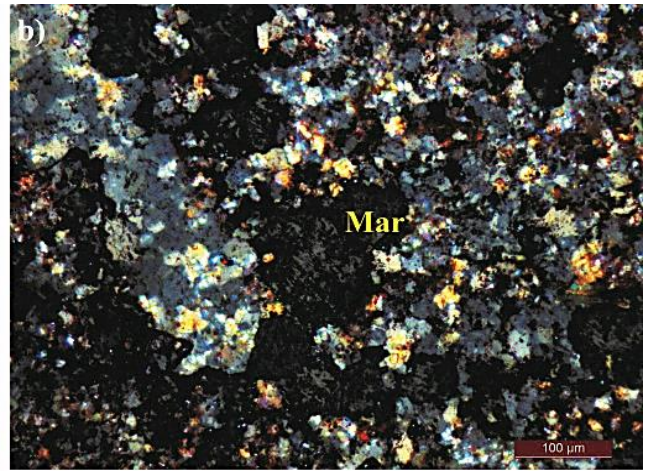
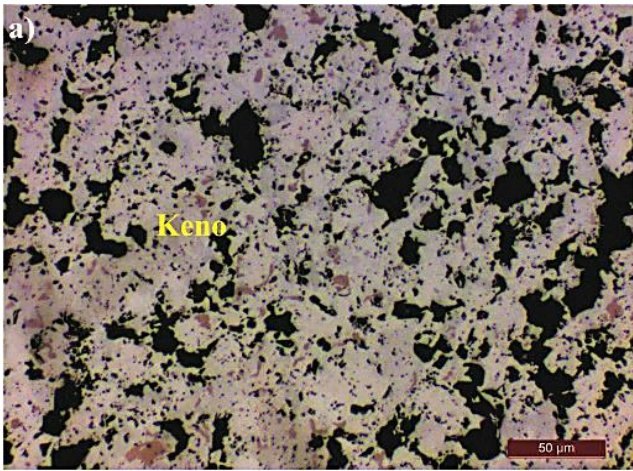
A paragênese mineralógica do itabirito silicoso quartzo venulado está descrita e exemplificada na Tabela 4.5 e na Figura 4.14, respectivamente. Para as siglas dos minerais vide Tabela 4.1. O furo de sondagem FD021 não apresenta este litotipo. O itabirito silicoso quartzo venulado possui quantidade similar de martita, kenomagnetita e hematita anédrica que o itabirito silicoso.

**Tabela 4.5:** Principais características no itabirito silicoso quartzo venulado.

Minerais	Forma	Bordas	Granulação*	Observações	
<b>Opacos</b>	Keno	anédrica	irregulares	muito fina	- maior quantidade que IS e BI; - Figura 4.14a.
	Mar	euédrica a subédrica	regulares	fina	- menor quantidade que IS e BI; - Figura 4.14b.
	HemA	anédrica	irregulares	muito fina a fina	- quantidade intermediária que IS e BI; - Figura 4.14c.
	HemL	euédrica tabular a subédrica	regulares	muito fina	- menor quantidade que IS e BI; - Figura 4.14d.
	HemMI	euédrica tabular a subédrica	regulares	muito fina	- quantidade intermediária que IS e BI; - Figura 4.14e.
<b>Trans-parentes</b>	Qtz	anédrica	irregulares	muito fina a fina	- menor quantidade que IS e BI; - Figura 4.14h.
	QtzV	euédrica a subédrica	regulares a irregulares	fina a média	- quantidade intermediária que IS e BI; - Figura 4.14h.
	Ms	euédrica	regulares a irregulares	muito fina	- quantidade intermediária que IS e BI; - Figura 4.14f.
	Gru	euédrica	regulares a irregulares	muito fina	- menor quantidade que IS e BI;
	Chl	subédrica a anédrica	irregulares	fina	- menor quantidade que os demais litotipos; - Figura 4.14g.

\*Granulação de acordo com escala de Wentworth (granulação muito fina:  $\emptyset < 0,004$  mm; granulação fina:  $0,004 < \emptyset < 0,064$  mm; e granulação média:  $0,064 < \emptyset < 2$  mm).



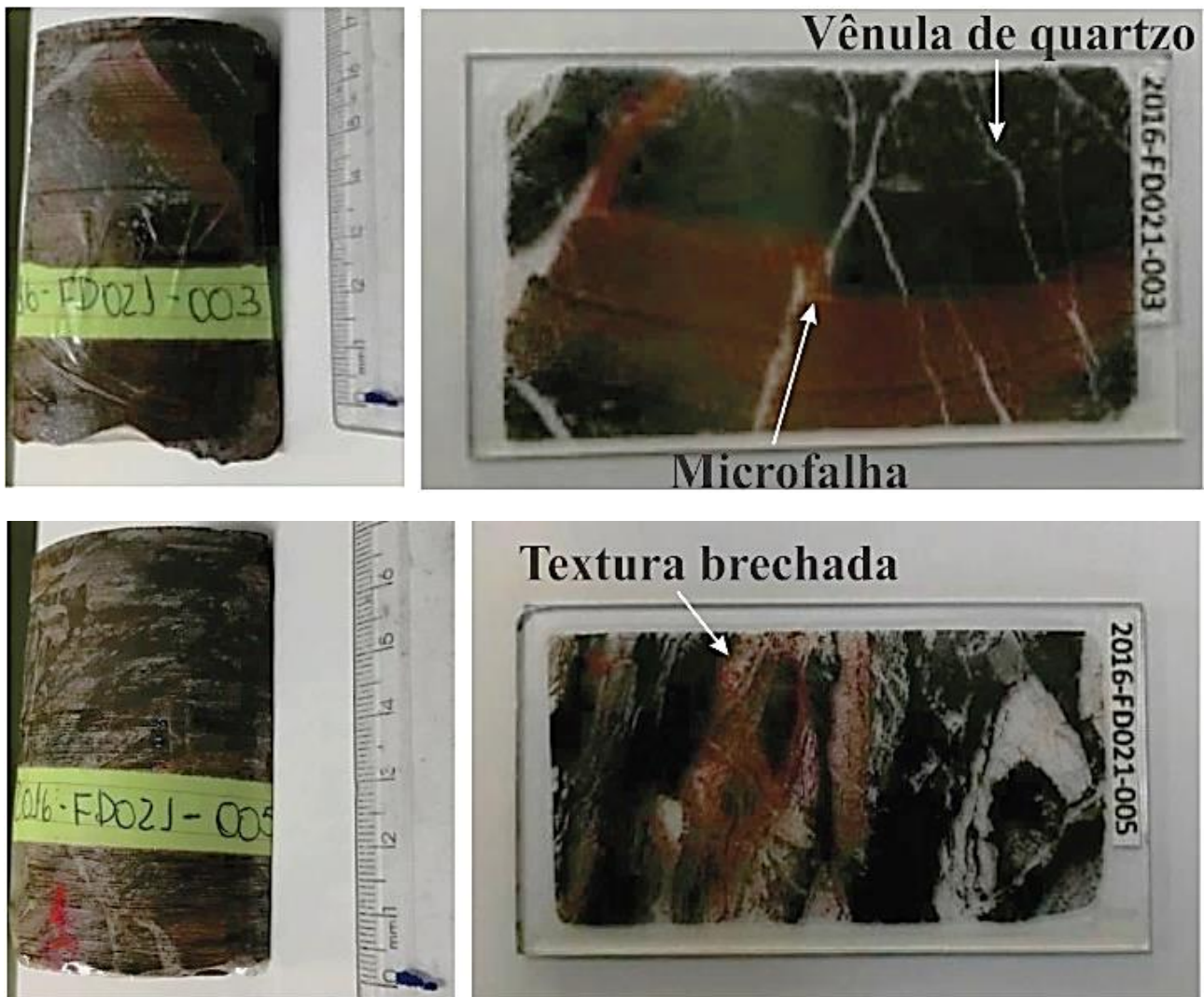




**Figura 4.14:** Minerais no itabirito silicoso quartzo venulado. **a)** Kenomagnetita (Keno) como relicto no interior de martita. **b)** Martita (Mar). **c)** Hematita anédrica (HemA). **d)** Hematita lamelar (HemL). **e)** Hematita microlamelar (HemMI). **f)** Muscovita (Ms). **g)** Clorita (Chl). **h)** Quartzo recristalizado (Qtz) e venular (QtzV). Luz refletida, nicóis descruzados: **a, d e e;** luz refletida, nicóis cruzados: **b e c;** luz transmitida, nícois cruzados: **f, g e h.**

#### 4.2.3. Brecha itabirítica (BI)

A brecha itabirítica possui áreas sem bandamento (Fig. 4.15). Há ainda bandas espessas (4 a 5 cm) caracterizadas pela alternância de quartzo e óxidos de ferro, e todas as microestruturas encontradas no itabirito silicoso e silicoso quartzo venulado (Fig. 4.15).





**Figura 4.15:** Amostras e lâminas de brecha itabirítica (BI) com microdobradas; microfalha; veio e vênulas de quartzo; vênulas de óxidos de ferro; e áreas sem bandamento.

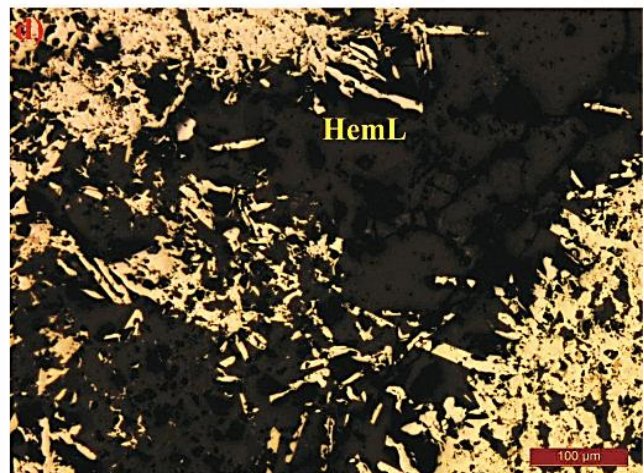
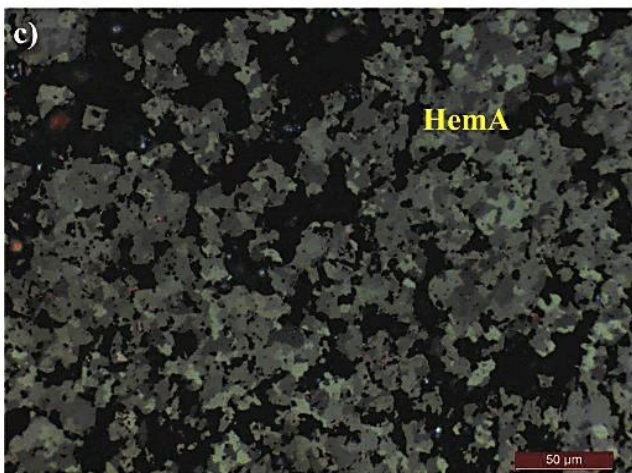
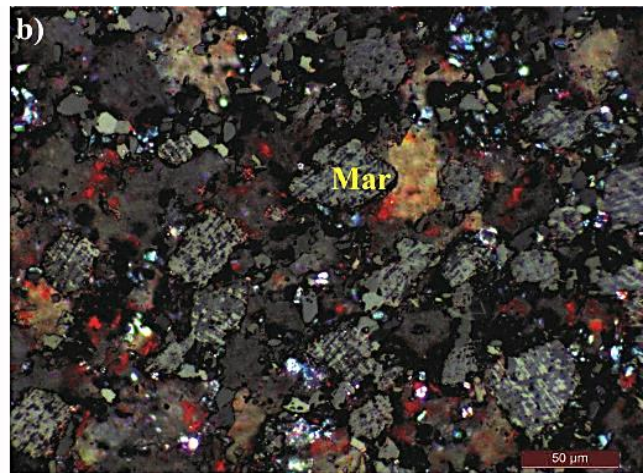
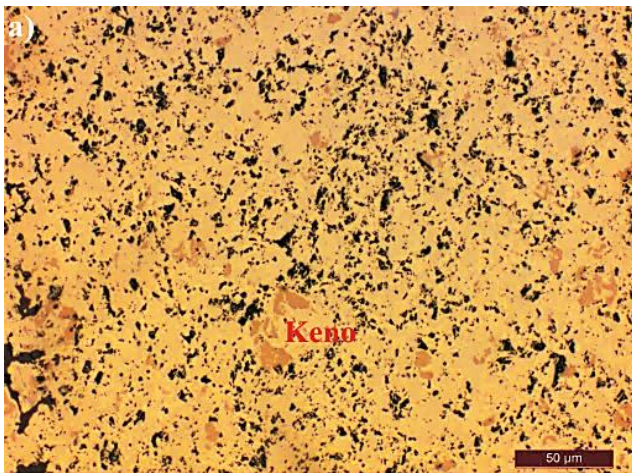
A paragênese mineralógica da brecha itabirítica está na Tabela 4.6 e na Figura 4.16. Significado das siglas na Tabela 4.1. A brecha itabirítica tem maior quantidade de hematita anédrica e microlamelar que o itabirito silicoso e o itabirito silicoso quartzo venulado.



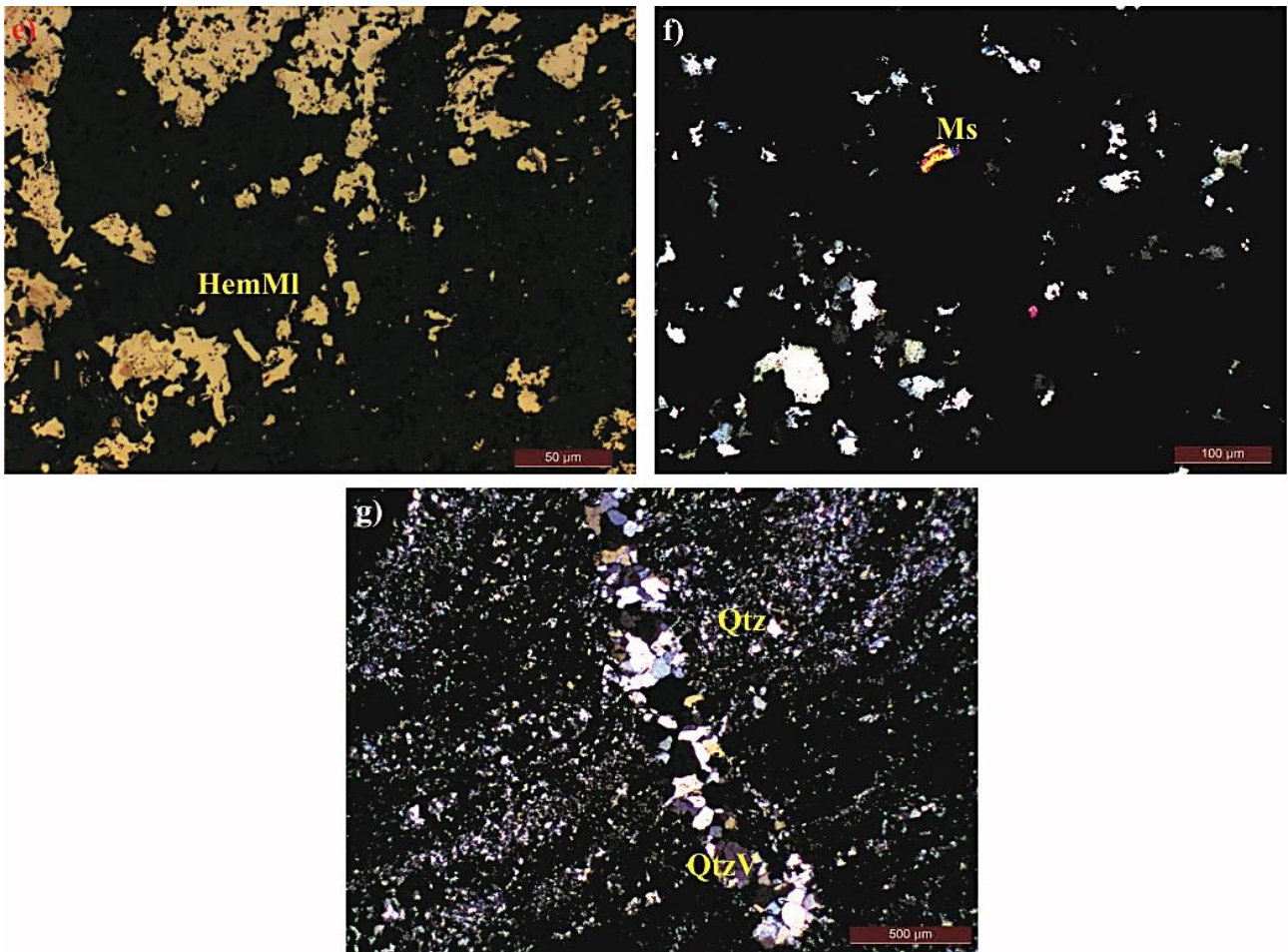
**Tabela 4.6:** Principais características dos minerais na brecha itabirítica.

Minerais	Forma	Bordas	Granulação*	Observações	
<b>Opacos</b>	Keno	anédrica	irregulares	muito fina	- menor quantidade que IS e ISQV; - Figura 4.16a.
	Mar	euédrica a subédrica	regulares	fina	- quantidade intermediária que IS e ISQV; - Figura 4.16b.
	HemA	anédrica	irregulares	muito fina a fina	- maior quantidade que IS e ISQV; - Figura 4.16c.
	HemL	euédrica tabular a subédrica	regulares	muito fina	- quantidade intermediária que IS e ISQV; - Figura 4.16d.
	HemMI	euédrica tabular a subédrica	regulares	muito fina	- maior quantidade que IS e ISQV; - Figura 4.16e.
<b>Trans-parentes</b>	Qtz	anédrica	irregulares	muito fina a fina	- quantidade intermediária que IS e ISQV; - Figura 4.16g.
	QtzV	euédrica a subédrica	regulares a irregulares	fina a média	- maior quantidade que IS e ISQV; - Figura 4.16g.
	Ms	euédrica	regulares a irregulares	muito fina	- menor quantidade que IS e ISQV; - Figura 4.16f.

\*Granulação de acordo com escala de Wentworth (granulação muito fina:  $\emptyset < 0,004$  mm; granulação fina:  $0,004 < \emptyset < 0,064$  mm; e granulação média:  $0,064 < \emptyset < 2$  mm).







**Figura 4.16:** Minerais na brecha itabirítica. **a)** Kenomagnetita (Keno) com relicto no interior de martita. **b)** Martita (Mar). **c)** Hematita anédrica (HemA). **d)** Hematita lamelar (HemL). **e)** Hematita microlamelar (HemMI). **f)** Muscovita (Ms). **g)** Quartzo recristalizado (Qtz) e venular (QtzV). Luz refletida, nicóis descruzados: **a, d e e**; luz refletida, nicóis cruzados: **b e c**; luz transmitida, nicóis cruzados: **f e g**.

#### 4.2.4. Minério de ferro de alto teor quartzo venulado (MQV)

O minério de ferro quartzo venulado é brechado, com maior quantidade de veios, vênulas e aglomerados de quartzo que os itabiritos, brecha itabirítica, minério maciço e brecha com sulfetos (Fig. 4.17). Há microfalhas e vênulas de óxidos de ferro (Fig. 4.17).



**Figura 4.17:** Amostras e lâminas de minério de ferro quartzo venulado (MQV) com textura brechada; microfalha; veio, vênula e aglomerado de quartzo; e vênula de óxidos de ferro.

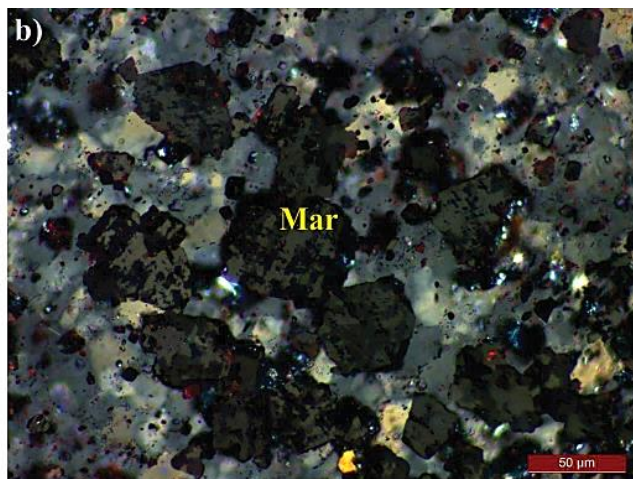
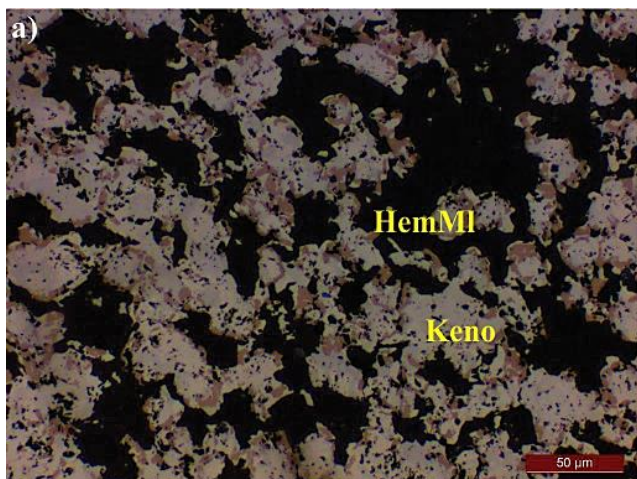


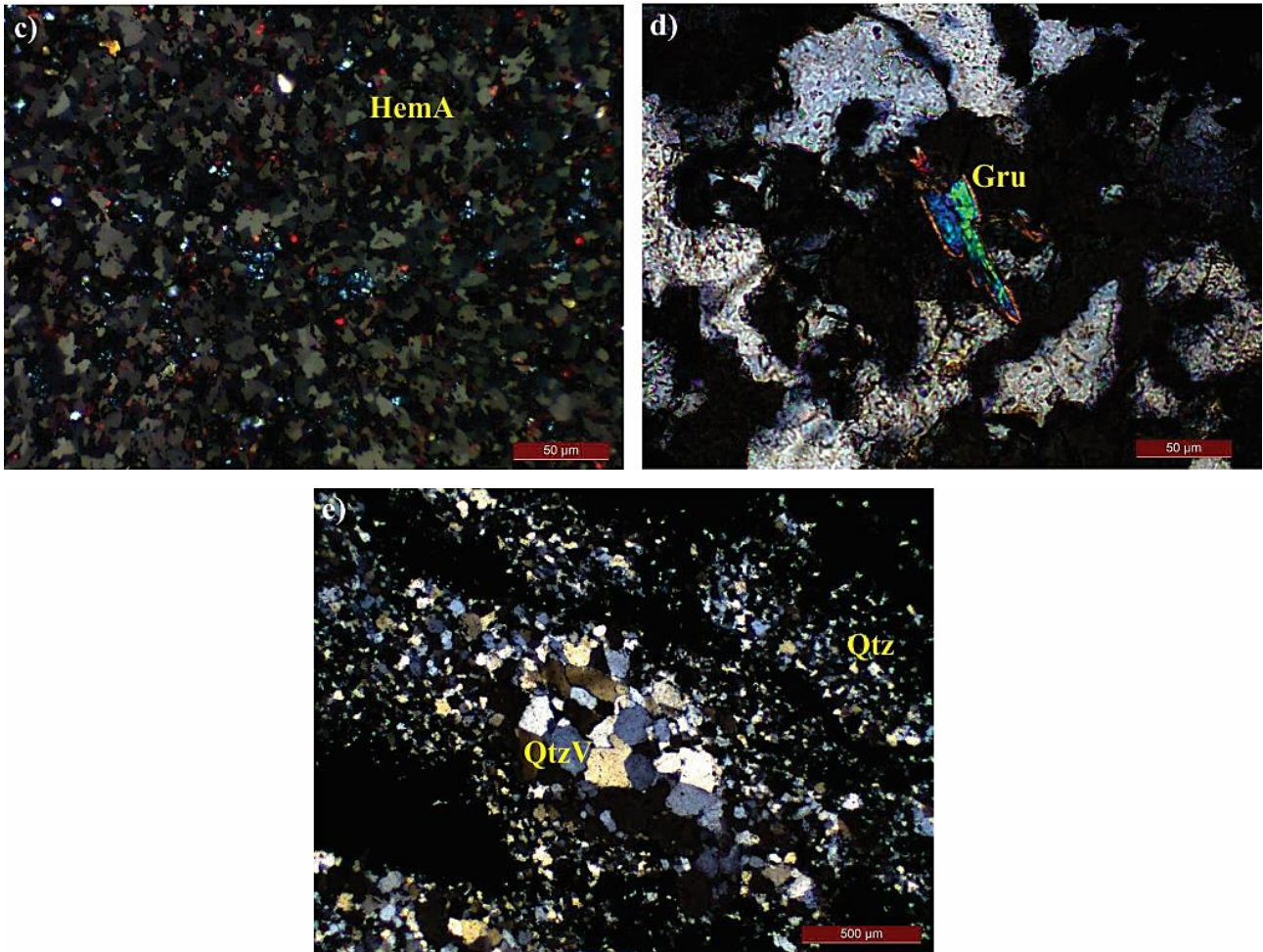
A Tabela 4.7 e Figura 4.18 mostram a paragênese mineralógica do minério quartzo venulado. Vide Tabela 4.1 para significado das siglas. O minério quartzo venulado possui quantidade similar de martita e hematita anédrica, e maior quantidade de quartzo venular que os demais litotipos.

**Tabela 4.7:** Principais características no minério de ferro de alto teor quartzo venulado.

Minerais	Forma	Bordas	Granulação*	Observações	
<b>Opacos</b>	Keno	anédrica	irregulares	muito fina	- maior quantidade que IS, ISQV e BI devido minério quartzo venulado martítico; - Figura 4.18a.
	Mar	euédrica a subédrica	regulares	finas	- menor quantidade que IS, ISQV e BI, mas alta devido ao minério quartzo venulado martítico; - Figura 4.18b.
	HemA	anédrica	irregulares	muito fina a fina	- maior quantidade que IS e menor que ISQV e BHS; - Figura 4.18c.
	HemMI	euédrica tabular a subédrica	regulares	muito fina	- menor quantidade que IS, ISQV e BI; - Figura 4.18a.
<b>Trans-parentes</b>	Qtz	anédrica	irregulares	muito fina a fina	- menor quantidade que IS, ISQV e BI; - Figura 4.18e.
	QtzV	euédrica a subédrica	regulares a irregulares	finas a média	- maior quantidade que IS e ISQV e menor que BHS; - Figura 4.18e.
	Gru	euédrica	regulares a irregulares	muito fina	- maior quantidade que ISQV; - Figura 4.18d.

\*Granulação de acordo com escala de Wentworth (granulação muito fina:  $\varnothing < 0,004$  mm; granulação fina:  $0,004 < \varnothing < 0,064$  mm; e granulação média:  $0,064 < \varnothing < 2$  mm).





**Figura 4.18:** Minerais no minério de ferro de alto teor quartzo venulado. **a)** Kenomagnetita (Keno) como relicto no interior de martita, e hematita microlamelar (HemMI). **b)** Martita (Mar). **c)** Hematita anédrica (HemA). **d)** Grunerita (Gru). **e)** Quartzo recristalizado (Qtz) e venular (QtzV). Luz refletida, nicóis descruzados: **a**; luz refletida, nicóis cruzados: **b** e **c**; luz transmitida, nicóis cruzados: **d** e **e**.

#### 4.2.5. Minério de ferro de alto teor maciço (MM)

O minério de ferro maciço apresenta textura homogênea e menor quantidade de vênulas e aglomerados de quartzo que os demais litotipos (Fig. 4.19).





**Figura 4.19:** Amostra e lâmina de minério de ferro maciço (MM) com textura homogênea; vênula e aglomerados de quartzo.

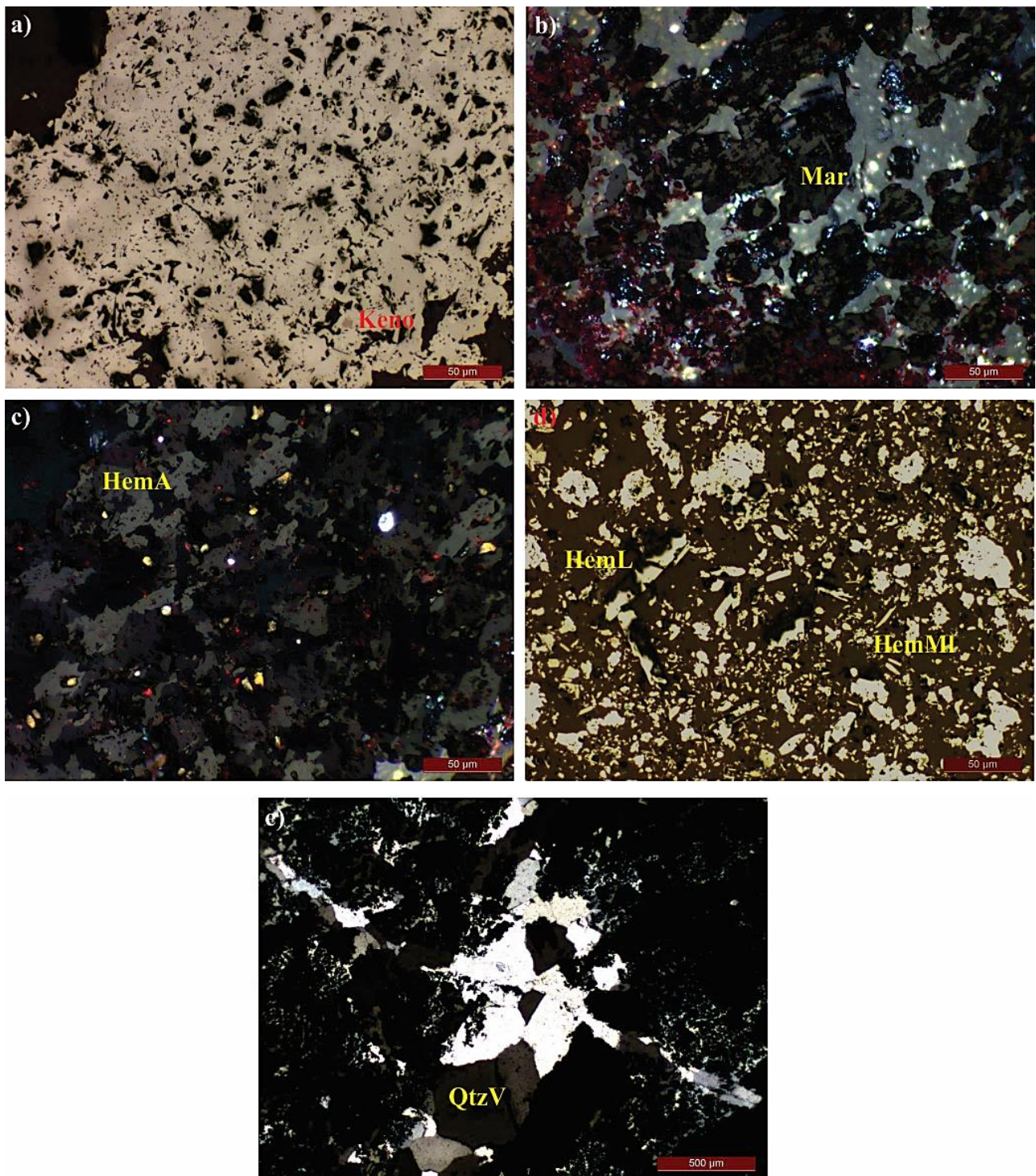
No minério maciço a paragênese mineralógica está exemplificada na Tabela 4.8 e na Figura 4.20. O significado das siglas dos minerais respeita a Tabela 4.1.

O minério tem maior quantidade de hematita anédrica, hematita microlamelar e hematita lamelar, quantidade intermediária de martita, e menor quantidade de quartzo recristalizado que os demais litotipos.

**Tabela 4.8:** Principais características dos minerais no minério de ferro de alto teor maciço.

Minerais	Forma	Bordas	Granulação*	Observações	
	Keno	anédrica	irregulares	muito fina	- menor quantidade que IS, ISQV, BI e MQV; - Figura 4.20a.
	Mar	euédrica a subédrica	regulares	fina	- menor quantidade que IS, ISQV, BI e MQV; - Figura 4.20b.
<b>Opacos</b>	HemA	anédrica	irregulares	muito fina a fina	- maior quantidade que IS e menor que ISQV, BI e MQV; - Figura 4.20c.
	HemL	euédrica tabular a subédrica	regulares	muito fina	- maior quantidade que ISQV e menor que IS e BI; - Figura 4.20d.
	HemMI	euédrica tabular a subédrica	regulares	muito fina	- maior quantidade que os MQV e menor que IS, ISQV e BI; - Figura 4.20d.
<b>Trans-parentes</b>	QtzV	euédrica a subédrica	regulares a irregulares	fina a média	- menor quantidade que IS, ISQV, BI e MQV; - Figura 4.20e.

\*Granulação de acordo com escala de Wentworth (granulação muito fina:  $\emptyset < 0,004$  mm; granulação fina:  $0,004 < \emptyset < 0,064$  mm; e granulação média:  $0,064 < \emptyset < 2$  mm).

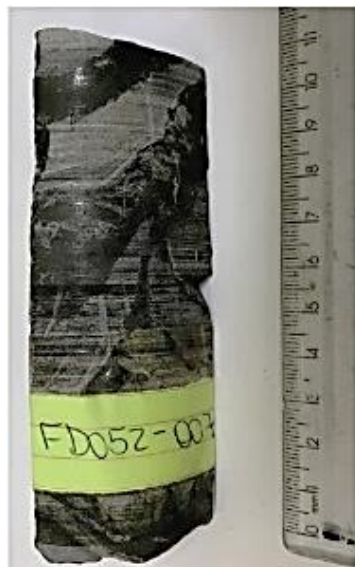


**Figura 4.20:** Minerais no minério de ferro de alto teor maciço. **a)** Kenomagnetita (Keno) como relicto no interior de martita. **b)** Martita (Mar). **c)** Hematita anédrica (HemA). **d)** Hematita lamelar (HemL) e hematita microlamelar (HemML). **e)** Quartzo venular (QtzV). Luz refletida, nicóis descruzados: **a** e **d**; luz refletida, nicóis cruzados: **b** e **c**; luz transmitida, nicóis cruzados: **e**.

#### 4.2.6. Brecha com sulfetos (BS)

A brecha com sulfetos é uma brecha com clastos compostos por aglomerados de óxidos de ferro, veios e vênulas de quartzo, carbonato e sulfetos (Fig. 4.21). Há ainda áreas que mostram finas bandas (1 a 2 cm) com alternância de quartzo, carbonato e óxidos de ferro (Fig. 4.21).





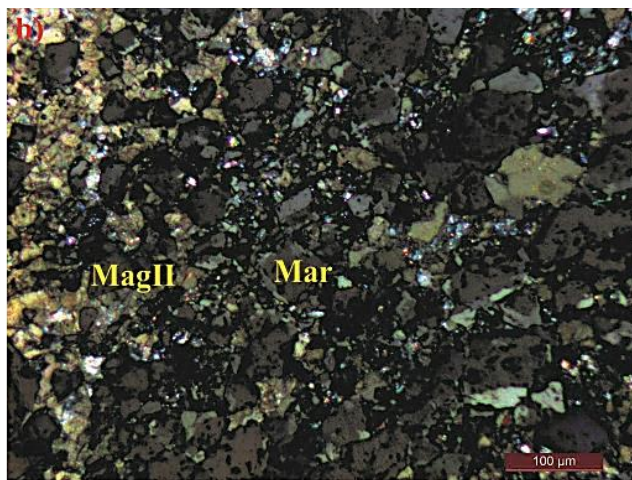
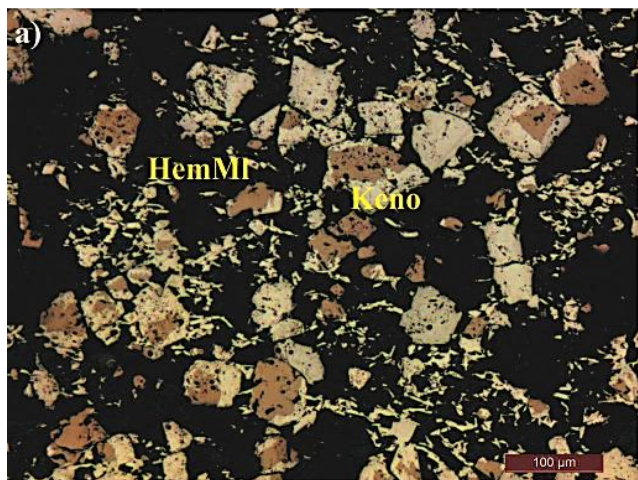
**Figura 4.21:** Amostras e lâminas de brecha com sulfetos (BS) com textura brechada e bandamento, aglomerados euédricos de óxidos de ferro, veio com sulfetos, e áreas desprovidas de bandamento.

A mineralogia da brecha com sulfetos está descrita e exemplificada na Tabela 4.9 e na Figura 4.22. Significado das siglas na Tabela 4.1. A brecha com sulfetos é possui pirita, carbonato e calcopirita, além de magnetita hidrotermal (MagII) posterior aos demais óxidos de ferro.

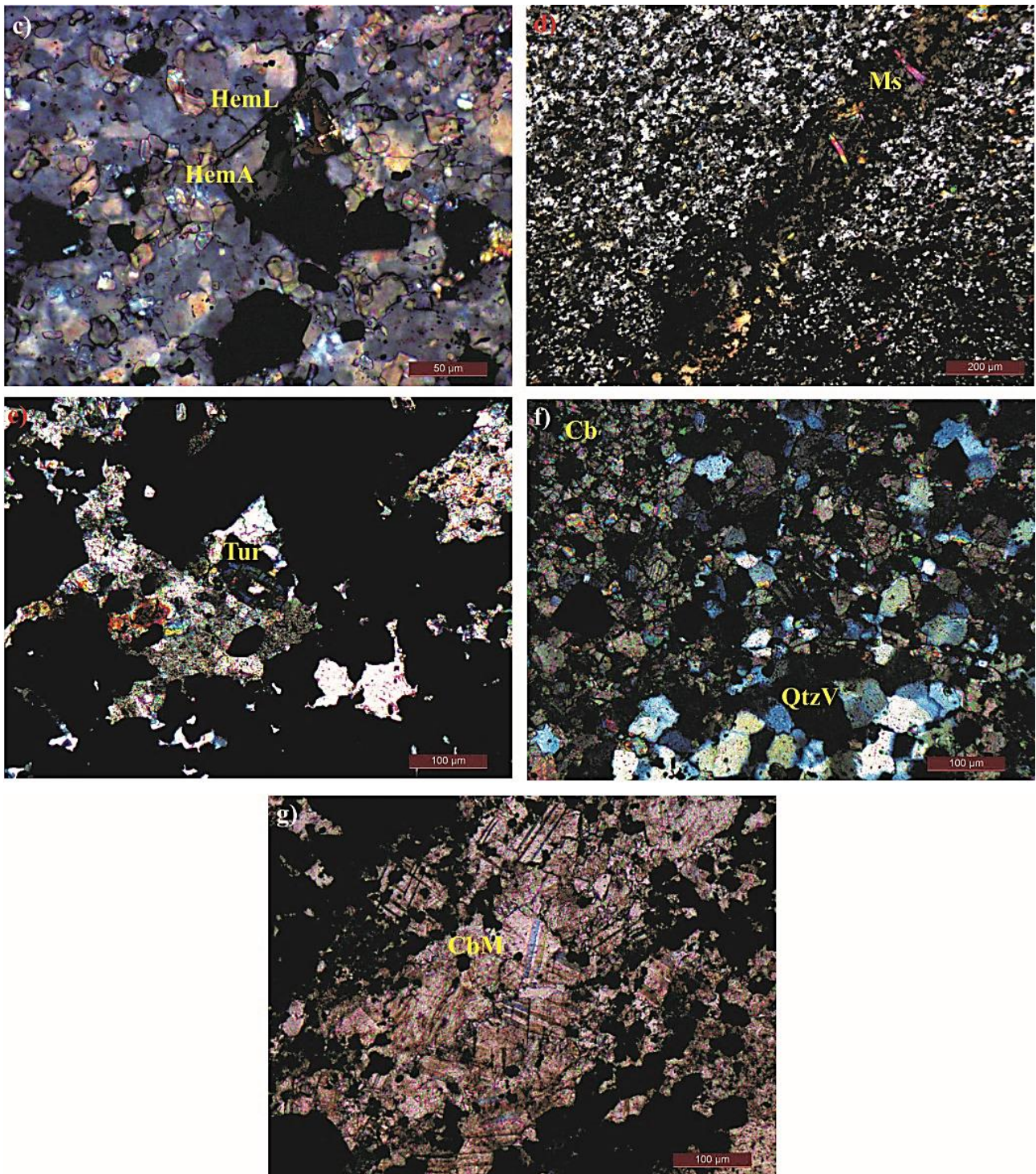
**Tabela 4.9:** Principais características dos minerais na brecha com sulfetos.

Minerais	Forma	Bordas	Granulação*	Observações
MagII	subédrica a anédrica	regulares	fina a média	- maior quantidade que IS; - Figura 4.22b.
Keno	anédrica	irregulares	muito fina	- maior quantidade que ISQV e MM e menor que IS, BI e MQV; - Figura 4.22a.
Mar	euédrica a subédrica	regulares	fina	- menor quantidade que os outros litotipos; - Figura 4.22b.
HemS	subédrica	regulares	fina a média	- somente neste litotipo.
HemA	anédrica	irregulares	muito fina a fina	- menor quantidade que os outros litotipos; - Figura 4.22c.
HemL	euédrica tabular a subédrica	regulares	muito fina	- maior quantidade que os outros litotipos; - Figura 4.22c.
HemMI	euédrica tabular a subédrica	regulares	muito fina	- menor quantidade que os outros litotipos; - Figura 4.22a.
Py	subédrica a anédrica	regulares a irregulares	fina a média	- somente neste litotipo; - porosidade moderada.
Cpy	anédrica	irregulares	fina	- somente neste litotipo.
Qtz	anédrica	irregulares	muito fina a fina	- maior quantidade que MQV e MM e maior que IS, ISQV e BI.
QtzV	euédrica a subédrica	regulares a irregulares	fina a média	- menor quantidade que os outros litotipos; - Figura 4.22f.
Cb	anédrica	regulares a irregulares	muito fina a fina	- somente neste litotipo. - Figura 4.22f.
CbM	anédrica	regulares a irregulares	fina a média	- somente neste litotipo. - Figura 4.22g.
Ms	euédrica	regulares a irregulares	muito fina	- maior quantidade que ISQV, MQV e MM e menor que IS e BI; - Figura 4.22d.
Gru	euédrica	regulares a irregulares	muito fina	- maior quantidade que os outros litotipos.
Tur	euédrica a subédrica	regulares	fina	- somente neste litotipo; - Figura 4.22e.

\*Granulação de acordo com escala de Wentworth (granulação muito fina:  $\emptyset < 0,004$  mm; granulação fina:  $0,004 < \emptyset < 0,064$  mm; e granulação média:  $0,064 < \emptyset < 2$  mm).







**Figura 4.22:** Minerais na brecha com sulfetos. **a)** Kenomagnetita (Keno) como relicto no interior de martita e hematita microlamelar (HemMI). **b)** Magnetita hidrotermal (MagII) e martita (Mar). **c)** Hematita anédrica (HemA) e hematita lamelar (HemL). **d)** Muscovita (Ms). **e)** Turmalina (Tur). **f)** Carbonato de granulação fina (Cb) e quartzo venular (QtzV). **g)** Carbonato de granulação média (CbM). Luz refletida, nicóis descruzados: a; luz refletida, nicóis cruzados: **b e c**; luz transmitida, nicóis descruzados: g; luz transmitida, nicóis cruzados: **d, e e f**.

## CAPÍTULO 5 - ARTIGO

### “Hydrothermal genesis of the locally sulfidized itabirite-hosted Minerita iron mineralization, southwestern Serra do Curral Range, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais”

#### Abstract

The southwestern portion of the Serra do Curral is located in the low deformation domain of the Quadrilátero Ferrífero region, where hypogene, high-grade iron ores are associated with sulfides and controlled by shear and fold zones. Quartz, dolomite and amphibole itabirites dominate in this area, with the former constituting the main host rock to ore. Rocks are folded, refolded, and present reverse stratigraphy of the Minas Supergroup units. The Minerita deposit is located within this structural complexity. The main lithotypes described in Minerita are hydrothermally altered quartz itabirites, characterizing distal and intermediate alteration zones, with iron ore representing the proximal zone. Mineral parageneses of itabirites and iron ore mainly include kenomagnetite, martite and anhedral hematite, recrystallized and vein quartz. A sulfide breccia is also present; it contains magnetite, anhedral hematite, pyrite, chalcopyrite, recrystallized and vein quartz, as well as fine- to medium-grained carbonate. Hydrothermal alteration of itabirites results in martitization with formation of anhedral hematite, leaching of silica and localized silicification with abundant veining. LA-ICP-MS results in iron oxides suggest that, during martitization, a small gain in Al, Cr, Ga, Pb and REE + Y occurred, with losses in Mg, Zn, Mn, Co and V. During the formation of anhedral hematite, gains of Al, Cr, V and Zn, and losses in Mg, Ti, Mn, Co, Pb and REEs + Y are recorded. For magnetite and anhedral hematite in sulfide breccia, there was significant enrichment of Zn, Ga and Pb, and impoverishment of V and REEs + Y. Sulfur isotope results indicate a magmatic origin for pyrite in the sulfide breccia. In contrast, fluid inclusion microthermometry in vein quartz of iron ore reflects the involvement of at least one low-temperature (between 108 °C and 142 °C) fluid with low to moderate-salinity (0 to 14.26 % in weight of NaCl eq.). Mineralization, itabirite enrichment and formation of sulfide breccia may have resulted from the interaction between basinal fluid and meteoric water, in addition to subordinate metamorphic fluid as previously indicated for other iron deposits in the region. The involvement of either intrusive country rocks or rocks from the Rio das Velhas Supergroup may explain the magmatic sulfur signature.

**Keywords:** Minerita deposit; iron ores; fluid inclusions; LA-ICP-MS in iron oxides; SIMS in pyrite.

## 5.1. INTRODUCTION

High-grade iron ore deposits are widely studied across the world, due to their relevant economic value. A large portion of these giant ( $4.3 \times 10^9$  million tons) and supergiant ( $4.3 \times 10^{10}$  million tons) iron deposits (Laznicka, 2010) have already been discovered. Major examples are located the Hamersley Province (Pilbara Craton, Western Australia; e.g. Thorne et al., 2008; Teitler et al., 2014); Quadrilátero Ferrífero (São Francisco Craton, Minas Gerais, Brazil; e.g. Rosière et al., 2008); Serra Norte and Serra Sul (Amazon Craton, Carajás, Brazil; e.g. Figueiredo e Silva et al., 2013; Prado et al., 2016); Kapvaall Craton (South Africa; e.g. Beukes et al., 2003); Singhbhum, Bastar and Dharwar cratons (India; Mukhopadhyay et al., 2008).

The genesis of most iron formations worldwide occurred during the Paleoproterozoic, a period that is closely associated to an increase in the oxygen levels in the atmosphere - during the great oxidation event (GOE), between 2.4 and 2.2 Ga - and to a hiatus in depositional environments (Holland, 2006). The presence of small portions of dissolved oxygen in the surface of Archean oceans, iron hydrothermal springs and their subsequent oxidation to ferric iron (regardless if this is due to biological processes or not), are currently the most accepted theories in explaining of these formations' genesis (Bekker et al., 2010; Planavsky et al., 2010).

For iron formations to become exploitable high-grade iron ores, they must undergo hydrothermal modifications, which may locally lead to total mineral substitution and to the obliteration of the original rocks (pervasive substitution) (Robb, 2005). Moreover, the removal of gangue minerals and concentration of iron oxides in  $> 64\%$  (e.g. Hagemann et al., 2014). This involves leaching of quartz and carbonate, which may occur by either hypogene or supergene alteration (e.g. Rosière et al., 2008). In case of the former, the original iron oxides are modified, and new hydrothermal oxides become concentrated in structurally favorable sites.

Most high-grade iron ores in the Quadrilátero Ferrífero region are hosted in metamorphosed banded iron formations, or itabirites. These belong to the Paleoproterozoic Cauê Formation, from the Itabira Group of the Minas Supergroup (e.g. Rosière et al., 2008). The ores originated from hypogene alteration combined with supergene enrichment. The region represents one of the largest metallogenetic districts in the world (e.g. Lobato et al., 2014), presenting iron deposits and other commodities of great importance in the global economic scenario.

Several studies about the geotectonic context, and the formation of iron deposits at a global scale, have already addressed in the Quadrilátero Ferrífero (Eschwege, 1822; Dorr, 1969; Lobato, et al., 2001, 2014; Rosière et al., 2008; Amorim and Alkmim, 2011; Sanglard et al., 2014; Carlos et al., 2014; Mendes, 2015; Mendes et al., 2017; Hensler et al., 2014, 2015, 2017; Oliveira et al., 2015,

2017; Gomes et al., 2018). There is still, however, much to be explored, regarding the inexhaustible assortment of information that can be investigated and made available for the scientific community, especially the presence of sulfides in itabirites in the QF (e.g. Sampaio et al., 2018) and this occurrence in the southwestern portion of the Serra do Curral.

The focus of the present study is to generate more information about the hydrothermal genesis of iron ore in the southwestern portion of the Serra do Curral (also called Serra Azul), specifically the Minerita deposit that has itabirites associated with sulfides. The deposit is located approximately 67 km away from the capital of the state of Minas Gerais, Belo Horizonte. In Minerita are identified quartz, dolomite and amphibole itabirites, as well as quartzite and ferruginous phyllite from the Cercadinho Formation, and phyllite from the Batatal Formation (Minerita, unpublished internal report, 2007). The lithotypes selected for the study are (i) quartz itabirites, with varying degrees of hydrothermal alteration; (ii) high-grade iron ores, quartz-veined and massive; and (iii) sulfide breccia.

The objective is to investigate the genesis of iron mineralization associated with sulfides in the Minerita deposit, which is hosted in quartz itabirites. In order to achieve it, the following investigative steps were conducted: (i) establishment of the main mineralogical parageneses of itabirites and iron ores, including associations typical of hydrothermal alteration stages and mineralization; (ii) microthermometric studies of fluid inclusions in quartz veins; (iii) *in situ* assessment of trace elements in iron oxides; (iv) sulfur isotopes analysis in pyrite.

With these steps it is determined: the hydrothermal alteration zones and their mineralogical paragenesis; the mineralogical and chemical changes during the mineralization stages; and the characteristics of the hydrothermal fluids that was responsible for mineralization, enrichment of itabirites and formation of the sulfide breccia. The results are compared with important studies of the Quadrilátero Ferrífero related to the characterization of fluids from fluid inclusions (Rosière and Rios, 2004; Oliveira et al., 2017; Gomes et al., 2018); and chemical changes in iron oxides during mineralization stages (Oliveira et al., 2015; Hensler et al., 2015; Gomes et al., 2018).

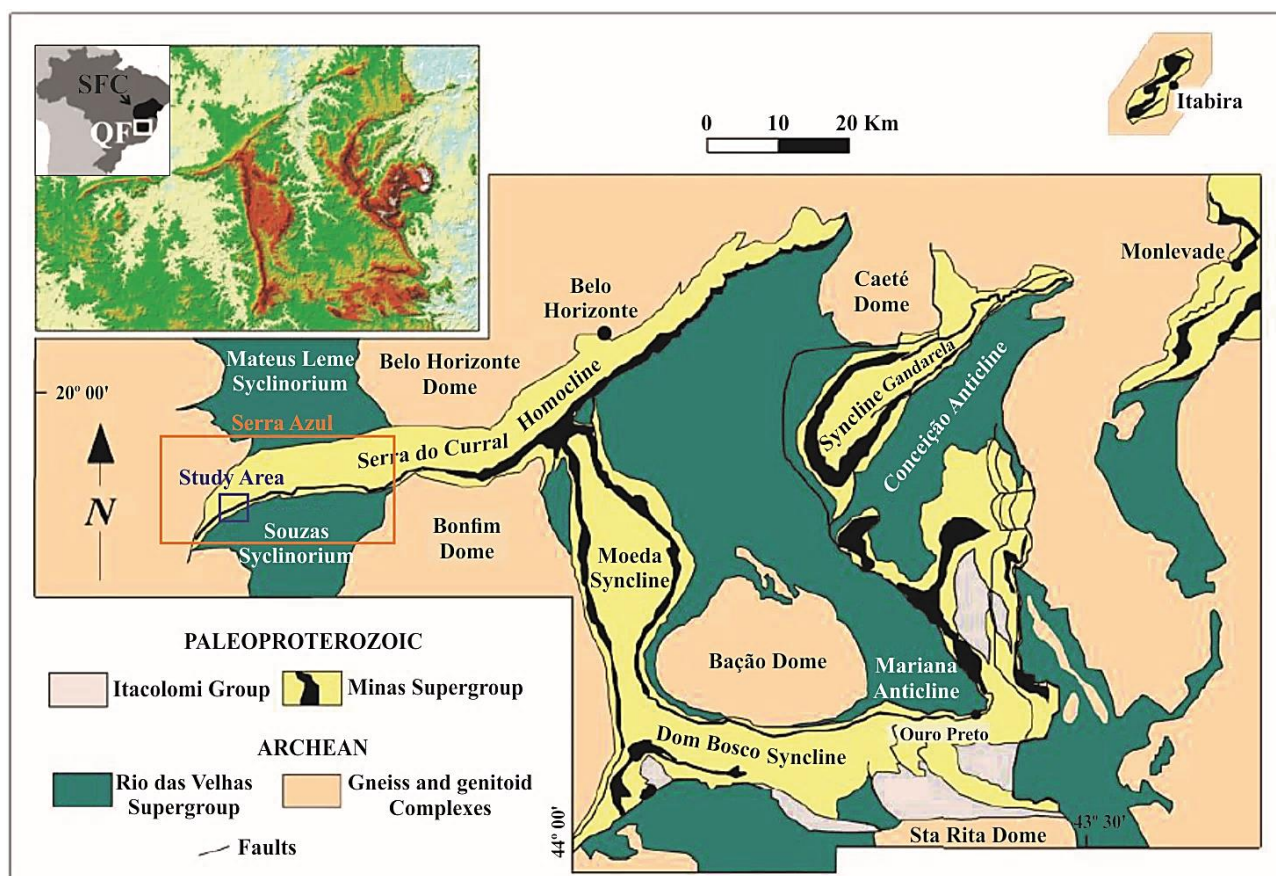
A genetic hydrothermal evolution model is proposed for Minerita. It not only contemplates these new data, but those of the literature on the southwestern portion of the Serra do Curral (Rosière et al., 2008; Amorim and Alkmim, 2011; Sanglard et al., 2014; Mendes, 2015; Mendes et al., 2017; Hensler et al., 2014, 2015, 2017). The relationship between iron mineralization associated with sulfides is new and can be used to acquire more information on the hydrothermal genesis of iron ores.



## 5.2. GEOLOGICAL BACKGROUND

### 5.2.1. Regional geological setting

Iron deposits from the Quadrilátero Ferrífero (QF) mineral province are hosted in metamorphosed banded iron formations (BIFs) known as itabirites (Eschwege, 1822). They are part of the Paleoproterozoic Minas Supergroup (Dorr, 1969; Amorim and Alkmim, 2011), and are located in the southeastern margin of the São Francisco Craton (Fig. 5.1). The QF region also comprises a crystalline basement, the Archean rocks from the Rio das Velhas Supergroup, and Paleoproterozoic rocks from the Itacolomi Group (Dorr, 1969; Almeida, 1977).



**Figure 5.1:** Simplified geological map of the Quadrilátero Ferrífero region, emphasizing the main lithotypes and structures (modified from Alkmim and Teixeira, 2017). The approximate area of the Serra Azul is delimited by the orange rectangle, and the area of the Menerita deposit by the blue square. The area of the deposit is detailed in Fig. 5.3. SFC = São Francisco Craton; QF = Quadrilátero Ferrífero.

The shelf sequence of the Minas Supergroup consists of a stack of clastic and chemical rocks derived from a passive margin environment (Alkmim and Marshak, 1998). It is subdivided into the Tamanduá, Caraça, Itabira, Piracicaba and Sabará groups, and discordantly overlaps the Rio das Velhas Archean greenstone belt (Dorr, 1969; Renger et al., 1995; Hartmann et al., 2006). The Itabira Group is divided into the Cauê and Gandarela formations; the first presents itabirites that host important high-grade iron ores in the QF.

The crystalline basement consists of gneissic rocks (both  $\geq 2.9$  Ga) of trondhjemite-tonalite-granodiorite (TTG) composition. It comprises the Bonfim, Bação, Belo Horizonte, Santa Bárbara, Caeté, and Divinópolis complexes (Noce, 1995; Aguilar et al., 2017) (Fig. 5.1).

The Rio das Velhas Supergroup (Rio das Velhas greenstone belt) presents associations of mafic and ultramafic (basalts and komatiites), volcanic and volcanoclastic rocks, as well as immature clastic sediments. It is subdivided into the Nova Lima and Maquiné groups, and is tectonically in contact with the crystalline basement (Dorr, 1969).

The Paleoproterozoic Itacolomi Group, in turn, is composed of alluvial sediments from the collapse phase of the Rhyacian orogeny (Alkmim and Martins-Neto, 2012). It shows regional discordant contact with the Minas Supergroup.

The Minas Supergroup was affected by the Rhyacian orogeny (2.1 - 1.9 Ga), which also caused the uplift of the crystalline basement, folding of the supracrustal units of the Rio das Velhas and Minas supergroups, and the formation of megasynclines (Chauvet et al., 1994; Chemale et al., 1994; Spier et al., 2003). Serra do Curral, Moeda, Dom Bosco, Gandarela and Itabira were these megasynclines formed during this orogeny, and thus set the boundaries of the QF (Fig. 5.1).

The Neoproterozoic Brasiliano orogeny (0.7 - 0.5 Ga) reactivated and overlapped the previous one, forming a thrust belt that verges westwards, which mainly affected the eastern part of the QF (Chemale et al., 1994; Alkmim and Marshak, 1998; Rosière et al., 2008).

Rosière et al. (2001) subdivided the QF into two structural subdomains: the western domain, which presents low deformation (greenschist facies) and stretches from the westernmost portion of the QF up to the eastern flank of the Moeda syncline; and the eastern domain, of high deformation (greenschist to amphibolite facies), that has pervasive structures due to the influence of the Brasiliano orogeny. This subdivision separates iron orebodies with different structural, morphological and mineralogical characteristics (Rosière et al., 2008).

### **5.2.2. Itabirites and high-grade iron ores in Quadrilátero Ferrífero**

Itabirites are rocks that have banded texture. The banding is well-defined, with alternate layers of iron oxides and gangue minerals (muscovite, chlorite, biotite, stilpnomelane, chloritoid, etc). When the itabirite is deformed the brecciated texture may form. This texture is composed by clasts of layers in a banded matrix. At deeper levels, itabirites are usually compact, while near the surface they are fragmented and friable (powdery). In the QF three types of itabirites are found: quartz, dolomite and amphibole itabirites. Quartz itabirite presents alternate layers of recrystallized quartz and iron oxides of various generations, such as magnetite, martite and hematite (Dorr, 1969; Spier et al., 2003).

Dolomite itabirite exhibits alternate layers of reddish carbonate, containing micro-inclusions of hematite (Rosière et al., 2008), iron oxides and lower amount of quartz. Amphibole itabirite is similar to dolomite itabirite, however, it shows disseminated amphiboles, such as grunerite, tremolite, actinolite, cummingtonite and anthophyllite (Hensler et al., 2015).

Quartz itabirite is considered the main type found in the QF (Amorim and Alkmim, 2011), while dolomite and amphibole itabirites occur as layers, or lenses, within the Cauê Formation. Dolomite itabirite is most common within the western domain of the QF, while amphibole itabirite is common in the eastern domain (near Itabirita). This trend reflects the original facies zoning of the sedimentary deposition in the shelf sequence of the Minas Supergroup, with the deposition of a larger amount of carbonate in the western domain of the basin, and of terrigenous material (amphibole formation) in the eastern domain (e.g. Alkmim, 2014).

The high-grade iron ores are subdivided into **hard** and **friable**. The first can be banded, massive, brecciated and schistose (Rosière, 1981; Spier et al., 2003). In comparison to itabirites it is richer in iron oxides, such as martite and hematite, and has lower amounts of quartz, carbonate and amphibole. Banded iron ore inherits the microstructure and texture of the itabirites, with dense layers that are rich in martite/hematite, and porous ones with hematite and vugs (Hensler et al., 2015). This porosity is generated during hydrothermal mineralization due leaching and removal of quartz (among others) from non-ferriferous bands of itabirites. Massive ore has low porosity and recrystallized iron oxides. Brecciated ore shows clasts of layers rich in hematite, quartz or carbonate, which are usually in a porous matrix (Hensler et al., 2015). Finally, in schistose ore there is predominance of specular hematite that overlaps all other microstructures.

The **friable** ore is associated with the **hard** one, and both present the same mineralogy. What differs between them is the absence of internal structures, presence of large cavities and the powdery aspect of the friable ore. Where the friable ore is blue, it is mainly composed of hematite (blue dust), while the color brown indicates presence of hematite, goethite and other iron hydroxides (Rosière et al., 2008).

In itabirites and iron ores, magnetite occurs generally as kenomagnetite (phase between maghemite and magnetite, which is deficient in  $\text{Fe}^{+2}$ ) (Kullerud et al., 1969). Martite is a pseudomorph derived from the oxidation of magnetite (Rosière et al., 2008) and presents kenomagnetite in its interior.

Hematite may be granoblastic, platy, microplaty and specular (Rosière et al., 2001). Granoblastic hematite results from the recrystallization of martite due to an increase in metamorphism

(Mendes, 2015). Platy and microplaty hematite indicate continuation of the recrystallization of magnetite, martite and granoblastic hematite, with nucleation from the edges of the grains (Lagoeira, 2004; Mendes, 2015). Specular hematite is related to precipitation of hydrothermal fluids and is the youngest of all types of hematite (Hensler et al., 2015).

### **5.2.3. Local geological setting**

#### **5.2.3.1. Serra Azul**

The Minerita deposit is located in the western prolongation of the Serra do Curral, called Serra Azul. It is part of the western low deformation domain of the QF (Rosière et al., 2001) (Fig. 5.1). The structure of the Serra Azul is interpreted as a homocline fold, with overall NE-SW orientation and a sharp SW dip. Some authors suggest that it is a relic of a reverse flank of an anticline that verges towards NW (Romano et al., 1991; Alkmim and Marshak, 1998) (Fig. 5.2). Serra Azul presents NE-SW trends of coexisting faults and folds that are locally overlapped by NNW-SSE trends of asymmetrical folds. These structures are derived from the Rhyacian orogeny and have controlled the formation of the iron orebodies (Alkmim and Marshak, 1998; Dalstra and Rosiere, 2008; Sanglard et al., 2011), which are located in shear zones and folded extremities of blind folds (Sanglard et al., 2014).

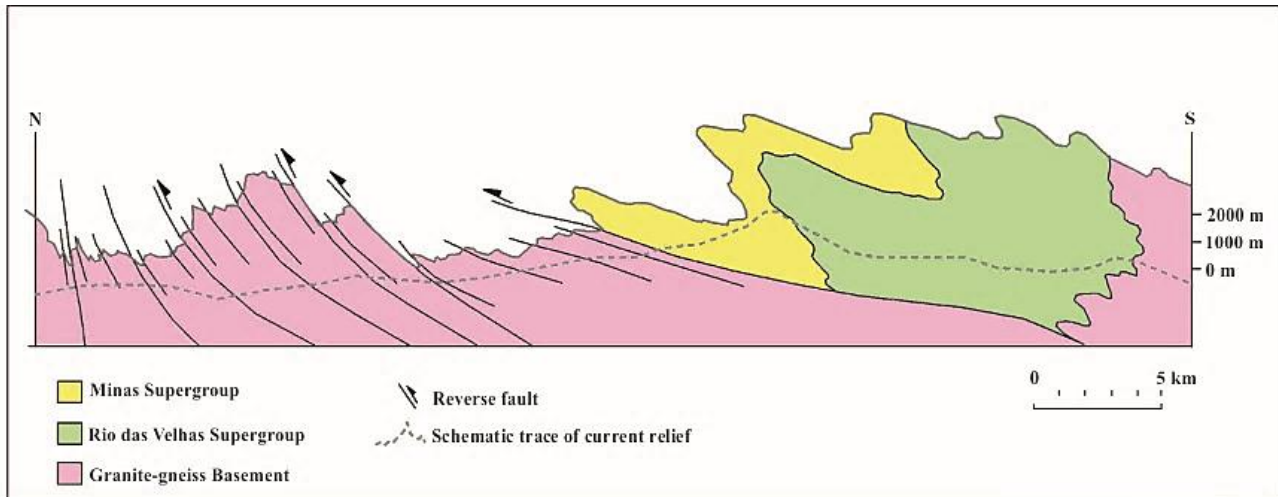
In the westernmost portion of Serra Azul range, the stratigraphic stack is conditioned by the reversed structuring of the units (Fig. 5.2). The Bonfim Complex of the Archean basement overlaps the Archean greenstone belt of the Rio das Velhas Supergroup, which, in turn, thrusts Paleoproterozoic metasedimentary rocks of the Minas Supergroup (Amorim and Alkmim, 2011).

In the Serra Azul, groups and formations of the Minas Supergroup occur irregularly. The Cauê and Cercadinho (Piracicaba Group) formations are continuous and more representative. In general, the Cauê Formation outcrops at the top of the Serra Azul range, and supports the relief along with a ferruginous lateritic cover. This formation is thicker in the central-western portion and decreases, even disappearing, at the western extremity of the Serra Azul range (Amorim and Alkmim, 2011). The Cercadinho Formation presents tectonic contact (thrust fault) with the Cauê Formation, showing local gradation of BIFs into weathered hematite-ferruginous quartzites. In other areas, weathered grayish phyllites occur associated with quartzites.

Mafic intrusive rocks cut rocks of the Minas Supergroup, and present preferential N-S and NW-SE trends (Amorim and Alkmim, 2011), with ages indicated by Mendes (2015). These are between 2.03 and 1.73 Ga for basic dikes (alkali-gabbros and monzogabbros), an age thought to be related to the Rhyacian orogeny collapse (Mendes, 2015).



The Serra Azul itabirites are well preserved, banded and/or brecciated, but also compact, fragmented and friable. They are quartz, dolomite and amphibole itabirites, containing local centimetric to metric lenses of iron orebodies. Itabirites are composed of martite and hematite, with subordinate kenomagnetite; they can be brecciated or cut by veins and, in this case, may present porous layers due to leaching of other minerals (Hensler et al., 2015).



**Figure 5.2:** Schematic structural section of the Serra Azul, Quadrilátero Ferrífero (modified from Romano et al., 1991).

The iron ores at Serra Azul are hard and/or friable. The former is massive, either banded or brecciated, and rich in martite, with hematite and kenomagnetite occurring subordinately. Microplaty hematite is present overlapping martite and quartz. They are also cut by quartz, carbonate and iron oxides veins (Hensler et al., 2015). The friable ore is associated with the hard one, showing either a blue or brownish color, depending on the amount of hematite. It is generally powdery.

Geochronological analyses (U-Pb SHRIMP) (Rosière et al., 2012; Sanglard et al., 2014) in monazite intergrown with hematite reveal Paleoproterozoic age (approximately 2.03 Ga) for the formation of hematite veins in the Esperança deposit, located in the northeastern region of the Minerita deposit. This is thought to be the age of iron mineralization in the western low deformation domain of the QF.

### 5.2.3.2. *Minerita deposit*

The following description is based on fieldwork conducted in 2007 (Minerita, unpublished internal report, 2007) and observations accumulated during the 2014 and 2015 drilling campaigns.

The main lithotypes in Minerita are itabirites and iron ores of the Cauê Formation, ferruginous quartzites and phyllites of the Cercadinho Formation, and phyllites of the Batatal Formation (Caraça Group) (Fig. 5.3).

Quartz itabirite predominates, while amphibole itabirite occurs in the eastern portion, and dolomite itabirite is located in the southern area of the mining pit (Fig. 5.3). Itabirites are either banded or brecciated, with either concordant or discordant veins in relation to microstructures. At deeper levels, banded and brecciated itabirites are compact, and are found fragmented form (compact and friable together) either pressure relief zones or where close to surface. The overall direction of bands is NE-SW, with mean dip of 60° towards S. In several places the bands are porous, which suggests strong leaching of minerals and formation of friable itabirites, which were originally banded or brecciated.

Iron-enrichment of the itabirites occurs near fault and fold zones. In fault zones, they are almost entirely obliterated, and in hinge zones, there are small iron ore lens.

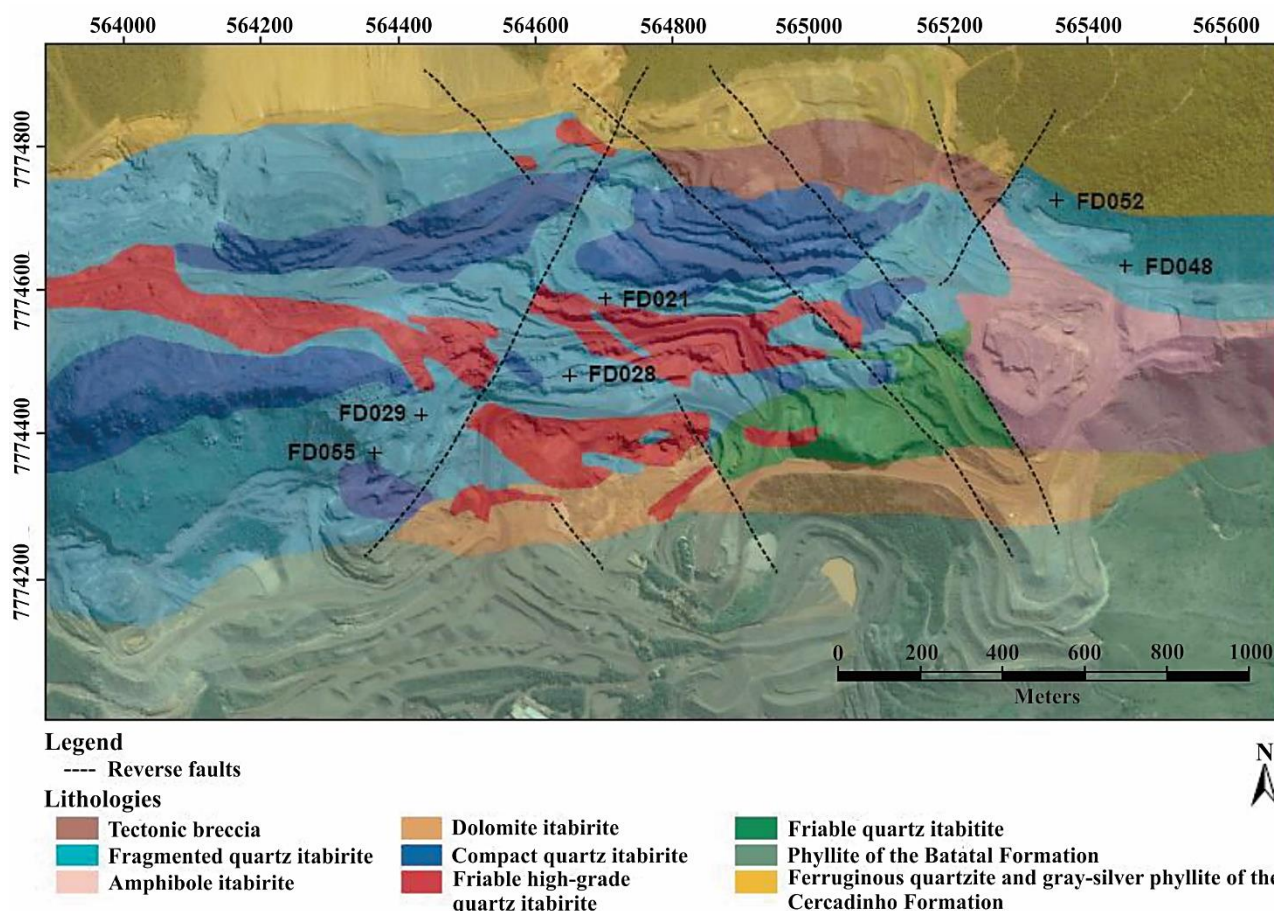
Hard iron ores are either massive or brecciated, with quartz veins. These bodies are rarely found in the pit, where they exhibit centimetric to metric thicknesses. There are also friable ore associated with friable itabirites.

Figure 5.3 shows compact and friable quartz itabirites of low iron content (< 30 % Fe). Fragmented quartz itabirite has compact and friable pieces, with banded and/or brecciated texture, and compact pieces predominates over friable ones. In this case, iron content is moderate (35 % - 55 % Fe). Rich friable quartz itabirite is banded and/or brecciated, with friable massive and/or brecciated ore lenses, and presenting high iron content (> 55 % Fe).

Amphibole itabirite is also compact and/or friable, banded, with low iron content at surface, and moderate content at deeper levels. Dolomite itabirite is friable (banded), with low iron content, with local bands of iron oxides rich in Mn.

A tectonic breccia (Fig. 5.3) presents fragments of quartzite and compact quartz itabirite (banded and/or brecciated) in a hematite matrix. This breccia is hard, located to the north of the pit (Fig. 3), in tectonic contact with itabirites, weathered quartzite and phyllite from the Cercadinho Formation. In the southern area of the pit, a weathered phyllite of the Batatal Formation outcrops (Fig. 3); it is also in tectonic contact with itabirites.

All of the lithotypes are cut by thrust faults with an overall NE-SW direction, and a strong dip angle towards SE (Fig. 5.3).



**Figure 5.3:** Lithological map of the Minerita deposit showing the location of drill holes sampled in the present study, in the fragmented quartz itabirite domain. The legend shows the nomenclature used at the Minerita mine (modified from Minerita, unpublished internal report, 2007).

## 5.3. MATERIAL AND METHODS

### 5.3.1. Sampling and petrography

Sampling was conducted in drill holes FD021, FD028, FD029, FD048, FD052 and FD055 of a fragmented quartz itabirite (Fig. 5.3). Samples of compact (1) quartz itabirite, (2) high-grade iron ore, and (3) sulfide breccia were collected (Table 5.1), with itabirite and iron ore classified as:

(1) (i) banded; (ii) banded and brecciated; (iii) brecciated.

(2) (iv) brecciated; (v) massive.

**Table 5.1:** Detail of sampling in drill holes and their lithotypes, including different types of itabirite and iron ore.

Drill holes	Interval	Nº of samples	Lithotypes
FD021	37.10 to 117.40	11	- Quartz itabirites: banded; banded and brecciated; brecciated. Iron ores: brecciated; massive.
FD028	7.05 to 140.95	8	- Quartz itabirites: banded; banded and brecciated; brecciated.
FD029	15.10 to 212.60	11	- Quartz itabirites: banded; banded and brecciated; brecciated. Iron ores: brecciated; massive.
FD048	178.95 to 179.75	1	- Sulfide breccia.
FD052	127.00 to 223.95	7	- Sulfide breccia.
FD055	115.85 to 172.05	4	- Quartz itabirites: banded; banded and brecciated; brecciated.

The polished thin sections were made from 32 samples at commercial laboratories. Petrographic analyses were conducted using a Leica DM2500P transmitted and reflected light optical microscope, with capture of photomicrographs, located at the Metallogeny Laboratory of the Manuel Teixeira da Costa Research Center (CMPTC), Institute of Geosciences (IGC), Federal University of Minas Gerais (UFMG).

### **5.3.2. Fluid inclusion microthermometry**

Fluid inclusion mapping and classification were conducted using a Leica DM2500P transmitted and reflected light optical microscope, with capture of photomicrographs and maximum magnification of 50x, and an Olympus BX 51TRF optical microscope coupled to the THMSG 600 system, with 100x magnification. Both are located at the Metallogeny Laboratory of CMPTC, IGC, UFMG.

Fluid inclusion (FI) microthermometry analysis was carried out on vein quartz of brecciated iron ore sample (FD021-010) using a bi-polished section. A Linkam cooling and heating platinum sensor, which belongs to the THMSG 600 system, was used. This sensor has an LNP 95 liquid nitrogen system, directly operated by a non-pressurized cylinder, a LinkPad control system, and a Linksys32 software control system with capture of photomicrographs, videos and data. The platinum sensor was calibrated between -56.6 °C and 374.1 °C, based on synthetic FIs (pure H<sub>2</sub>O and mixture of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>) provided by the manufacturer.

In order to obtain the temperatures of phase changes, the measurements were acquired through cooling and heating cycles. Precision was  $\pm 0.1$  °C for cooling, and  $\pm 1$  °C for heating to temperatures between 200 °C and 500 °C. Phase shifts were observed during this procedure in the constituents found in fluid inclusions (FIs), and the eutectic (Te), final ice melting (TmIce), total homogenization (Th<sub>t</sub>) and some clathrate melting (Tclath) temperatures were obtained. Salinity in % of weight of NaCl eq. was calculated using the MacFlinCor software (Brown and Hagemann, 1995).

### **5.3.3. LA-ICP-MS of iron oxides**

Analyses were conducted using the Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy (LA-ICP-MS) in martite, hematite and magnetite. Six sections were chosen to prepare polished sections. Among them are the banded (FD029-001), banded and brecciated (FD029-007) and brecciated (FD029-003) quartz itabirites, as well as the massive iron ore (FD021-006), and the sulfide breccia (FD052-005 and FD052-007) (Table 5.1).

Prior to the LA-ICP-MS analyses, major elements, such as iron, were measured in all selected iron oxides. In addition, grains were imaged to investigate the existence of zoning and inclusions. In



both cases, a JEOL JXA 8900RL WD/ED Electron Microprobe from the Microscopy Center of UFMG was used. The analysis was conducted using a 5 µm wide beam, voltage of 15 kV and electric current of 20 nA, with data collection every 50 msec by WDS spectrometers.

Data were treated and acquired in % of FeO<sub>T</sub> weight. As microprobe results did not show significant variations of iron among martite, hematite and magnetite, <sup>57</sup>Fe was used as an internal standard, with stoichiometric values of 79.20 % of FeO for martite and hematite, and 81.90 % of FeO for magnetite. Imaging did not show zoning and inclusions in grains, only high porosity.

Analyses using LA-ICP-MS were carried out in the Isotope Geochemistry Laboratory of the Department of Geology (DGEO) of the Federal University of Ouro Preto (UFOP), using a CETAC LSX-213 laser ablation system, in an ultra-high-purity helium atmosphere (flow rate of 0.38 L/min). Laser fluency was 8.16 J/cm<sup>2</sup>, frequency of 9 Hz and spot size of 20 µm. The resulting material was mixed with argon gas (flow rate of 1.38 L/min) and transported to the Thermo Scientific Element 2 ICP-SF-MS mass spectrometer. Dwell time was 45 s for all elements, and results per second (cps) were reduced using an internal Glitter software (Access Macquarie LTDA).

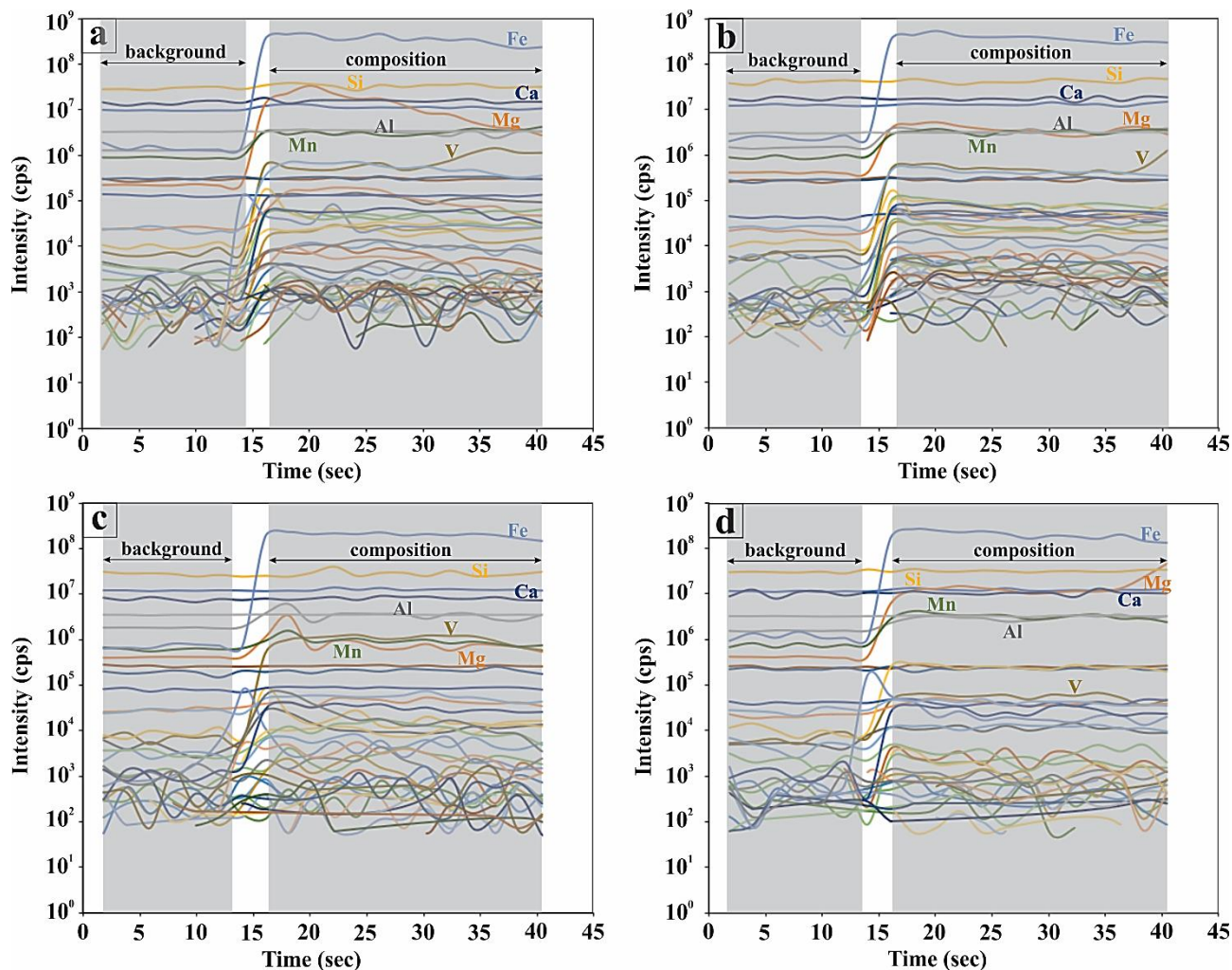
During the analysis, the following elements were quantified: <sup>23</sup>Na, <sup>24</sup>Mg, <sup>27</sup>Al, <sup>29</sup>Si, <sup>31</sup>P, <sup>39</sup>K, <sup>42</sup>Ca, <sup>45</sup>Sc, <sup>49</sup>Ti, <sup>51</sup>V, <sup>53</sup>Cr, <sup>55</sup>Mn, <sup>59</sup>Co, <sup>60</sup>Ni, <sup>66</sup>Zn, <sup>71</sup>Ga, <sup>75</sup>As, <sup>88</sup>Sr, <sup>89</sup>Y, <sup>90</sup>Zr, <sup>93</sup>Nb, <sup>97</sup>Mo, <sup>139</sup>La, <sup>140</sup>Ce, <sup>141</sup>Pr, <sup>146</sup>Nd, <sup>147</sup>Sm, <sup>153</sup>Eu, <sup>157</sup>Gd, <sup>159</sup>Tb, <sup>163</sup>Dy, <sup>165</sup>Ho, <sup>166</sup>Er, <sup>169</sup>Tm, <sup>172</sup>Yb, <sup>175</sup>Lu, <sup>178</sup>Hf, <sup>181</sup>Ta, <sup>182</sup>W, <sup>185</sup>Re, <sup>208</sup>Pb, <sup>209</sup>Bi, <sup>232</sup>Th and <sup>238</sup>U. The detection limit for <sup>23</sup>Na, <sup>24</sup>Mg, <sup>27</sup>Al, <sup>29</sup>Si, <sup>31</sup>P, <sup>39</sup>K, <sup>42</sup>Ca, <sup>45</sup>Sc, <sup>49</sup>Ti, <sup>51</sup>V, <sup>53</sup>Cr, <sup>55</sup>Mn, <sup>66</sup>Zn, <sup>75</sup>As, <sup>88</sup>Sr, <sup>90</sup>Zr, <sup>93</sup>Nb, <sup>97</sup>Mo, <sup>181</sup>Ta, <sup>182</sup>W, <sup>208</sup>Pb and <sup>232</sup>Th was 0,01 ppm; for <sup>59</sup>Co, <sup>71</sup>Ga, <sup>89</sup>Y, <sup>139</sup>La, <sup>140</sup>Ce, <sup>147</sup>Sm, <sup>175</sup>Lu and <sup>238</sup>U, 0,001 ppm; and <sup>141</sup>Pr, <sup>146</sup>Nd, <sup>153</sup>Eu, <sup>157</sup>Gd, <sup>159</sup>Tb, <sup>163</sup>Dy, <sup>165</sup>Ho, <sup>166</sup>Er, <sup>169</sup>Tm, <sup>172</sup>Yb and <sup>209</sup>Bi, 0,0001 ppm.

The BHVO-2 was used as the primary standard, BCR-2 as the secondary (quality control), HM5-F1 as the control (“in house”), and stoichiometric values of FeO were used as the internal. BHVO-2 and BCR-2 are standards obtained from the United States Geological Survey (USGS).

During the reduction procedure using the Glitter software, the <sup>57</sup>Fe signal was amplified in its stable band (Fig. 5.4) in order to avoid contamination by other mineral phases and solid inclusions (Nadoll and Koenig, 2011). Despite this precaution, some analyses were excluded due to heterogeneity in the <sup>57</sup>Fe signal.

Some elements measured, such as <sup>31</sup>P, <sup>39</sup>K, <sup>42</sup>Ca, <sup>60</sup>Ni, <sup>75</sup>As, <sup>175</sup>Lu, <sup>182</sup>W and <sup>209</sup>Bi, were not considered in the results because of their divergence from what is expected for the primary and secondary standards. Other elements, such as <sup>178</sup>Hf, <sup>181</sup>Ta and <sup>185</sup>Re, were also excluded because they were below the detection limit in all cases. Analyses with results above 20000 ppm for <sup>29</sup>Si were

excluded because they suggest possible contamination by other mineral phases (Nadoll et al., 2014). The final results were treated and processed in the ioGAs-64<sup>®</sup> software. Tables 1A to 17A in Appendix A shows the secondary (BCR-2) and “in house” (HM5-F1) standards recovery data and the results of trace elements used in this study.



**Figure 5.4:** Spectras showing the background and de composition obtained during the amplification of <sup>57</sup>Fe signal for a) Kenomagnetite, b) Martite, c) Anhedral hematite, and d) Hydrothermal magnetite.

### 5.3.4. Secondary Ion Mass Spectroscopy - SIMS in pyrite

The Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS) technique is the most used method to determine <sup>32</sup>S, <sup>33</sup>S, <sup>34</sup>S and <sup>36</sup>S isotopes. The results are calibrated, corrected, monitored and checked for accuracy based on the standard used. In the case of pyrite analyses, the Sierra (LaFlamme et al., 2016) and Isua (Whitehouse, 2013) pyrite standards are the applied ones.

A sample section and standard were assembled to conduct the analysis. The sample section comprises small 5-mm to 1-cm wide fragments of rock with sulfides and some fragments of the standard being used. The standard section measured 5-mm to 1-cm-wide as well, and presented 1 to 2 fragments of chalcopyrite, pyrite, pyrrhotite and pentlandite based on the standard. Both were

coated with a 30 nm thick gold layer, and assembled separately for standard reuse (LaFlamme et al., 2016).

Five fragments (A, B, C, D and E) from drill hole FD052 of the Minerita deposit, which contain intervals of sulfide breccia, were chosen for the assemblage of two sample sections. A total of 66 grains of pyrite, with no zoning and with small intragranular porosity, were in turn chosen for analysis. The equipment used for SIMS was the CAMECA IMS-1280, with a multicollector ionic microprobe, located at the Centre for Microscopy, Characterization and Analysis (CMCA), University of Western Australia (UWA), Perth, Australia. Section assemblages and SIMS analyses were conducted by third parties (Australian technicians and students), and results were later sent to the authors of the present study.

The method and data reduction were based on LaFlamme et al. (2016). The microprobe operated with a primary beam of  $\text{Cs}^+$ , at an intensity of 1-4 nA, impact energy of 10 keV and an opening of 20  $\mu\text{m}$ . After 45 s, secondary sulfur ions were extracted (energy of -10 kV) and received in the mass spectrometer. The signal was amplified 133x, with an automatic secondary beam centralization in the input slit opening. The magnetic field controller RMN blocked the axial mass at the beginning of each session, and the mass spectrometer worked with a mass resolution of 2500x. Under these conditions, interferences to the peak of  $^{33}\text{S}$  were therefore avoided. Three isotopes ( $^{32}\text{S}$ ,  $^{33}\text{S}$  and  $^{34}\text{S}$ ) were simultaneously measured by three Faraday Cup detectors (FC), with amplifiers of  $10^{10} \Omega$  for  $^{32}\text{S}$ , and  $10^{11} \Omega$  for  $^{33}\text{S}$  and  $^{34}\text{S}$ . Data were collected during 123 cps, in 20 interaction cycles. Counting rates for isotope  $^{32}\text{S}$  ranged between  $1 \times 10^9$  and  $3.5 \times 10^9$  cps, depending on the intensity of the primary beam (LaFlamme et al., 2016).

Values of  $\Delta^{33}\text{S}$  and  $\delta^{34}\text{S}$  were calculated using the formula proposed by Farquhar and Wing (2003), along with the associated error. Internal precision was 0.06 ‰ for  $\delta^{33}\text{S}$  and 0.03 ‰ for  $\delta^{34}\text{S}$ . External precision was 0.08 ‰ for  $\delta^{33}\text{S}$ , 0.07 ‰ for  $\delta^{34}\text{S}$  and 0.08 ‰ for  $\Delta^{33}\text{S}$ . Graphs of  $\delta^{34}\text{S}$  versus  $\Delta^{33}\text{S}$  were designed, and then compared with those present in the literature.

## **5.4. RESULTS**

### **5.4.1. Petrographic analyses**

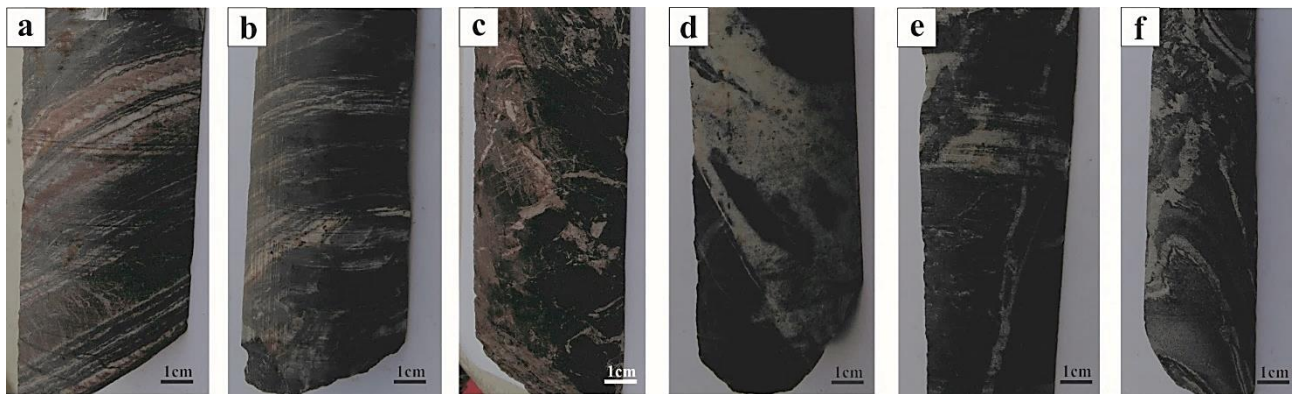
All samples from the Minerita deposit (Table 5.1) belong to the fragmented quartz itabirite domain (Fig. 5.3). Compact itabirite predominate (Fig. 5.5), with various degrees of hydrothermal alteration mainly reflected in the number of quartz veins (brecciated texture), either concordant or discordant to banding, and in the degree of martitization/hematitization. Itabirites have variations in

the amounts of pseudomorph hematite (referred as martite) and anhedral hematite (fine granoblastic hematite of Rosière et al., 2008).

Quartz itabirite differs in the amount of quartz veins, generating a brecciated texture, and in the presence of anhedral hematite in relation to martite, with three types being classified (acronyms in Table 5.2): (i) quartz itabirite (QI) (evident banding); (ii) quartz-veined quartz itabirite (QVQI) (banding and brecciated texture); and (iii) itabirite breccia (IB) (brecciated texture). In the itabirite breccia the itabirites clasts are inserted in an itabirite matrix.

High-grade iron ore has a more anhedral hematite, or martite, than the host itabirite. Two types of ore are identifying, and they differ in the number of quartz veins that impose a brecciated texture (acronyms in Table 5.2): (i) quartz-veined iron ore (QVIO) (brecciated texture); and (ii) massive hematite iron ore (MIO) (homogeneous texture). In the quartz-veined iron ore the iron ores clasts are inserted in a quartz matrix.

A magnetite-rich, sulfide (pyrite and chalcopyrite) breccia is referred to sulfide breccia (SB) (acronym in Table 5.2). It has clasts composed of iron oxides, quartz, carbonate and sulfides in quartz matrix. The breccia is only found at depths below ~ 127 m, and its shallower portion in drill holes (FD048 and FD052) consists of fragmented quartz itabirite (Fig. 5.3).



**Figure 5.5:** Lithotypes in which quartz itabirites is found to be: **a)** Quartz itabirite (QI). **b)** Quartz-veined quartz itabirite (QVQI). **c)** Itabirite breccia (IB). High-grade iron ore: **d)** Quartz-veined iron ore (QVIO). **e)** Massive iron ore (MIO) (locally veined). **f)** Sulfide breccia (SB).

**Table 5.2:** Acronyms and their meaning used for lithotypes at the Minerita deposit (this study).

<b>Lithotypes acronyms</b>	<b>Meaning</b>
QI	Quartz itabirite
QVQI	Quartz-veined quartz itabirite
IB	Itabirite breccia
QVIO	Quartz-veined high-grade iron ore
MIO	Massive high-grade iron ore
SB	Sulfide breccia

The mineralogical composition of all lithotypes includes iron oxides, quartz and a wide range of accessory minerals, with sulfides present only in the breccia (Table 5.3). The QI is characterized by a higher amount of martite, kenomagnetite and recrystallized quartz than all other lithotypes; it



also contains magnetite, goethite and muscovite. The QVQI shows a higher amount of anhedral and microplaty hematite, vein quartz, and a less recrystallized quartz than QI, with subordinate muscovite, grunerite and chlorite. The IB presents a reduction in the amount of recrystallized quartz, with similarities in the content of kenomagnetite, martite, anhedral, platy and microplaty hematite, vein quartz and muscovite compared with QVQI. The QVIO shows a higher amount of anhedral hematite and vein quartz, and less microplaty hematite and recrystallized quartz than itabirites, with muscovite and grunerite. The MIO presents similarities between the content of anhedral hematite with QVIO; between the minerals kenomagnetite, martite, platy and microplaty hematite with the itabirites; and absence of recrystallized quartz in the rock. Subhedral hematite, pyrite, chalcopyrite, fine- and medium-grained carbonate are identified in the SB. This breccia also holds up to 20 % of magnetite, and reduced amount of all other iron oxides described in the remaining rock types.

**Table 5.3:** Mineralogical composition of lithotypes organized by set of thin sections.

Classification	Drill hole	Thin sections	Minerals	
			Opaque	Transparent
Quartz itabirite (QI)	FD021	001 and 002	Keno, Mar, AHem, MpHem	Qtz, VQtz
	FD028	001, 002 and 007	MagI, Keno, Mar, AHem, PHem, MpHem, Gt	Qtz, VQtz, Ms
	FD029	001	Keno, Mar, AHem, MpHem	Qtz, Ms
	FD055	001	Keno, Mar, MpHem	Qtz, VQtz, Ms
	FD028	003 and 005	Keno, Mar, AHem, PHem, MpHem	Qtz, VQtz, Ms
Quartz-veined anhedral quartz itabirite (QVQI)	FD029	002, 005 and 006	Keno, Mar, AHem, MpHem	Qtz, VQtz, Gru, Chl
	FD055	002 and 003	Keno, Mar, AHem, PHem, MpHem	Qtz, VQtz
Itabirite breccia (IB)	FD021	003, 005 and 008	Keno, Mar, AHem, MpHem	Qtz, VQtz
	FD028	004 and 008	Keno, Mar, AHem, PHem, MpHem	Qtz, VQtz
	FD029	003 and 011	Keno, Mar, AHem, MpHem	Qtz, VQtz, Ms
	FD055	004	Keno, Mar, AHem, MpHem	Qtz, VQtz
	FD021	009 and 010	Keno, Mar, AHem, MpHem	Qtz, VQtz, Gru
Quartz-veined high-grade iron ores (QVIO)	FD029	009	Keno, Mar, AHem, MpHem	Qtz, VQtz
Massive high-grade iron ore (MIO)	FD021	006	Keno, Mar, AHem, PHem, MpHem	VQtz
Sulfide breccia (BS)	FD048	001	MagII, Keno, Mar, SHem, AHem, PHem	Qtz, Cb, Gru, Ms
	FD052	001, 003, 005, 006 and 007	MagII, Keno, Mar, SHem, AHem, PHem, MpHem, Py, Cpy	Qtz, VQtz, Cb, MCb, Gru, Tur

MagI = itabirite magnetite; MagII = hydrothermal magnetite; Keno = kenomagnetite; Mar = martite; SHem = subhedral hematite; AHem = anhedral hematite; PHem = platy hematite; MpHem = microplaty hematite; Gt = goethite; Py = pyrite; Cpy = chalcopyrite; Qtz = recrystallized quartz; VQtz = vein quartz; Cb = fine carbonate; MCb = medium carbonate; Ms = muscovite; Gru = grunerite; Chl = chlorite; Tur = tourmaline.

#### 5.4.1.1. Mineralogical characteristics

Rare itabirite magnetite (MagI), formed during the recrystallization of the itabirites, dominates as subhedral, fine to medium- grained, with moderate intragranular porosity (Fig. 5.6a) in QI. It shows substitution texture with formation of martite (Fig. 5.6a). On the other hand, hydrothermal magnetite (MagII) is present in SB (Figs. 5.6b, c, d), where it is posterior to the other iron oxides. The hydrothermal magnetite is subhedral to anhedral, fine to medium- grained, commonly presenting

larger grain size than martite and anhedral hematite of itabirites and iron ores, and moderate intragranular porosity. It shows substitution texture with formation of subhedral hematite (Fig. 5.6b) and pyrite depends on magnetite to grow, with anhedral hematite in the edges of the sulfide (Fig. 5.6d).

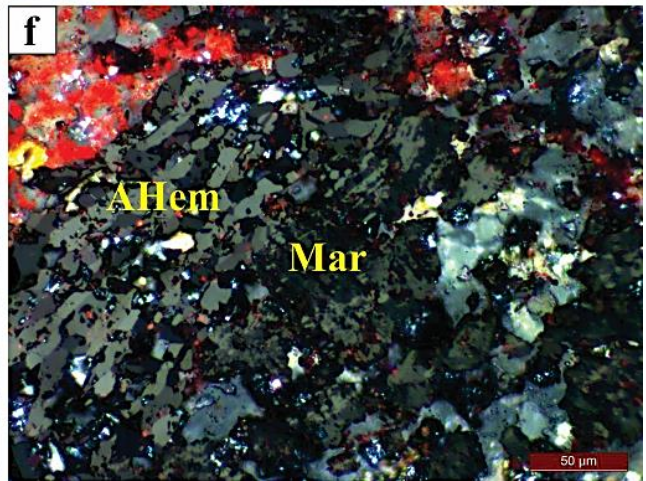
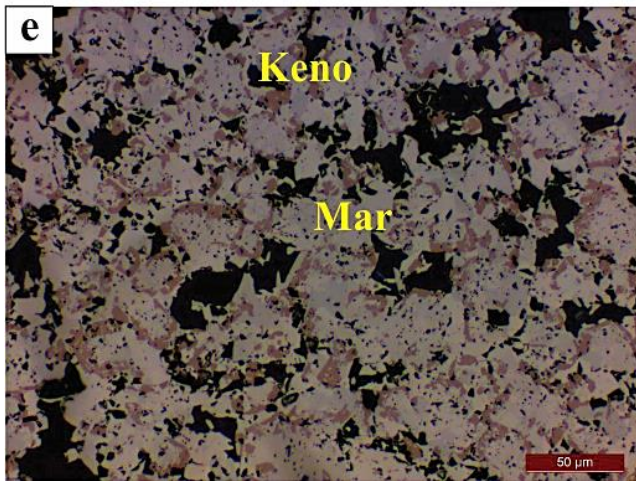
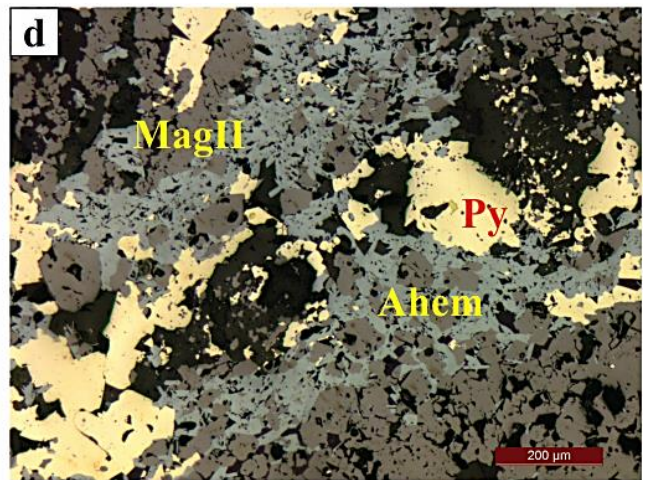
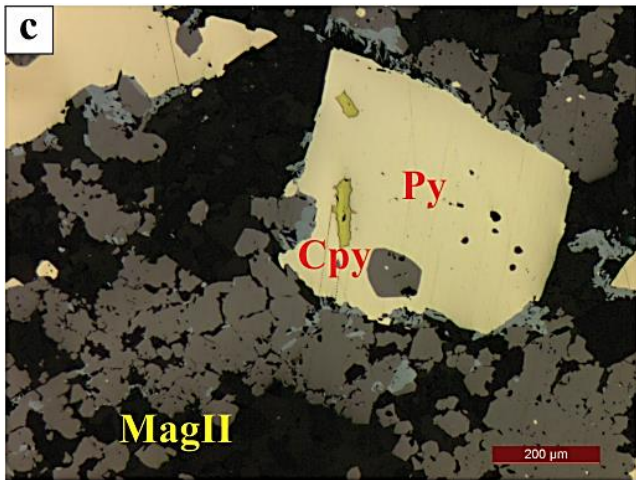
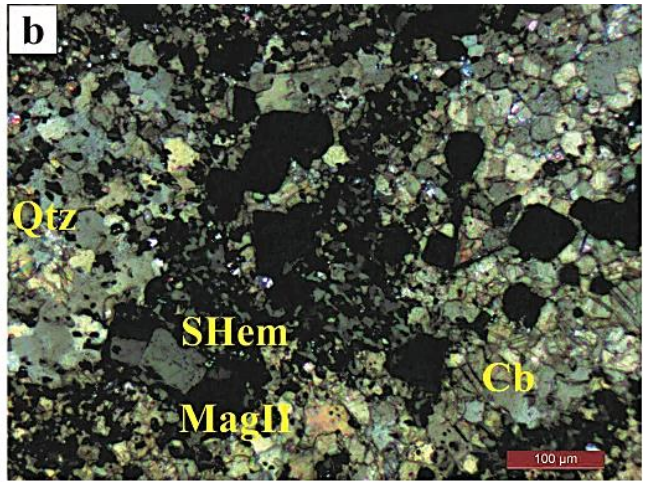
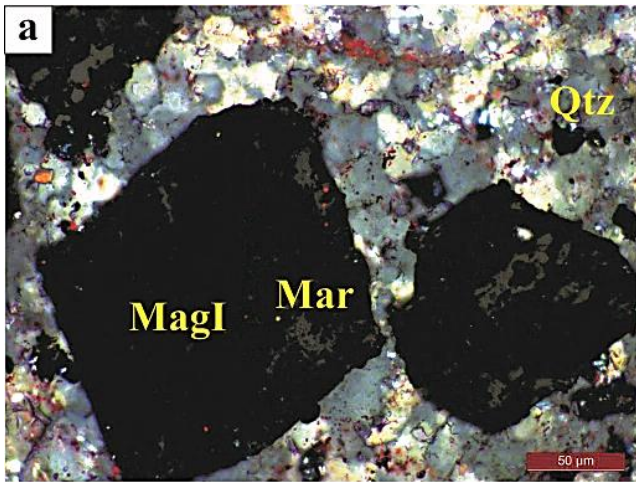
In general, kenomagnetite (Keno) is anhedral, very fine grained, and occurs as a relic within martite and magnetite (Fig. 5.6e). Very fine to fine-grained, euhedral to subhedral martite (Mar) (Fig. 5.6f) presents high intragranular porosity, and likely originates anhedral hematite (Fig. 5.6f). Very fine to fine-grained anhedral hematite (AHem) is xenoblastic, with interlobate contacts (Fig. 5.6f), and moderate intragranular porosity where in itabirites. Fine-grained, subhedral hematite (SHem), in SB (Fig. 5.6b), is subidioblastic, with low intragranular porosity. Very fine to fine-grained platy (PHem) and microplaty (MpHem) hematite are tabular, euhedral to subhedral (Figs. 5.6g, h), with low intragranular porosity, and seem to overgrow martite and anhedral hematite (Figs. 5.6g, h). Platy hematite seems to result from anhedral hematite (Fig. 5.6h). Microplaty hematite exhibits radial texture in QVQI and MIO.

Goethite (Gt) is only found in one thin section, as xenoblastic, medium- grained, and shows high intragranular porosity. It is found isolated in QI, with no relation to other iron oxides.

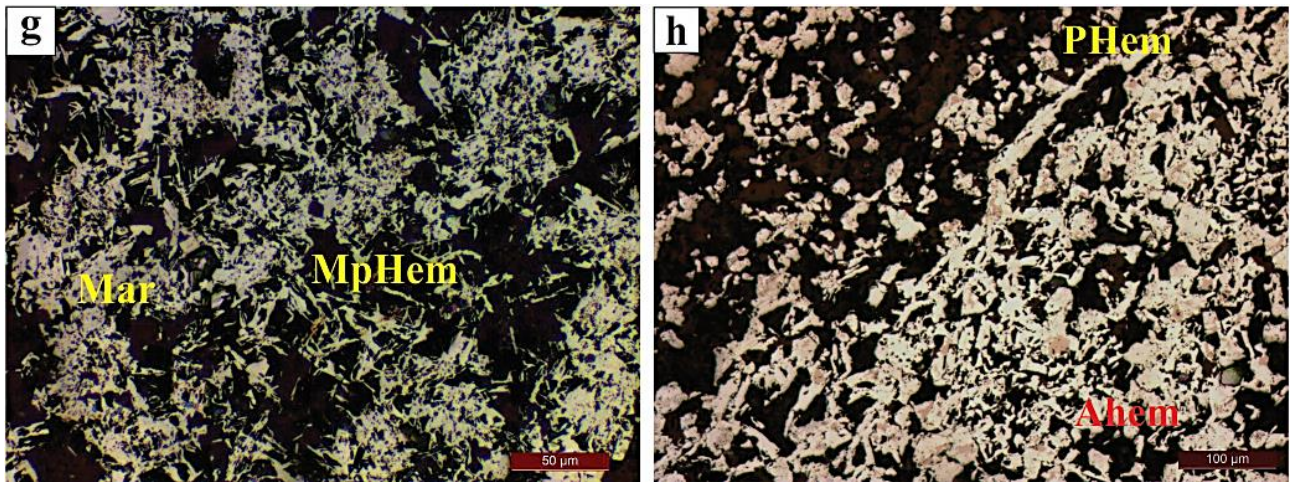
Both pyrite (Py) and chalcopyrite (Cpy) in SB have low to high intragranular porosity, respectively. The former is more abundant, subhedral to anhedral (Figs. 5.6c, d), fine to medium-grained. Fine-grained chalcopyrite is anhedral, usually included in pyrite (Fig. 5.6c).

Two types of quartz are discriminated: matrix recrystallized quartz (Qtz) and vein quartz (VQtz). Both present wavy extinction, and may be smoky due to the amount of diminished fluid inclusions. Very fine to fine-grained, recrystallized quartz is anhedral; in turn, vein quartz is euhedral to subhedral, fine to medium- grained. Both quartz and grunerite (Gru) may all display a radial texture (Figs. 5.7a, b). Comb-textured quartz is also observed (Fig. 5.7c).

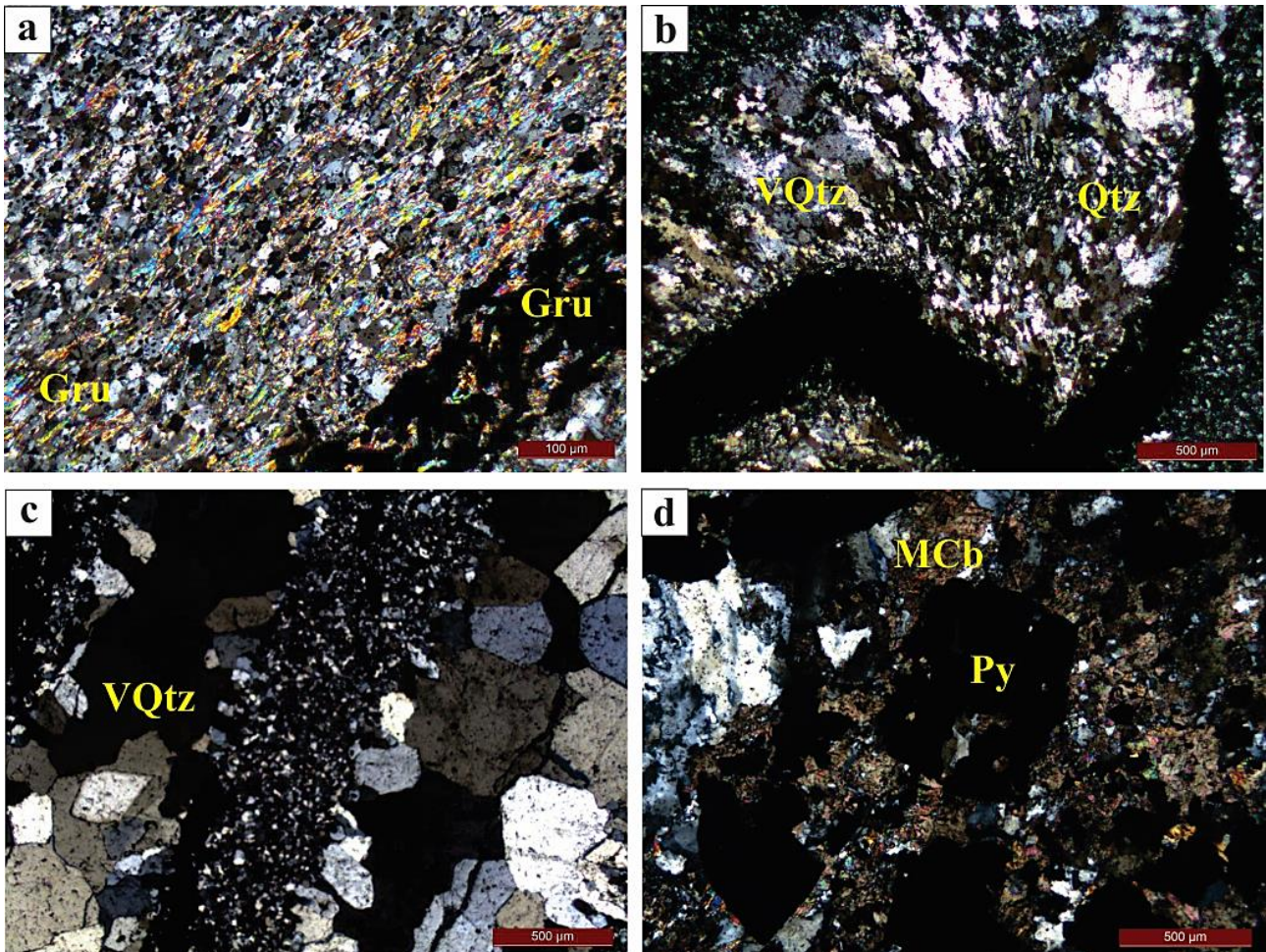
Very fine to fine-grained muscovite, grunerite, chlorite and tourmaline are euhedral to anhedral and isolated in bands of quartz, with grunerite also in small amounts in veins (Fig. 5.7a). There is a higher amount of grunerite in SB than in other lithotypes. Fine- and medium-grained carbonate (Cb and MCb) is anhedral, and shows moderate intragranular porosity. Carbonate also forms veins in SB, along with vein quartz, hydrothermal magnetite, anhedral hematite, pyrite and chalcopyrite. Pyrite locally grows at the expense of carbonate (Fig. 5.7d).







**Figure 5.6:** Photomicrographs of iron oxides and sulfides, and their substitution textures in itabirites, high-grade iron ores and sulfide breccia (Table 5.3). **a)** Quartz itabirite showing the initial formation of martite (Mar) from itabirite magnetite (MagI), surrounded by recrystallized quartz matrix (Qtz). **b)** Sulfide breccia where subhedral hematite (SHem) is formed from hydrothermal magnetite (MagII), in a quartz-carbonate matrix (Qtz-Cb). **c)** Chalcopyrite (Cpy) within pyrite and hydrothermal magnetite (MagII) in sulfide breccia. **d)** Pyrite (Py) and anhedral hematite (AHem) formed after hydrothermal magnetite (MagII) in sulfide breccia. **e)** Kenomagnetite (Keno) in martite (quartz-veined high-grade iron ore). **f)** Anhedral hematite (AHem) formed from martite (itabirite breccia). **g)** Microplaty hematite (MpHem) from martite (quartz itabirite). **h)** Kenomagnetite (Keno), platy hematite (PHem) from anhedral hematite (AHem1) in sulfide breccia. Reflected light, uncrossed nicols: **c, d, e, g** and **h**; reflected light, crossed nicols: **a, b,** and **f**.



**Figure 5.7:** Photomicrographs of silicates, and their textures, in itabirites and sulfide breccia (Table 5.3). **a)** Grunerite (Gru) with radial texture in band of quartz and in vein of iron oxide in sulfide breccia. **b)** Recrystallized quartz (Qtz), and vein quartz (VQtz) with radial texture (quartz-veined quartz itabirite). **c)** Comb-textured vein quartz (VQtz) (quartz-veined quartz itabirite). **d)** Pyrite (Py) developed after medium carbonate (MCh) in a vein with quartz, carbonate, hydrothermal magnetite, anhedral hematite, pyrite and chalcopyrite (sulfide breccia). Reflected light, crossed nicols: **a, b, c** and **d**.



## 5.4.2. Fluid inclusion analysis

### 5.4.2.1. Vein system

Vein systems are classified following criteria proposed by Robert and Poulson (2001), which considers host structure, geometry and internal features of veins. In this classification veins, and vein groups, are divided into: (i) fault-fill; (ii) extensional and oblique-extensional; (iii) extensional vein array; (iv) stockwork; and (v) breccia-style veins.

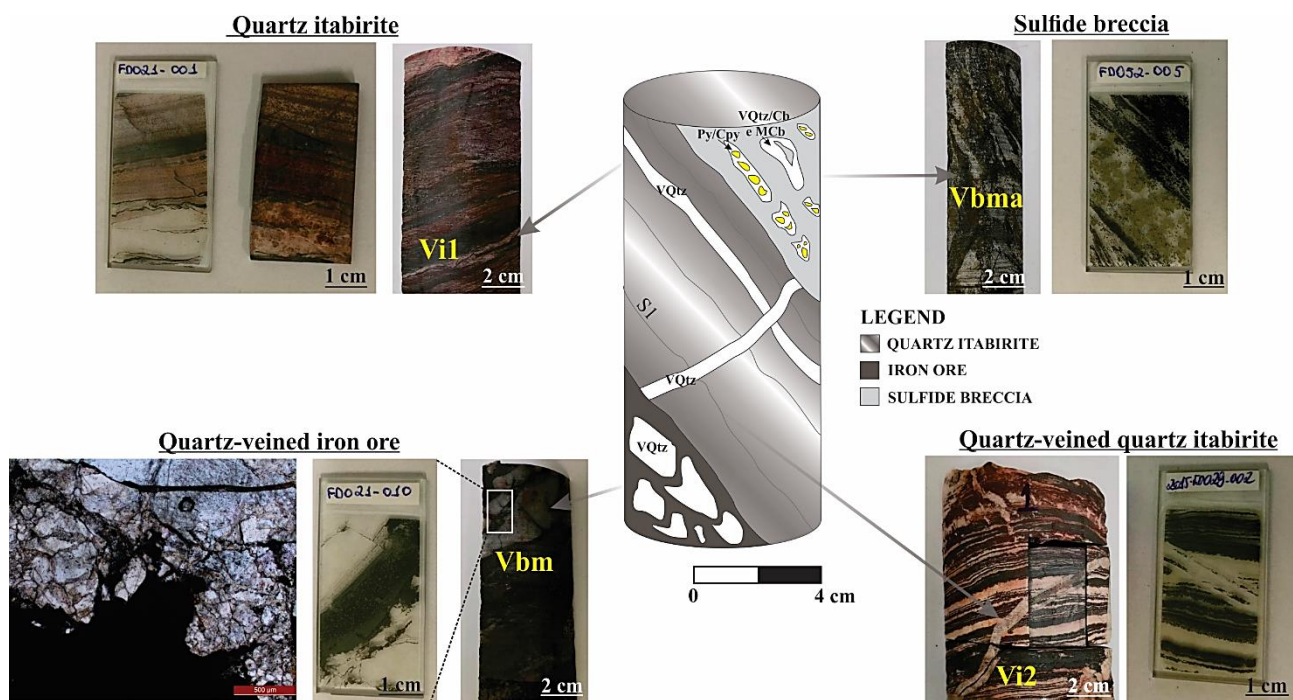
Most veins in the Minerita deposit are extensional, oblique-extensional and breccia-style, and are classified as Vi1, Vi2 and Vb3, respectively. Extensional veins are abundant in all lithotypes, while breccia-style veins are common in quartz-veined quartz itabirite (QVQI), quartz-veined high-grade iron ore (QVIO) and in sulfide breccia (SB) (Table 5.4) (Fig. 5.8). Extensional veins evolve into oblique-extensional and into breccia-style (Fig. 5.8).

In addition to vein quartz, veins may also have carbonate, sulfides and subordinate iron oxides in SB. In QVIO and SB, vein quartz is subhedral, fine to medium- grained, either clear or smoky, with wavy extinction. In SB, carbonate and sulfides are subhedral to anhedral and fine to medium-rained. Hydrothermal magnetite is subhedral to anhedral, fine to medium- grained, while anhedral hematite is very fine to fine- grained.

**Table 5.4:** Vein system in the Minerita deposit indicating the main control structures, minerals, geometry and attitude of layers. Classification adapted from Robert and Poulsen (2001).

Vein systems	Sub-groups	Lithotypes	Control structures	Minerals		Attitude	Geometry	Classification
				Main	Accessories (< 5%)			
Vi1	-	QI QVQI	concordant S1	VQtz	-	NE-SW; 20° to 90° SW	tabular to folded	extensional
Vi2	-	all lithotypes	discordant S1	VQtz	-	varied	tabular to folded	oblique- extensional
	Vbi	IB	-	VQtz	-	-		
Vb3	Vbm	QVIO	-	VQtz	-	-	massive	breccia-style
	Vbma	SB	-	VQtz, Cb, MCb	Py, Cpy, MagII and AHem	-		

QI = quartz itabirite; QVQI = quartz-veined quartz itabirite; IB = itabirite breccia; QVIO = quartz-veined high-grade iron ore; SB = sulfide breccia; Vi1 = extensional veins; Vi2 = oblique-extensional veins; Vb3 = breccia veins; Vbi = breccia veins in IB; Vbm = breccia veins in QVIO; Vbma = breccia veins in SB; MagII = hydrothermal magnetite; AHem = anhedral hematite; Py = pyrite; Cpy = chalcopyrite; VQtz = vein quartz; Cb = fine carbonate; MCb = medium carbonate.



**Figure 5.8:** Schematic drill hole illustration showing intersection relationships of the various types of veins in itabirites, iron ore and sulfide breccia. Detail for quartz-veined iron ore and the quartz crystals analyzed in the study. Vi1 = extensional veins; Vi2 = oblique-extensional veins; Vbm = breccia-style veins in QVIO; Vbma = breccia-style veins in SB; Py = pyrite; Cpy = chalcopyrite; VQtz = vein quartz; Cb = fine carbonate; MCb = medium carbonate.

#### 5.4.2.2. Fluid inclusion assemblages (FIAs) and types of fluid inclusions

The fluid inclusions (FIs) analyzed in high-grade iron ore can provide information about the physicochemical characteristics of the fluids involved in the itabirites enrichment. For this, FIs of eight vein quartz crystals were analyzed (VQtz 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 and 8) from the Vbm vein (sample FD021-010) (Fig. 5.8), hosted in a sample of quartz-veined high-grade iron ore. It is smoky, fine-grained, subhedral quartz, with wavy extinction. Vein is classified as breccia and does not show a preferential orientation. The FIs are very small, below 10  $\mu\text{m}$ , and their description and classification are difficult.

Most FIs are interpreted as secondary, with some occurring isolated while others are in groups (Table 5.5), according to criteria proposed by Roedder (1984), Shepherd et al. (1985) and Goldstein and Reynolds (1994). Isolated FIs cannot be defined as primary because growth surfaces are not identified in quartz due to recrystallization and later deformations. Therefore, isolated FIs can be the result of secondary trails.

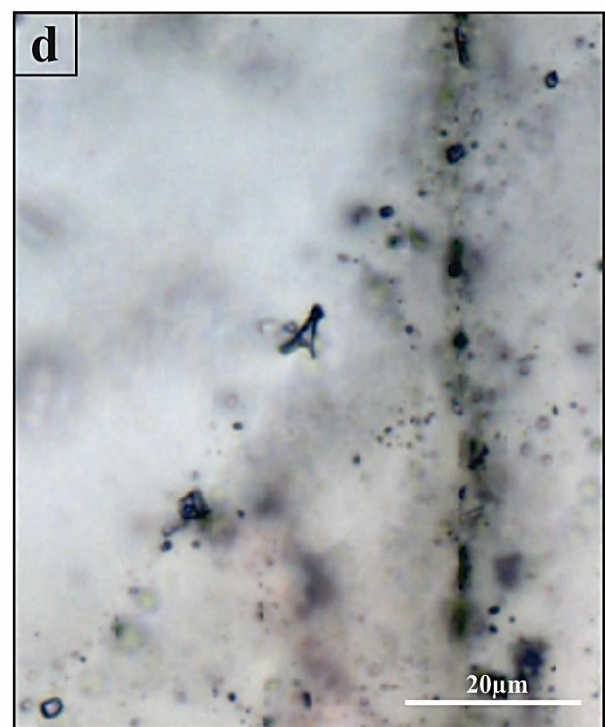
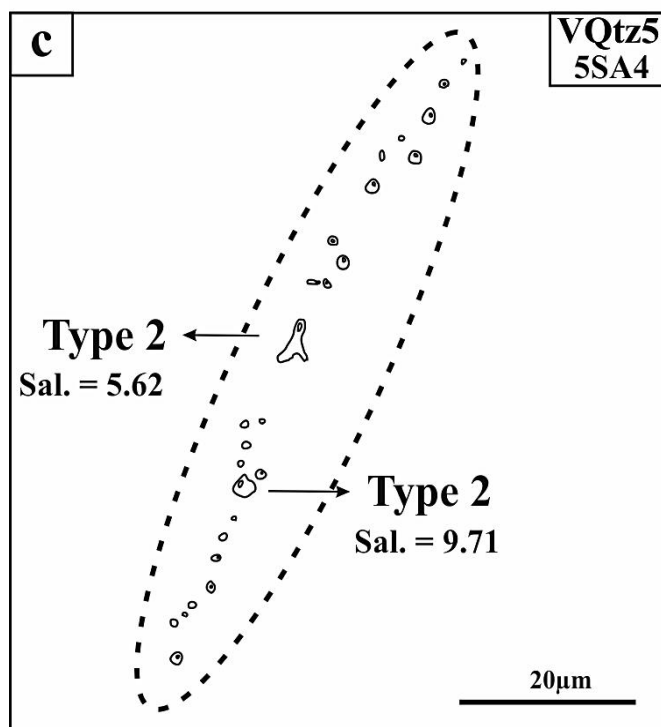
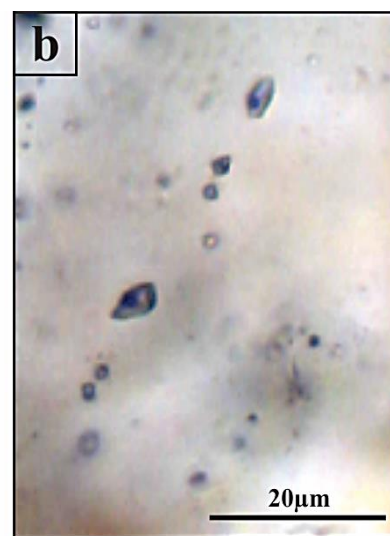
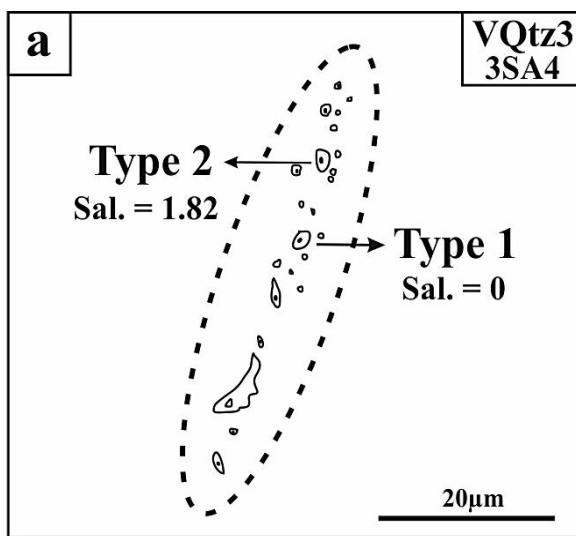
These are biphasic (liquid + vapor), aqueous-saline FIs. They are rounded, elongated-rounded and irregularly- rounded, with a gas volume of 2 % and area of 7.4 %.

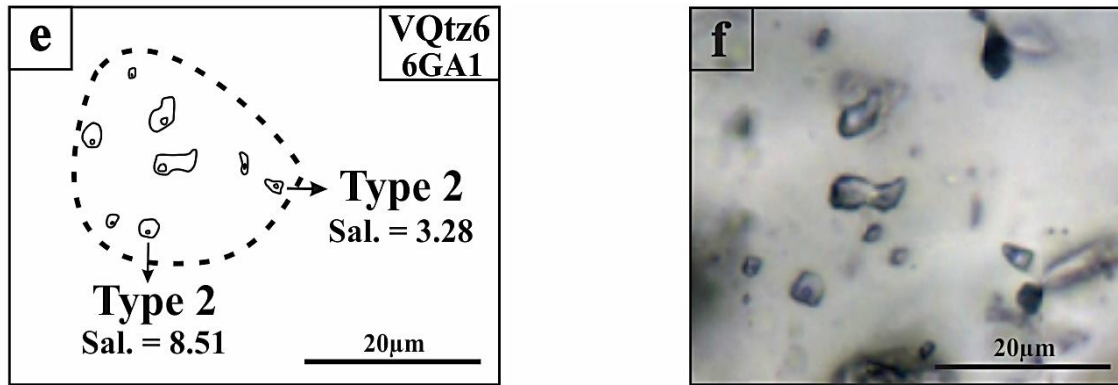
A total of 44 FIs are separated in 32 FIAs based on the origin of FIs and their petrographic characteristics (Table 5.5) (Fig. 5.9). With the salinity results of the microthermometry analysis, two

types of inclusion were classified (Table 5.5) (Fig. 5.9): types 1 and 2. Both are located along within the same FIA.

Type 1 inclusions are non-saline, aqueous, biphasic (liquid + vapor), secondary, show an elongated-rounded to irregular shape (Table 5.5) (Fig. 5.9b). They represent approximately 10 % of FIs analyzed.

Types 2 inclusions are aqueous-saline, biphasic (liquid + vapor), secondary, occur either in groups or isolated, and exhibit rounded to irregular shape. It presents low to moderate salinity, which range between 1 and 15 % in weight of NaCl eq. (Table 5.5) (Figs. 5.9b, d, f). They represent approximately 90 % of FIs analyzed.





**Figure 5.9:** Examples of types 1 and 2 fluid inclusions in vein quartz (VQtz) analyzed using transmitted light photomicrographs (**b, d** and **f**; uncrossed nicols), and drafts/maps. **a)** Map of secondary FIA 3SA4 with type 1 inclusion (non-saline, aqueous, biphasic (L+V), elongated-rounded); and type 2 inclusion (aqueous-saline, biphasic (L+V), elongated-rounded, salinity of 1.82 % in weight of NaCl eq.). **b)** Photomicrograph of types 1 and 2 inclusions FIA 3SA4. **c)** Map of secondary FIA 5SA4 with type 2 inclusion (aqueous-saline, biphasic (L+V), elongated to irregular, salinity of 5.62 and 9.71 % in weight of NaCl eq.). **d)** Photomicrograph of type 2 inclusions in FIA 5SA4. **e)** Map of group FIA 6GA1 with type 2 inclusions (aqueous-saline, biphasic (L+V), elongated-rounded and rounded, salinity of 3.28 and 8.51 % in weight of NaCl eq.). **f)** Photomicrograph of type 2 inclusions in 6GA1. Sal = salinity in % in weight of NaCl eq.

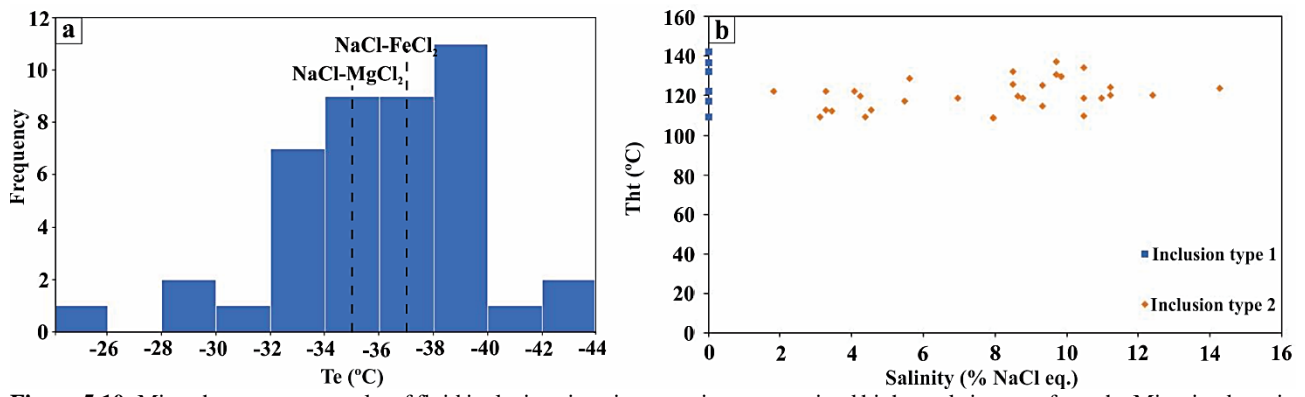
#### 5.4.2.3. Microthermometry

The eutectic temperature ( $T_e$ ) ranges between  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , with some exceptions ( $-29.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-41.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-44\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Table 5.5). Final ice melting temperature ( $T_{mIce}$ ) is between  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  with clathrate melting temperatures ( $T_{clath}$ ) between  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Table 5.5), suggesting the presence of gas mixed to the aqueous portion of the inclusion (Goldstein and Reynolds, 1994). Measurements of  $T_{clath}$  were conducted in few FIs (five specimens). They present  $T_e < -50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , without halos of  $\text{CO}_2$ , which may be due to the diminished size ( $\approx 8\text{ }\mu\text{m}$ ) and smoky aspect of the FIs. Thus, salinity was not calculated for these cases.

Total homogenization temperature ( $Th_t$ ) is between  $108\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $142\text{ }^{\circ}\text{C}$ , with a predominance of values between  $108\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Table 5.5). Homogenization is from vapor to liquid ( $V \rightarrow L$ ). The FIs do not present great variations in the volume proportion of vapor and liquid, which suggests that neither immiscibility nor boiling occurred (Bodnar et al., 1985). Therefore,  $Th_t$  corresponds to the minimal trapping temperatures of inclusions and must be corrected. Since there is no geothermometer for the formation of high-grade iron ores in the southwestern portion of the Serra do Curral, the correction of  $Th_t$  and estimates of pressure of formation from isochrones were not conducted.

According to eutectic temperatures, the main saline systems present are  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{MgCl}_2$  ( $T_e = -35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Goldstein and Reynolds, 1994) (Fig. 5.10a) and  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{FeCl}_2$  ( $T_e = -37\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Goldstein and Reynolds, 1994) (Fig. 5.10a). The saline system  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  (KCl), available in the MacFlinCor software, was used to calculate percentage of salinity in weight of NaCl eq. (Table 5.5) (Fig. 5.10b).





**Figure 5.10:** Microthermometry results of fluid inclusions in vein quartz in quartz-veined high-grade iron ore from the Minerita deposit. **a)** Histogram showing the frequency of eutectic temperature (Te) and saline systems H<sub>2</sub>O-NaCl-MgCl<sub>2</sub> (Te = -35 °C) and H<sub>2</sub>O-NaCl-FeCl<sub>2</sub> (Te = -37 °C). **b)** Graph of salinity versus total homogenization temperature (Th<sub>t</sub>) with discrimination of types of FIs.

**Table 5.5:** FIAs and types of FIs identified according to petrographic and salinity characteristics, and microthermometry results for vein quartz in quartz-veined high-grade iron ore from the Minerita.

Crystal	FI	n	Types FIs	FIAs	Genesis	Phases	Te (° C)	TmIce (° C) <sup>(*)</sup>	Tclath (° C) <sup>(**)</sup>	Th <sub>li</sub> (° C) <sup>(***)</sup>	Salinity (wt % NaCl eq.)	
VQtz1	1S1	2	2	1SA1	secondary	biphase (L+V)	-36.6	-7	-	109.9	10.48	
			2				-37.3	-2.7	-	109.2	4.39	
	1S2	1	2	1SA2	secondary	biphase (L+V)	-35.5	-7.4	-	118.6	10.98	
	1S3	1	2	1SA3	secondary	biphase (L+V)	-37	-3.4	-	117.4	5.47	
VQtz2	2S1	1	1	2SA1	secondary	biphase (L+V)	-37.7	0	-	117.4	0	
	2I1	1	2	2IA2	-	biphase (L+V)	-29.8	-6.1	-	125.4	9.32	
VQtz3	3S1	1	2	3SA1	secondary	biphase (L+V)	-35.6	-2.8	-	112.6	4.55	
	3S2	1	1	3SA2	secondary	biphase (L+V)	-38.2	0	-	109.4	0	
	3S3	1	2	3SA3	secondary	biphase (L+V)	-38.6	-1.9	-	109.4	3.12	
		3S4	2	1	3SA4	secondary	biphase (L+V)	-32.2	0	-	122	0
			2				-32.2	-1.1	-	122	1.82	
VQtz4	4S1	2	2	4SA1	secondary	biphase (L+V)	-38.6	-6.4	-	137	9.71	
			1				-32.3	0	-	136.5	0	
	4S2	1	-	4SA2	secondary	biphase (L+V)	-32.8	-	3.9	132.8	-	
	4S3	2	1	4SA3	secondary	biphase (L+V)	-36.7	0	-	142	0	
				-			-33.1	Clath.	3.8	142	-	
	4S4	1	-	4SA4	secondary	biphase (L+V)	-32	-	2.5	112.2	-	
	4S5	2	2	4SA5	secondary	biphase (L+V)	-31.8	-6.5	-	129.9	9.84	
			2				-35.5	-6.5	-	129.9	9.84	
VQtz5	5S1	1	2	5SA1	secondary	biphase (L+V)	-39.7	-5.1	-	108.7	7.96	
	5S2	1	2	5SA2	secondary	biphase (L+V)	-38	-5.1	-	108.7	7.96	
	5S3	1	2	5SA3	secondary	biphase (L+V)	-35	-7	-	134.2	10.48	
		5S4	2	2	5SA4	secondary	biphase (L+V)	-38.5	-6.4	-	130.7	9.71
				2				-33	-3.5	-	128.8	5.62
		5S5	1	2	5SA5	secondary	biphase (L+V)	-35.6	-5.5	-	132.2	8.51
	5S6	1	1	5SA6	secondary	biphase (L+V)	-38.9	0	-	132.2	0	
VQtz6	6G1	2	2	6GA1	-	biphase (L+V)	-39.8	-5.5	-	125.6	8.51	
			2				-36.3	-2	-	122.1	3.28	
	6I1	1	2	6IA2	-	biphase (L+V)	-35.4	-2.1	-	112.5	3.44	
	6I2	1	2	6IA3	-	biphase (L+V)	-37.7	-2.5	-	122.2	4.07	
	6I3	1	-	6IA4	-	biphase (L+V)	-35.4	-	2.3	122.2	-	
VQtz7	7G1	2	2	7GA1	-	biphase (L+V)	-29.8	-7.6	-	120.1	11.22	
			2				-37.3	-8.6	-	120.3	12.4	
	7S1	1	2	7SA2	secondary	biphase (L+V)	-39.2	-10.3	-	123.8	14.26	
	7S2	1	2	7SA3	secondary	biphase (L+V)	-35.8	-7.6	-	124.3	11.22	
	7S3	1	2	7SA4	secondary	biphase (L+V)	-41.2	-2	-	112.7	3.28	
				2				-39.7	-7	-	118.6	10.48
	7S4	3	2	7SA5	secondary	biphase (L+V)	-44	-5.7	-	118.6	8.78	
			2				-44	-4.4	-	118.6	6.96	
VQtz8	8I1	1	2	8IA1	-	biphase (L+V)	-35.6	-6.1	-	114.7	9.32	
	8S1	2	2	8SA2	secondary	biphase (L+V)	-36.9	-5.6	-	119.8	8.65	
			2				-24	-2.6	-	119.8	4.23	
	8S2	1	-	8SA3	secondary	biphase (L+V)	-39.5	-	4.4	113.9	-	

<sup>(\*)</sup>precision of ± 0.1 °C; <sup>(\*\*)</sup> other type of IF don't analyzed here; <sup>(\*\*\*)</sup>precision of ± 1.0 °C.

VQtz = vein quartz; n = number of inclusions analyzed; FIs = fluid inclusions; I = isolated fluid inclusion; G = fluid inclusions in group; S = secondary fluid inclusions; A = assemblage; FIAs = fluid inclusion assemblages; Te = eutectic temperature; TmIce = final ice melting temperature; Tclath. = clathrate melting temperature; Th<sub>li</sub> = total homogenization temperature for liquids.

### 5.4.3. LA-ICP-MS in iron oxides

Detection and quantification of trace and rare earth elements in iron oxides has been increasingly used to study the genesis of various deposits (e.g. Oliveira, 2015). The concentration of elements Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Zn, Ga, Pb and rare earth elements (REEs) were measured under this premise. In this study, elements Mg to Ga are discriminators for magnetite and hematite (Lindsley, 1976; Nadoll et al., 2014). The concentration of Pb was also measured in order to obtain information on the gains and losses of chalcophile elements in iron oxides (Nadoll et al., 2014). REEs were normalized to the Post-Archean Australian Shale (PAAS) (McLennan, 1989) for itabirites and iron ore, and normalized to Chondrite (CN) (Nakamura, 1974) for sulfide breccia. The anomalies were calculated based on Bau and Dulski (1996) (itabirites and iron ore) and Taylor and McLennan (1985) (sulfide breccia).

Table 5.6 and Table 5.7 presents minimum, maximum, mean and standard deviation values of discriminating elements, Pb and REEs, for all iron oxides analyzed in samples of quartz itabirites (QI, QVQI and IB; acronyms in Table 5.2), massive iron ore (MIO) and sulfide breccia (SB). Mineral chemistry is described from oxides that experienced the least hydrothermal alteration (kenomagnetite) to those that are already completely modified (anhedral hematite). Concentrations of these elements in each type of iron oxide are compared, with those in SB discussed separately.

#### 5.4.3.1. Kenomagnetite

Kenomagnetite (Keno) in QVQI itabirite and in the iron ore MIO were analyzed. They have high concentrations of Mg (200-950 ppm), Al (140-340 ppm), Ti (30-100 ppm), V (25-85 ppm) and Mn (75-210 ppm), with higher values of Al, and lower values of Ti, V and Mn, in MIO (Fig. 5.11). The Cr shows low concentrations in both (up to 14 ppm). Cobalt, Zn and Ga present values below 10 ppm, with an increase for MIO (Fig. 5.11). Lead varies up to 4 ppm, and REEs up to 2 ppm, except for Y (up to 7 ppm), which is enriched in QVQI (Table 5.7).

The normalization of REEs to PAAS (Fig. 5.12a) in kenomagnetite in QVQI and MIO shows enrichment of heavy rare earth elements (HREEs) compared with the light rare earth elements (LREEs) ( $\text{La/Yb}_{\text{PAAS (mean)}} = 0.09$  and  $0.09$ ) (Table 5.8). The mean value of  $\Sigma\text{REEs} + \text{Y}$  ranges between 2.44 and 12.34 ppm. Positive anomalies are observed for La (Fig. 5.12a); for Y in kenomagnetite in QVQI (Fig. 5.12a); and for Pr ( $\text{Pr/Pr}^*_{\text{PAAS (max.)}} = 1.15$  and  $1.70$ ); and negative anomalies are found for Ce ( $\text{Ce/Ce}^*_{\text{PAAS (mean)}} = 0.31$  and  $0.33$ ) (Table 5.8). The Y/Ho ratio is  $< 35$  in most cases (Table 5.8), and is between the 24 to 34 interval defined by Bau (1996) for primitive chondrites (“CHARAC” – CHArge and RAdius Control).

### 5.4.3.2. *Martite*

Martite (Mar) in QI, QVQI, IB and MIO has variable concentrations of Mg (44-812 ppm), Al (98-681 ppm), Ti (20-121 ppm), V (11-102 ppm) and Mn (18-344 ppm), with increasing values for V, and decreasing for Mg and Mn, for MIO (Fig. 5.11). The Cr presents low concentrations (up to 19 ppm), decreasing for MIO (Fig. 5.11). Cobalt and Zn show < 10 ppm, and Ga < 1 ppm. Cobalt and Zn are relatively constant, while Ga increases for MIO (Fig. 5.11). Lead ranges between 1 and 12 ppm, decreasing for MIO (Fig. 5.11). The REEs vary up to 3 ppm, except for Y (1-10 ppm), which is impoverished in MIO (Table 5.7).

Figure 5.12b clearly shows the enrichment in HREEs in relation to LREEs ( $La/Yb_{PAAS (mean)} = 0.17, 0.09, 0.16$  and  $0.08$ ) (Table 5.8). A higher enrichment in HREEs is observed in QVQI and MIO (Fig. 5.12b). The mean value of  $\Sigma REEs + Y$  ranges between 3.56 and 20.76 ppm (Table 5.8). Positive anomalies are observed for La (Fig. 5.12b); for Y in martite in QVQI and IB (Fig. 5.12b); for Eu in QI ( $Eu/Eu^*_{PAAS (max.)} = 1.40$ ); and for Pr in QI, QVQI and IB ( $Pr/Pr^*_{PAAS (max.)} = 2.54, 1.47$  and  $2.44$ ); while negative anomalies are found for Ce ( $Ce/Ce^*_{PAAS (mean)} = 0.64, 0.28, 0.53$  and  $0.30$ ) (Table 5.8). The Y/Ho ratio is < 35 in most cases, staying between 24 and 34, similar to kenomagnetite in QVQI and MIO (Table 5.8).

### 5.4.3.3. *Anhedral hematite (AHem)*

Anhedral hematite (AHem) in QI, QVQI, IB and MIO shows moderate concentrations of Mg (3-520 ppm), Al (135-750 ppm), Ti (7-75 ppm), V (22-135 ppm) and Mn (12-215 ppm), and a reduction in Mn for MIO (Fig. 5.11). The Cr presents high concentrations (3-47 ppm), with an increase in QI (Fig. 5.11). Zinc has values < 7 ppm; Co < 3 ppm; and Ga < 1 ppm. There is a reduction in Co for MIO (Fig. 5.11). Lead ranges between 0.4 and 9 ppm, with a reduction for MIO (Fig. 5.11). The REEs exhibit concentrations up to 3 ppm, except for Y (up to 10 ppm), which is impoverished in MIO, and La and Ce are enriched in QI and IB (Table 5.7). A gain is observed in Al, V, Cr, Zn and Ga, while there is a loss in Mg, Ti, Mn, Co and Pb (Fig. 5.11) when compared with martite.

Figure 5.12c shows an enrichment in HREEs in relation to LREEs ( $La/Yb_{PAAS (mean)} = 0.12, 0.05, 0.16$  and  $0.06$ ) (Table 5.8). The mean value of  $\Sigma REEs + Y$  ranges between 0.46 and 21.77 ppm (Table 5.8). Positive anomalies are detected for La (Fig. 5.12c); for Y in anhedral hematite in itabirites (Fig. 5.12c); for Eu in IB ( $Eu/Eu^*_{PAAS (max.)} = 1.19$ ); and for Pr in QI, IB and MIO ( $Pr/Pr^*_{PAAS (max.)} = 1.67, 2.29$  and  $1.99$ ); while negative anomalies are found for Ce ( $Ce/Ce^*_{PAAS (mean)} = 0.47, 0.20, 0.63$  and  $0.25$ ) (Table 5.8). The Y/Ho ratio is < 35 in most cases, and is again between 24 and 34, same interval defined for the other oxides (Table 5.8).

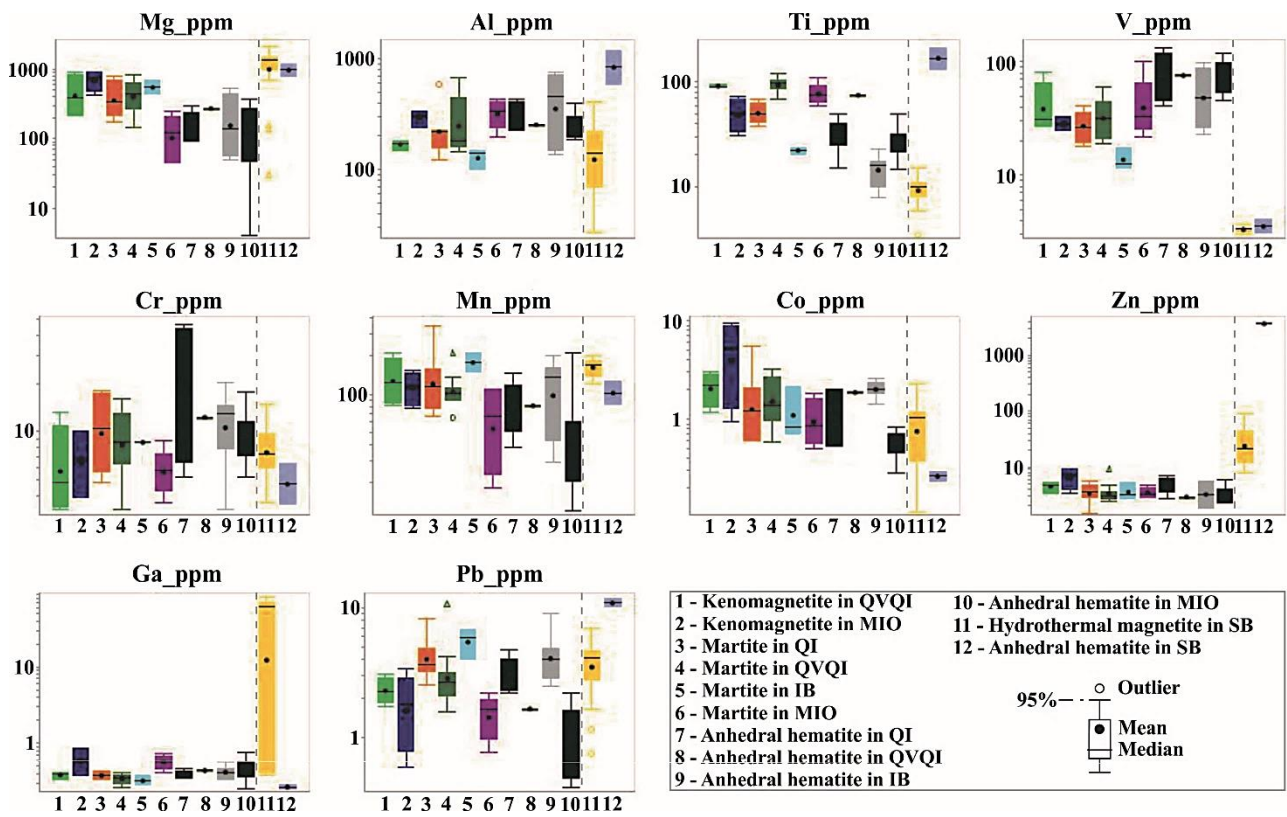


#### 5.4.3.4. *Iron oxides in sulfide breccia (SB)*

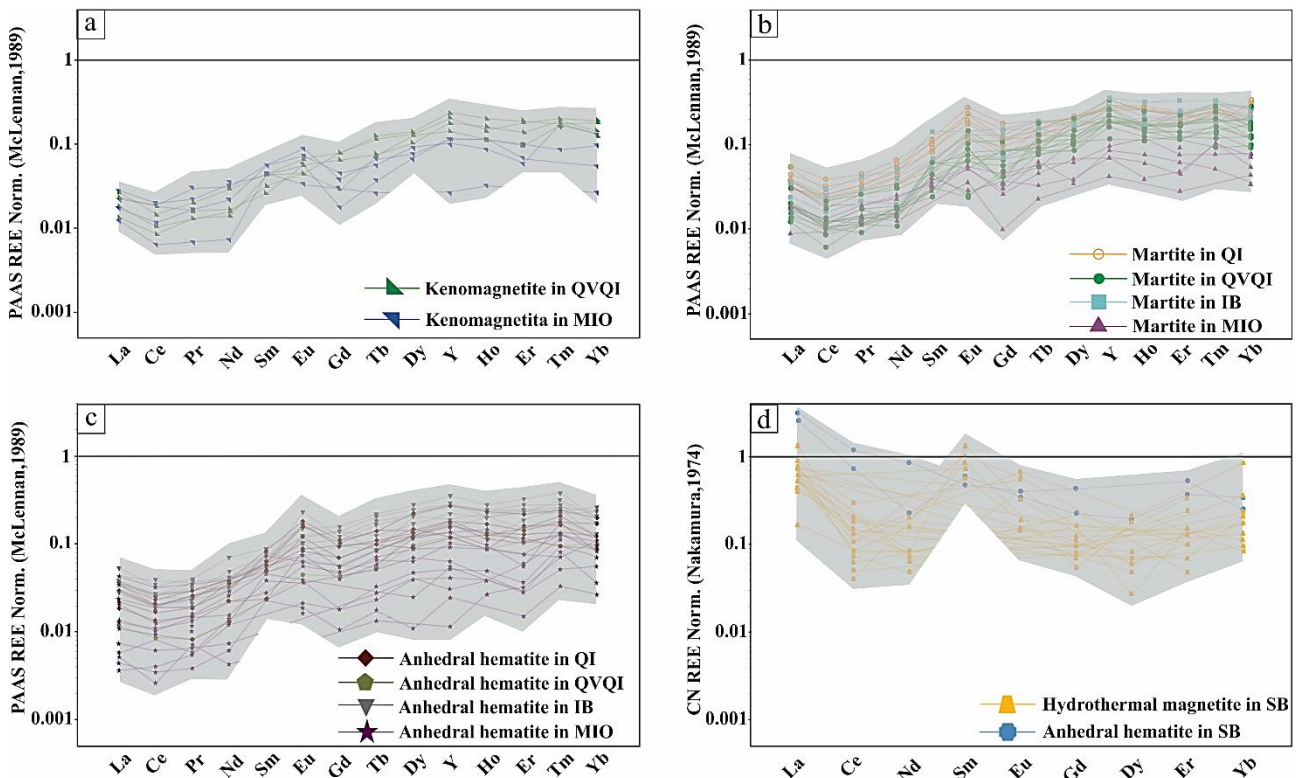
Hydrothermal magnetite (MagII) and anhedral hematite were analyzed in the SB. The hydrothermal magnetite has variable and high concentrations of Mg (28-2100 ppm) and Al (26-403 ppm), moderate concentrations of Mn (122-202 ppm), and low concentrations of Ti (3-16 ppm) and V (2-4 ppm) (Table 5.6). The Cr shows low concentrations, between 3 and 15 ppm. Zinc and Ga present high values, between 7 and 91 ppm and between 0.3 and 81 ppm, respectively. Cobalt exhibits concentrations below 2.5 ppm, and Pb is between 0.5 and 7 ppm. The REEs and Y have concentrations up to 1 ppm, with several results below the detection limit. There is also a higher concentration of Mg, Mn, Zn, Ga and Pb, and lower concentrations of Al, Ti, V, Cr and Co than the other iron oxides of itabirites and iron ore (Fig. 5.11).

Anhedral hematite, along with hydrothermal magnetite, shows high concentration of Mg (790-1200 ppm), Al (580-1200 ppm) and Ti (133-215 ppm), moderate concentration of Mn (82-127 ppm), and low concentration of V (3-5 ppm). There is enrichment in Al and Ti in comparison with data in hydrothermal magnetite (Fig. 5.11). The Cr presents low values, between 3 and 7 ppm. In turn, values of Zn are high, between 3500 and 3900 ppm (Table 5.6). Cobalt and Ga exhibit < 1 ppm, lower than hydrothermal magnetite (Fig. 5.11). Lead is between 10 and 12 ppm and increases comparatively to hydrothermal magnetite (Fig. 5.11). The REEs and Y show low concentrations, up to 2 ppm. Compared with kenomagnetite, martite and anhedral hematite in itabirites and iron ore, this anhedral hematite is enriched in Mg, Al, Ti and Zn, and impoverished in V, Cr, Mn, Co and Ga (Fig. 5.11).

Figure 5.12d shows an enrichment in LREEs in relation to HREE ( $La/Yb_{CN}(\text{mean}) = 0.95$  and 4.25) (Table 5.8) for hydrothermal magnetite and anhedral hematite. The mean values of  $\Sigma REEs + Y$  for the two types of oxides analyzed in SB range from 0.13 to 3.94 ppm (Table 5.8). Positive anomalies occur for La and Sm (Fig. 5.12d).



**Figure 5.11:** Box-and-whisker diagrams, in logarithmic scale, of discriminating elements, and Pb, for different types of iron oxides (1-12) from the various lithotypes analyzed at the Minerita deposit, obtained in ppm using the LA-ICP-MS technique (Table 5.6). Not that results for the sulfidic breccia are indicated to the right of the stippled vertical line. Upper and lower 50<sup>th</sup> percentile of the data are indicated to the right of the stippled vertical line. The whisker represents the 95<sup>th</sup> percentile of the upper and lower limits of values. The mean value is represented by solid black circles; the median, by solid black lines. QI = quartz itabirite; QVQI = quartz-veined quartz itabirite; IB = itabirite breccia; MIO = massive high-grade iron ore; SB = sulfide breccia.



**Figure 5.12:** Spider diagrams of REEs, shown ppm values, with data (values in Table 5.7) normalized to the PAAS (McLennan, 1989) for a) Kenomagnetite, b) Martite, c) Anhedral hematite in itabirites and iron ore, and to CN (Nakamura, 1974) for d) Hydrothermal magnetite and anhedral hematite in SB. QI = quartz itabirite; QVQI = quartz-veined quartz itabirite; IB = itabirite breccia; MIO = massive high-grade iron ore; SB = sulfide breccia.

**Table 5.6:** Summarized LA-ICP-MS results of discriminating elements and Pb (minimum, maximum, mean and standard deviation) for all iron oxides of the various lithotypes analyzed from the Minerita deposit. Data in ppm.

Lithotypes	Minerals		Mg <sup>24</sup>	Al <sup>27</sup>	Ti <sup>49</sup>	V <sup>51</sup>	Cr <sup>53</sup>	Mn <sup>55</sup>	Co <sup>59</sup>	Zn <sup>66</sup>	Ga <sup>71</sup>	Pb <sup>208</sup>	
Quartz itabirite (QI)	Martite	n	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
		Min.	174.25	121.44	37.55	17.97	4.87	66.21	0.599	1.49	0.336	2.53	
		Max.	774.55	589.97	68.79	41.08	18.05	343.79	5.580	5.53	0.433	8.33	
		Mean	409.39	246.70	51.37	28.26	10.90	141.49	1.748	3.53	0.378	4.30	
		σ	237.36	156.34	11.52	8.56	5.31	96.22	1.778	1.31	0.038	1.91	
	Anhedral hematite	n	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
		Min.	93.99	227.84	15.02	40.73	5.20	37.87	0.534	2.63	0.352	2.21	
		Max.	301.62	426.69	50.05	134.32	46.11	145.84	1.990	6.99	0.467	4.75	
		Mean	176.97	325.53	33.07	82.12	24.31	85.93	1.201	5.09	0.406	3.20	
		σ	82.51	84.04	11.39	37.87	18.87	39.15	0.664	1.59	0.042	0.96	
Quartz-veined quartz itabirite (QVQI)	kenomagnetite	n	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
		Min.	216.03	147.65	88.72	27.04	3.30	80.87	1.175	3.40	0.334	1.75	
		Max.	920.52	182.35	96.31	82.04	13.23	209.90	3.030	5.15	0.413	3.11	
		Mean	499.59	166.97	91.53	42.79	6.65	136.44	2.146	4.51	0.383	2.35	
		σ	337.76	16.13	3.31	26.24	4.58	58.01	0.776	0.79	0.035	0.56	
	Martite	n	13	13	13	13	12	13	13	13	13	13	13
		Min.	145.23	144.31	68.50	19.23	3.31	65.43	0.587	2.41	0.268	1.58	
		Max.	811.83	680.92	120.59	60.12	16.15	210.74	3.200	9.10	0.415	10.79	
		Mean	449.38	289.83	94.81	34.39	9.27	108.86	1.719	3.57	0.345	3.27	
		σ	216.74	193.78	14.08	14.65	4.23	34.41	0.888	1.77	0.047	2.36	
Anhedral hematite	n	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Mean	270.12	251.23	74.77	75.76	12.30	81.02	1.870	2.90	0.440	1.66		
Itabirite breccia (IB)	Martite	n	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	
		Min.	433.35	98.38	20.51	11.60	8.60	150.58	0.717	2.65	0.281	4.06	
		Max.	681.02	146.96	23.65	17.67	8.60	210.81	2.160	5.28	0.374	6.76	
		Mean	552.67	127.86	22.15	13.94	8.60	179.40	1.240	3.71	0.324	5.57	
		σ	124.08	25.90	1.58	3.26		30.20	0.799	1.39	0.047	1.38	
	Anhedral hematite	n	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
		Min.	49.80	136.10	7.87	22.95	3.27	28.75	1.426	1.78	0.336	2.50	
		Max.	518.73	744.91	23.09	97.45	20.15	201.65	2.560	5.70	0.579	9.00	
		Mean	234.34	440.76	15.13	55.56	11.88	117.62	2.036	3.52	0.423	4.39	
		σ	199.16	274.74	4.97	30.46	5.15	61.22	0.358	1.59	0.078	2.04	

**Table 5.6:** Summarized LA-ICP-MS results of discriminating elements and Pb (minimum, maximum, mean and standard deviation) for all iron oxides of the various lithotypes analyzed from the Minerita deposit. Data in ppm (cont.).

Lithotypes	Minerals		Mg <sup>24</sup>	Al <sup>27</sup>	Ti <sup>49</sup>	V <sup>51</sup>	Cr <sup>53</sup>	Mn <sup>55</sup>	Co <sup>59</sup>	Zn <sup>66</sup>	Ga <sup>71</sup>	Pb <sup>208</sup>	
Massive high-grade iron ore (MIO)	kenomagnetite	n	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	
		Min.	421.63	239.83	30.37	25.00	3.91	76.81	0.950	3.43	0.379	0.59	
		Max.	906.55	335.06	72.46	32.69	10.19	154.26	9.370	9.29	0.866	3.36	
		Mean	720.73	292.21	50.50	28.53	6.98	115.18	5.398	6.92	0.620	1.91	
		σ	220.05	43.67	17.79	3.23	3.14	33.51	3.883	2.75	0.260	1.13	
	Martite	n	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		Min.	44.35	198.39	58.58	22.03	3.62	18.14	0.510	2.82	0.417	0.77	
		Max.	246.89	429.08	109.25	101.54	8.78	110.19	1.850	4.63	0.738	2.22	
		Mean	125.83	326.61	78.67	45.84	5.86	66.83	1.058	3.50	0.578	1.52	
		σ	84.84	89.15	18.95	31.99	1.88	43.20	0.572	0.72	0.119	0.54	
	Anhedral hematite	n	13	13	13	13	13	13	13	13	13	12	13
		Min.	3.95	182.95	14.54	45.37	5.19	12.06	0.284	2.27	0.253	0.41	
		Max.	375.71	392.23	49.04	117.68	17.73	214.18	0.830	5.99	0.758	2.22	
		Mean	156.35	246.65	27.74	75.91	9.86	52.41	0.601	3.29	0.484	1.01	
		σ	128.52	63.94	9.12	23.45	3.38	60.42	0.158	1.15	0.140	0.64	
	Sulfide breccia (SB)	Hydrothermal magnetite	n	30	30	30	30	17	30	30	25	30	30
Min.			29.75	26.33	3.44	2.99	3.63	122.12	0.115	7.82	0.386	0.75	
Max.			2093.52	402.93	15.18	3.65	14.76	201.90	2.310	90.02	80.310	6.96	
Mean			1225.73	151.03	9.44	3.32	7.87	164.22	0.973	29.71	45.085	3.87	
σ			499.38	91.25	2.21	0.16	2.80	24.45	0.576	20.90	32.540	1.56	
Anhedral hematite		n	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
		Min.	791.15	581.96	133.69	3.08	3.55	82.88	0.239	3519.47	0.251	10.24	
		Max.	1189.74	1189.86	214.87	4.05	6.31	126.37	0.290	3863.12	0.283	11.71	
		Mean	990.45	885.91	174.28	3.57	4.93	104.63	0.265	3691.30	0.267	10.98	
		σ	281.85	429.85	57.40	0.69	1.95	30.75	0.036	243.00	0.023	1.04	

n = number of valid values for each analysed chemical element;  
mín. = minimum; max. = maximum; σ = standard deviation.



**Table 5.7:** Summarized LA-ICP-MS results of REEs (minimum, maximum, mean and standard deviation) for all iron oxides of the various lithotypes analyzed from the Minerita deposit. Data in ppm.

Lithotypes	Minerals		Y <sup>89</sup>	La <sup>139</sup>	Ce <sup>140</sup>	Pr <sup>141</sup>	Nd <sup>146</sup>	Sm <sup>147</sup>	Eu <sup>153</sup>	Gd <sup>157</sup>	Tb <sup>159</sup>	Dy <sup>163</sup>	Ho <sup>165</sup>	Er <sup>166</sup>	Tm <sup>169</sup>	Yb <sup>172</sup>
Quartz itabirite (QI)	Martite	n	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
		Min.	4.820	1.150	1.693	0.2490	1.1700	0.282	0.1250	0.3830	0.0798	0.7800	0.1510	0.4790	0.0730	0.4560
		Max.	8.090	2.140	3.130	0.3950	2.2400	0.669	0.2960	0.8430	0.1480	1.0300	0.2860	0.7120	0.1160	0.8800
		Mean	6.444	1.475	2.179	0.3000	1.6201	0.499	0.2094	0.5701	0.1118	0.9200	0.2316	0.6069	0.1003	0.6261
		σ	1.452	0.356	0.506	0.0529	0.3918	0.142	0.0624	0.1580	0.0214	0.0864	0.0494	0.0805	0.0142	0.1517
	Anhedral hematite	n	6	6	6	6	6	5	6	6	6	6	6	6	6	6
		Min.	3.160	0.716	1.059	0.1340	0.7640	0.131	0.0890	0.3200	0.0760	0.4200	0.0860	0.3340	0.0381	0.2550
		Max.	7.370	1.350	2.090	0.2600	1.3500	0.465	0.1950	0.5150	0.1100	1.0700	0.2340	0.6250	0.0990	0.5590
		Mean	4.668	1.080	1.581	0.2127	1.1540	0.309	0.1430	0.4223	0.0892	0.6767	0.1450	0.4380	0.0692	0.3855
		σ	1.539	0.255	0.367	0.0516	0.2139	0.122	0.0452	0.0812	0.0152	0.2154	0.0510	0.1018	0.0214	0.1122
Quartz- veined quartz itabirite (QVQI)	kenomagnetite	n	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4
		Min.	3.860	0.511	0.689	0.1140	0.4820	0.146	0.0490	0.1340	0.0567	0.4860	0.1120	0.2740	0.0680	0.3740
		Max.	6.470	1.000	1.471	0.1790	1.0100	0.240	0.0730	0.3670	0.0970	0.6630	0.1990	0.5320	0.0820	0.5330
		Mean	5.185	0.775	1.044	0.1385	0.6523	0.188	0.0583	0.2925	0.0754	0.5890	0.1543	0.4295	0.0745	0.4553
		σ	1.093	0.219	0.350	0.0305	0.2417	0.048	0.0116	0.1100	0.0206	0.0746	0.0360	0.1205	0.0062	0.0767
	Martite	n	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
		Min.	3.170	0.471	0.491	0.0800	0.3700	0.136	0.0264	0.1630	0.0421	0.3970	0.1130	0.3230	0.0380	0.2600
		Max.	9.210	1.420	1.770	0.2290	1.1300	0.345	0.1550	0.5220	0.1390	0.9700	0.2490	0.6500	0.1250	0.8000
		Mean	5.761	0.772	0.963	0.1318	0.6268	0.247	0.0797	0.3068	0.0760	0.6152	0.1622	0.4579	0.0765	0.4447
		σ	1.510	0.274	0.321	0.0476	0.2130	0.077	0.0343	0.1119	0.0239	0.1837	0.0330	0.1102	0.0250	0.1503
Anhedral hematite	n	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	Mean	3.330	0.447	0.683	0.0738	0.4370	0.133	0.0486	0.2010	0.0404	0.4490	0.0860	0.3030	0.0393	0.2770	
Itabirite breccia (IB)	Martite	n	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	3
		Min.	6.110	0.924	1.256	0.1920	0.6700	0.380	0.1320	0.3250	0.1210	0.5730	0.1720	0.5970	0.0770	0.5900
		Max.	9.610	2.010	2.300	0.3790	1.6400	0.790	0.1560	0.7230	0.1510	0.8700	0.3180	0.9600	0.1360	0.7200
		Mean	7.903	1.448	1.809	0.2727	1.2367	0.585	0.1433	0.5520	0.1390	0.7410	0.2350	0.7613	0.1133	0.6367
		σ	1.752	0.544	0.525	0.0961	0.5052	0.290	0.0121	0.2048	0.0159	0.1523	0.0750	0.1839	0.0318	0.0723
	Anhedral hematite	n	8	8	8	8	8	5	7	8	8	8	8	8	8	8
		Min.	4.060	1.039	1.520	0.1670	0.9900	0.340	0.0770	0.2670	0.0420	0.5400	0.1090	0.4300	0.0750	0.3310
		Max.	9.570	2.040	3.040	0.3560	2.3900	0.500	0.2510	0.7360	0.1700	1.2800	0.2760	0.9300	0.1560	0.7300
		Mean	6.493	1.439	2.130	0.2663	1.4213	0.416	0.1474	0.5575	0.1086	0.9186	0.2111	0.6770	0.1083	0.5435
		σ	1.890	0.309	0.520	0.0663	0.4546	0.059	0.0549	0.1482	0.0471	0.2503	0.0487	0.1513	0.0247	0.1412

**Table 5.7:** Summarized LA-ICP-MS results of REEs (minimum, maximum, mean and standard deviation) for all iron oxides of the various lithotypes analyzed from the Minerita deposit. Data in ppm (cont.).

Lithotypes	Minerals		Y <sup>89</sup>	La <sup>139</sup>	Ce <sup>140</sup>	Pr <sup>141</sup>	Nd <sup>146</sup>	Sm <sup>147</sup>	Eu <sup>153</sup>	Gd <sup>157</sup>	Tb <sup>159</sup>	Dy <sup>163</sup>	Ho <sup>165</sup>	Er <sup>166</sup>	Tm <sup>169</sup>	Yb <sup>172</sup>
Massive high-grade iron ore (MIO)	kenomagnetite	n	4	4	4	4	4	3	4	3	4	3	4	3	2	4
		Min.	0.730	0.470	0.510	0.0610	0.2530	0.253	0.0357	0.0830	0.0207	0.3270	0.0317	0.1720	0.0350	0.0760
		Max.	3.130	1.070	1.580	0.2640	1.1400	0.315	0.0960	0.2100	0.0510	0.4350	0.1150	0.2840	0.0710	0.3760
		Mean	2.438	0.765	1.133	0.1678	0.7958	0.293	0.0679	0.1573	0.0362	0.3740	0.0867	0.2160	0.0530	0.2208
	σ	1.149	0.258	0.503	0.0854	0.4003	0.034	0.0258	0.0662	0.0140	0.0553	0.0388	0.0597	0.0255	0.1316	
	Martite	n	5	5	5	5	5	3	5	5	5	4	4	5	4	5
		Min.	1.150	0.340	0.750	0.0990	0.4300	0.195	0.0305	0.0470	0.0179	0.1730	0.0400	0.0810	0.0211	0.1010
		Max.	2.620	1.220	1.540	0.1710	0.8400	0.225	0.0599	0.2110	0.0490	0.3210	0.1190	0.2170	0.0430	0.2250
		Mean	1.986	0.736	1.020	0.1390	0.6180	0.210	0.0487	0.1388	0.0347	0.2433	0.0740	0.1486	0.0344	0.1624
	σ	0.551	0.316	0.316	0.0311	0.1840	0.015	0.0131	0.0614	0.0129	0.0733	0.0334	0.0519	0.0103	0.0529	
	Anhedral hematite	n	13	13	13	12	13	9	10	8	11	12	9	12	11	9
		Min.	0.111	0.046	0.026	0.0340	0.1190	0.073	0.0180	0.0490	0.0104	0.0510	0.0270	0.0430	0.0135	0.0760
Max.		4.630	1.640	2.550	0.3100	1.3300	0.410	0.1100	0.2660	0.0660	0.5800	0.1440	0.3060	0.0710	0.3080	
Mean		1.906	0.547	0.853	0.1166	0.6050	0.237	0.0529	0.1691	0.0374	0.2975	0.0759	0.1537	0.0397	0.2080	
σ	1.420	0.485	0.696	0.0818	0.4169	0.107	0.0300	0.0844	0.0206	0.1928	0.0398	0.0875	0.0167	0.0818		
Sulfide breccia (SB)	Hydrothermal magnetite	n	28	22	21	26	7	6	8	12	16	8	10	14	10	12
		Min.	0.054	0.055	0.035	0.0197	0.0303	0.093	0.0107	0.0150	0.0052	0.0092	0.0110	0.0108	0.0248	0.0184
		Max.	0.881	0.424	0.257	0.2440	0.1260	0.269	0.0520	0.0600	0.1340	0.0720	0.1580	0.0780	0.1360	0.1860
		Mean	0.641	0.209	0.111	0.1095	0.0639	0.168	0.0291	0.0328	0.0500	0.0313	0.0687	0.0357	0.0808	0.0513
	σ	0.232	0.069	0.054	0.0684	0.0356	0.064	0.0160	0.0130	0.0420	0.0223	0.0570	0.0197	0.0444	0.0454	
	Anhedral hematite	n	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	2	2	0	2
		Min.	0.506	0.831	0.631		0.1420	0.096	0.0266	0.0621	0.0059		0.0199	0.0830		0.0540
		Max.	0.760	1.041	1.023		0.5430	0.121	0.0310	0.1190	0.0223		0.0400	0.1180		0.0750
Mean		0.633	0.936	0.827	0.0940	0.3425	0.109	0.0288	0.0906	0.0141	0.0670	0.0300	0.1005		0.0645	
σ	0.180	0.148	0.277		0.2835	0.018	0.0031	0.0402	0.0116		0.0142	0.0247		0.0148		

n = number of valid values for each analysed chemical element;  
 mín. = minimum; max. = maximum; σ = standard deviation.

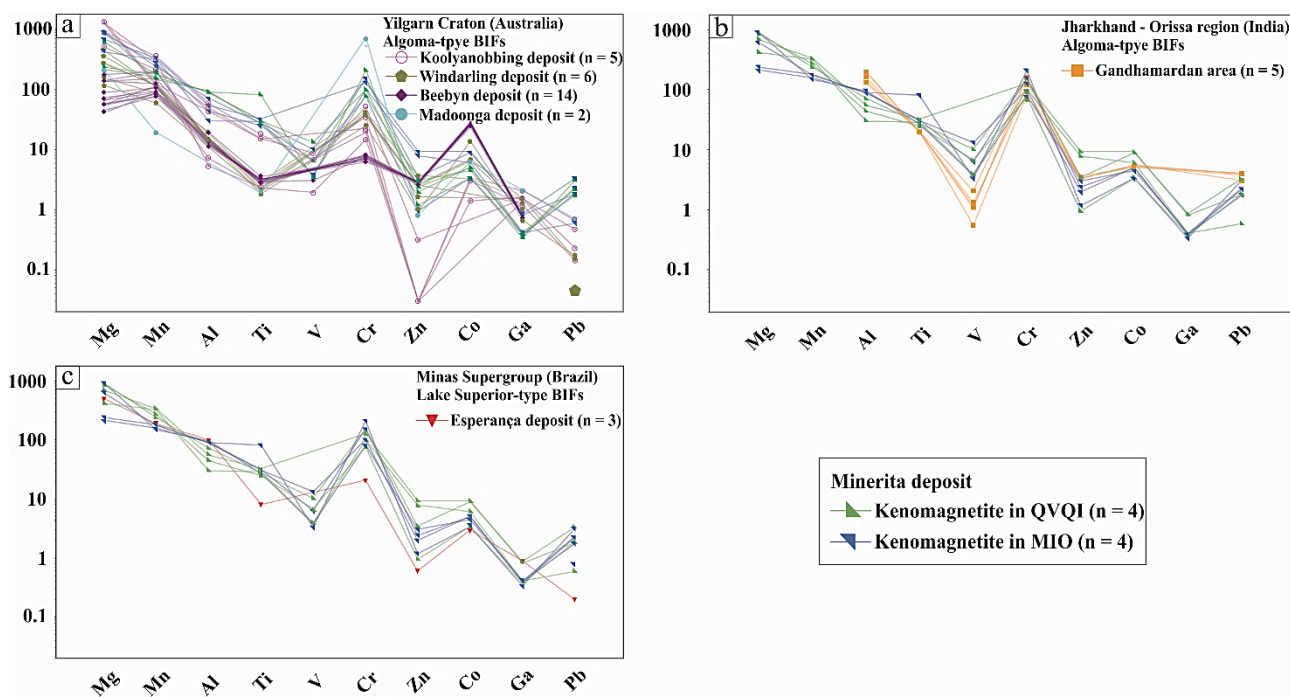
**Table 5.8:** Main characteristics of discriminating elements, Pb, Y and REEs, and REEs anomalies (min. = minimum, max. = maximum and mean) in the iron oxides analyzed from the Minerita deposit.

Iron oxides	Trace elements abundance	REE fractionation (PAAS and CN normalized)	Anomalies			$\Sigma$ REE + Y	La/Yb <sub>PAAS</sub> / CN	Pr/Pr <sup>(*)</sup>	Ce/Ce <sup>(**)</sup>	Eu/Eu <sup>(***)</sup>	Y/Ho	
			La	Ce	Eu							
Kenomagnetite in QVQI	High Mg, Al, Ti, V and Mn	LREE << HREE	+	-		Min.	7.56	0.06	0.73	0.20	0.23	30.69
	Moderate Pb and Y					Max.	12.34	0.11	1.15	0.43	0.35	37.67
	Low Cr, Co, Zn, Ga and ETRs					Mean	10.06	0.09	0.89	0.31	0.28	33.83
Kenomagnetite in MIO	High Mg, Al, Ti, V and Mn	LREE << HREE	+	-		Min.	2.44	0.05	0.39	0.15	0.17	23.03
	Moderate Pb and Y					Max.	8.48	0.12	1.70	0.47	0.45	32.07
	Low Cr, Co, Zn, Ga and ETRs					Mean	6.52	0.09	1.08	0.33	0.32	27.44
Martite in QI	High/Variable Mg, Al and Mn	LREE < HREE	+	-	+	Min.	12.44	0.13	1.60	0.50	0.59	24.03
	Moderate Ti, V, Y and Pb					Max.	20.50	0.24	2.54	0.92	1.40	33.51
	Low Cr, Co, Zn, Ga and ETRs					Mean	15.89	0.17	1.93	0.64	0.99	27.97
Martite in QVQI	High/Variable Mg, Al, Ti, V and Mn	LREE << HREE	+	-		Min.	6.50	0.05	0.51	0.15	0.12	26.79
	Moderate Pb and Y					Max.	16.95	0.16	1.47	0.52	0.73	44.59
	Low Cr, Co, Zn, Ga and ETRs					Mean	10.72	0.09	0.85	0.28	0.38	35.43
Martite in IB	High Mg and Mn	LREE < HREE	+	-		Min.	11.87	0.10	1.23	0.37	0.62	30.22
	Moderate Al, Y and Pb					Max.	20.76	0.23	2.44	0.68	0.74	37.16
	Low Ti, V, Cr, Co, Zn, Ga and ETRs					Mean	16.38	0.16	1.75	0.53	0.68	34.20
Martite in MIO	High/Variable Al, Ti, V and Mn	LREE << HREE	+	-		Min.	3.56	0.04	0.64	0.22	0.14	22.02
	Moderate Mg					Max.	7.07	0.14	1.10	0.45	0.28	48.00
	Low Cr, Co, Zn, Ga, Y, ETRs and Pb					Mean	5.44	0.08	0.89	0.30	0.23	33.01
Anhedral hematite in QI	High Al, V and Cr	LREE < HREE	+	-		Min.	7.63	0.08	0.86	0.31	0.42	25.08
	Moderate Mg, Ti, Mn and Pb					Max.	15.99	0.15	1.67	0.62	0.92	40.65
	Low Co, Zn, Ga, Y and ETRs					Mean	11.32	0.12	1.37	0.47	0.68	32.81
Anhedral hematite in QVQI	High Mg, Al, Ti and V	LREE << HREE	+	-		Min.	6.55	0.05	0.47	0.20	0.23	38.72
	Moderate Cr and Mn					Max.	6.55	0.05	0.47	0.20	0.23	38.72
	Low Co, Zn, Ga, Y, ETRs and Pb					Mean	6.55	0.05	0.47	0.20	0.23	38.72
Anhedral hematite in IB	High Mg, Al, V, Cr and Mn	LREE < HREE	+	-	+	Min.	10.28	0.12	1.07	0.45	0.36	20.10
	Moderate Ti, Y and Pb					Max.	21.77	0.23	2.29	0.90	1.19	41.10
	Low Co, Zn, Ga and ETRs					Mean	15.26	0.16	1.71	0.63	0.70	31.22
Anhedral hematite in MIO	High V	LREE << HREE	+	-		Min.	0.46	0.01	0.22	0.01	0.09	11.59
	Moderate Mg, Al, Ti, Cr and Mn					Max.	12.51	0.19	1.99	0.75	0.52	40.97
	Low Co, Zn, Ga, Y, ETRs and Pb					Mean	5.01	0.06	0.75	0.25	0.25	28.21
Hydrothermal magnetite in SB	High Mg, Al, Zn and Ga	LREE >> HREE	+	-		Min.	0.13	0.25	-	-	0.03	-
	Moderate Mn					Max.	1.82	1.93	-	-	0.16	-
	Low Ti, V, Cr, Co, Y, ETRs and Pb					Mean	1.12	0.95	-	-	0.09	-
Anhedral hematite in SB	High Mg, Al, Ti and Zn	LREE >> HREE	+	-		Min.	2.57	3.78	-	-	0.08	-
	Moderate Mn					Max.	3.94	4.73	-	-	0.10	-
	Low V, Cr, Co, Ga, Y, ETRs and Pb					Mean	3.26	4.25	-	-	0.09	-

(\*)  $Pr/Pr^*_{PAAS} (mean) = Pr_{PAAS}/(0.5*Ce_{PAAS} + 0.5*Nd_{PAAS})$ ; (\*\*)  $Ce/Ce^*_{PAAS} (mean) = Ce_{PAAS}/(0.5*La_{PAAS} + 0.5*Pr_{PAAS})$ ; (\*\*\*)  $Eu/Eu^*_{PAAS} (mean) = Eu_{PAAS}/(0.5*Sm_{PAAS} + 0.5*Gd_{PAAS})$  for itabirites and iron ore or  $Eu/Eu^*_{CN} (mean) = Eu_{CN}/(Sm_{CN}*Gd_{CN})^{1/2}$  for sulfide breccia. QI = quartz itabirite; QVQI = quartz-veined quartz itabirite; IB = itabirite breccia; MIO = massive high-grade iron ore; SB = sulfide breccia.

#### 5.4.4. Kenomagnetite as an initial iron oxide

For the purpose of this work, kenomagnetite is taken as the most primitive oxide phase and the least chemically modified iron oxide from the Minerita deposit, since magnetite is a rare phase in itabirites. To further support our hypothesis, are the chemical results obtained via LA-ICP-MS when compared with *in situ* data of early-stage magnetite of slightly altered BIFs from the (i) Yilgarn Craton, in Australia (Algoma-type; Koolyanobbing, Windarling, Beebyn and Madoonga deposits) (Angerer et al., 2012, 2013; Duuring and Hagemann, 2013; Duuring et al., 2018) (Fig. 5.13a); (ii) Jharkhand-Orissa region, in India (Algoma-type; Gandhamardan area) (Bhattacharya et al., 2007) (Fig. 5.13b); and (iii) Minas Supergroup, QF, Brazil (Lake Superior-type; Esperança deposit) (Hensler et al., 2015) (Fig. 5.13c). Correlations are found especially for the Koolyanobbing and Esperança deposits, and the Gandhamardan area (Fig. 5.13). Magnesium, Al, Ga, Ti and Zn present the same trend, with Mn, V, Cr, Pb and Co having relatively heterogeneous behavior among them.



**Figure 5.13:** Spider diagrams of discriminating elements, and Pb, for comparison between kenomagnetite in QVQI and MIO, from the Minerita deposit, and early-stage magnetite of slightly altered BIFs from the **a)** Yilgarn Craton (Algoma-type; Koolyanobbing, Windarling, Beebyn and Madoonga deposits) (Angerer et al., 2012, 2013; Duuring and Hagemann, 2012, 2018), **b)** Jharkhand-Orissa region (Algoma-type; Gandhamardan area) (Bhattacharya et al., 2007), and **c)** Minas Supergroup (Lake Superior-type; Esperança deposit) (Hensler et al., 2015). Data from Esperança deposit shown in mean ppm values. QVQI = quartz-veined quartz itabirite; MIO = massive high-grade iron ore.

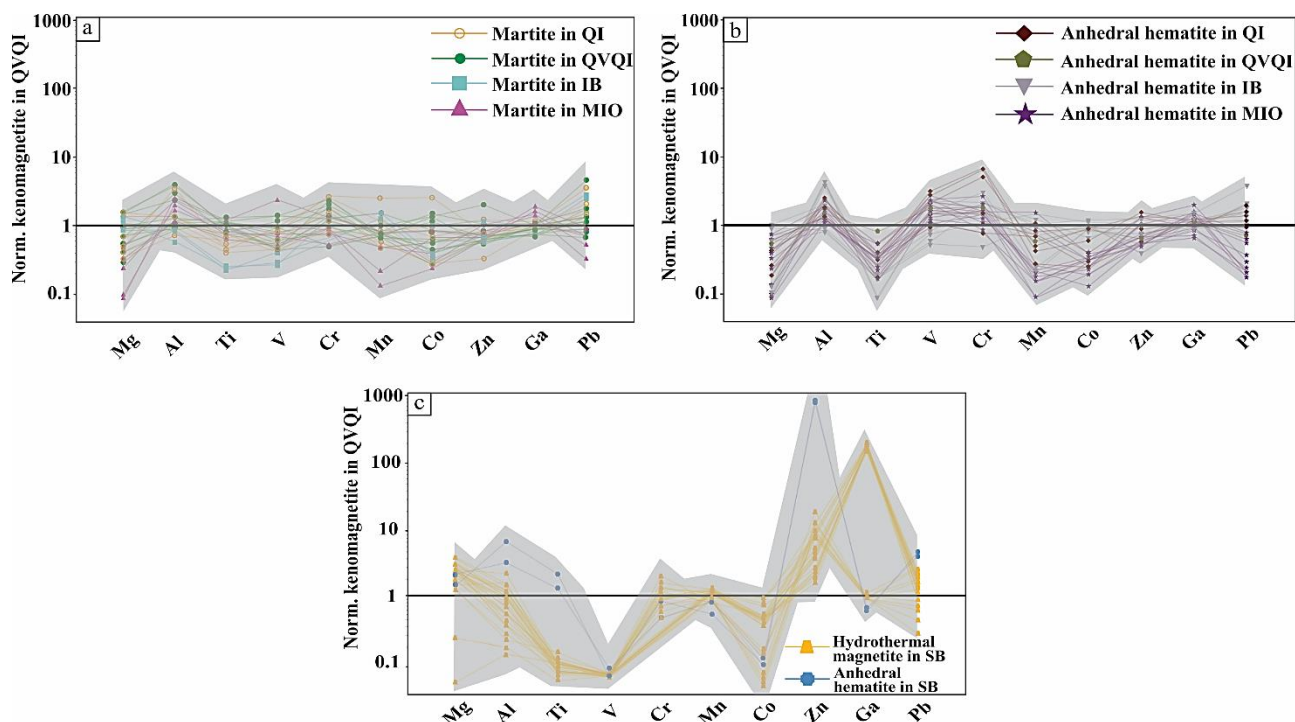
The compositional mean of four analyses of kenomagnetite in QVQI (Table 5.6; acronym in Table 5.2) was used to better illustrate gains and losses of the discriminating trace elements Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Zn and Ga (Nadoll et al., 2014), and Pb, compared with the other iron oxides from the Minerita deposit. The normalization results are present in Table 18A from the Appendix A.

In itabirites and iron ore, martite shows a small gain of Al, Cr, Ga and Pb, and loss of Mg, Ti, V and Mn (Fig. 5.14a). In turn, anhedral hematite presents, in general, a small enrichment in Al, V



and Cr, and impoverishment in Mg, Ti, Mn, Co and Zn (Fig. 5.14b). Gallium remains constant, and Pb does not have any clear correlation.

Hydrothermal magnetite in sulfide breccia exhibit a significant enrichment in Zn and Ga, and impoverishment in Ti and V (Fig. 5.14c). Gains of Al, Ti, Zn and Pb, and losses of V and Co (Fig. 5.14c) are observed in anhedral hematite in SB.



**Figure 5.14:** Spider diagrams of discriminating elements, and Pb, for a) Martite, b) Anhedral hematite in itabirites and iron ore, and c) Hydrothermal magnetite and anhedral hematite in sulfide breccia, normalized for kenomagnetite in QVQI. QI = quartz itabirite; QVQI = quartz-veined quartz itabirite; IB = itabirite breccia; MIO = massive high-grade iron ore; SB = sulfide breccia.

#### 5.4.5. Sulfur isotopes in pyrite

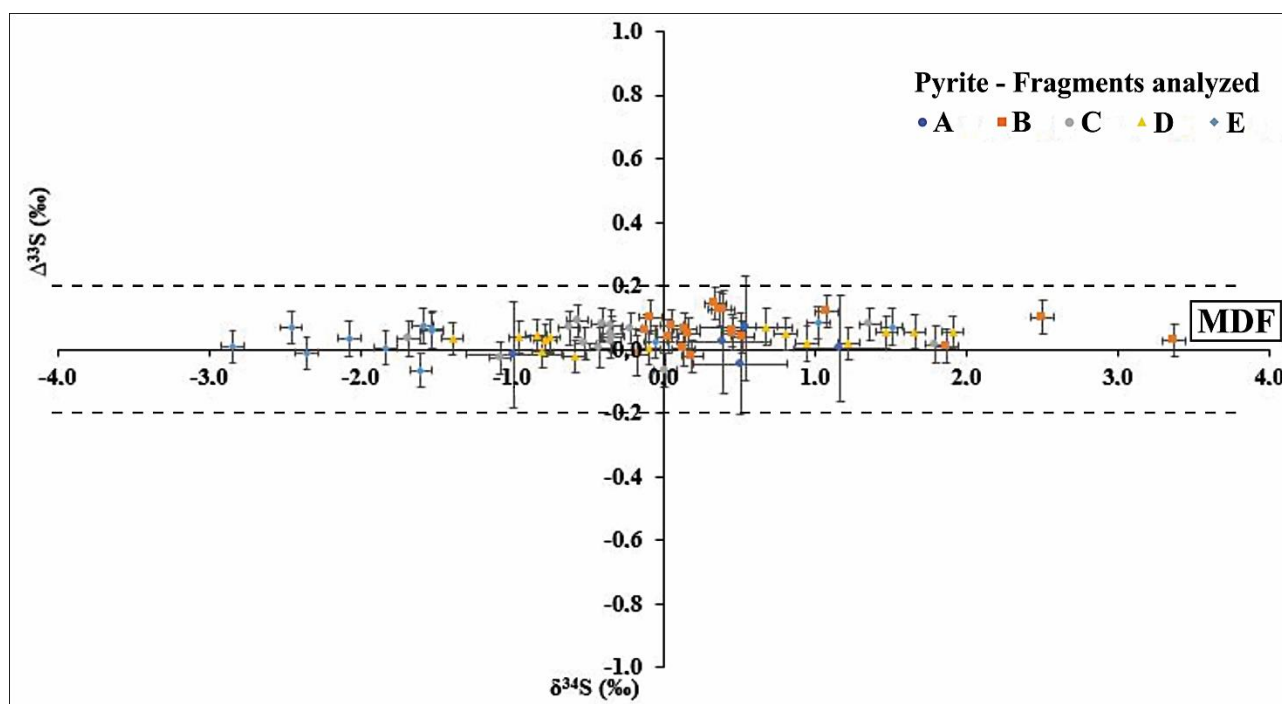
Data on  $\delta^{33}\text{S}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  and  $\Delta^{33}\text{S}$ , with their associated error, are presented in Table 1B of Appendix B. Minimum, maximum, mean and standard deviation values are showed in Table 5.9.

Values of  $\delta^{33}\text{S}$  range between -1.46 and +1.76 ‰, with a mean of +0.02 ‰. Values of  $\delta^{34}\text{S}$  range between -2.84 and +3.37 ‰ (mean of -0.05 ‰), and  $\Delta^{33}\text{S}$  is between -0.07 and 0.14 ‰ (mean of +0.04 ‰). Since all values of  $\Delta^{33}\text{S}$  are between -0.2 and +0.2 ‰, which is an interval defined for MDF (mass-dependent fractionation) (Farquhar and Wing, 2003) (Fig. 5.15), values calculated for  $\delta^{36}\text{S}$  and  $\Delta^{36}\text{S}$  were not necessary because there is no clear MIF (mass-independent fractionation) signature (Farquhar et al., 2013).

**Table 5.9:** Summarized results (minimum, maximum, mean and standard deviation) of  $\delta^{33}\text{S}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  and  $\Delta^{33}\text{S}$  for all 66 grains of pyrite (Figs. 5.6c, d), from five fragments in SB of the Minerita deposit, analyzed through the SIMS technique.

		$\delta^{33}\text{S}$ (‰)	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	$\Delta^{33}\text{S}$ (‰)
Fragment A (n = 5)	Minimum	-0.52	-0.99	-0.04
	Maximum	0.60	1.17	0.07
	Mean	0.17	0.32	0.01
	Standard deviation	0.42	0.79	0.04
Fragment B (n = 19)	Minimum	-0.11	-0.17	-0.02
	Maximum	1.76	3.37	0.14
	Mean	0.38	0.62	0.06
	Standard deviation	0.49	0.95	0.05
Fragment C (n = 15)	Minimum	-0.83	-1.68	-0.06
	Maximum	0.94	1.80	0.09
	Mean	-0.09	-0.25	0.04
	Standard deviation	0.44	0.84	0.04
Fragment D (n = 15)	Minimum	-0.68	-1.39	-0.02
	Maximum	1.04	1.91	0.07
	Mean	0.12	0.17	0.03
	Standard deviation	0.58	1.11	0.03
Fragment E (n = 12)	Minimum	-1.46	-2.84	-0.07
	Maximum	0.85	1.51	0.08
	Mean	-0.62	-1.28	0.04
	Standard deviation	0.73	1.38	0.04

n = number of grains of pyrite analyzed.



**Figure 5.15:** Graph of  $\delta^{34}\text{S}$  versus  $\Delta^{33}\text{S}$  for all 66 grains of pyrite (Figs. 5.6c, d) from the five fragments in SB of the Minerita deposit. All values are within the MDF interval (-0.2 and 0.2 ‰) (Farquhar and Wing, 2003). Error bars are presented in both directions. MDF = mass-dependent fractionation.

## 5.5. DISCUSSION

Mineral parageneses (Fig. 5.16) have been identified from the itabirites to the formation of iron ores in the Minerita deposit, which reflect (i) martitization, as a result of magnetite oxidation, of which kenomagnetite is the most common phase; and (ii) formation of anhedral hematite. Sulfide breccia also showed (iii) the formation of magnetite and anhedral hematite. The main factors responsible for the enrichment of itabirites and formation of sulfide breccia are following discussed.

### 5.5.1. Zones of hydrothermal alteration/mineralization stages and sulfide breccia

#### Quartz itabirites and high-grade iron ores

Figure 5.16a shows the mineralogical paragenesis and mean percentage of minerals in quartz itabirites, high-grade iron ores and sulfide breccia. The metamorphic mineralogical characteristics of iron oxides are still the main ones, but substitution textures are already observed in the oxides (Fig. 5.6) suggesting the interaction of fluids with itabirites.

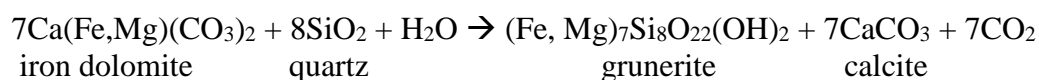
Distal and intermediate hydrothermal alteration zones (Fig. 5.16b) are observable in quartz itabirites. The distal zone is composed of quartz itabirite (Fig. 5.5a), while the intermediate zone comprises veined-quartz quartz itabirite (Fig. 5.5b) and itabirite breccia (Fig. 5.5c). The proximal zone is represented by massive and quartz-veined iron ores (Figs. 5.5e, 5.16b).

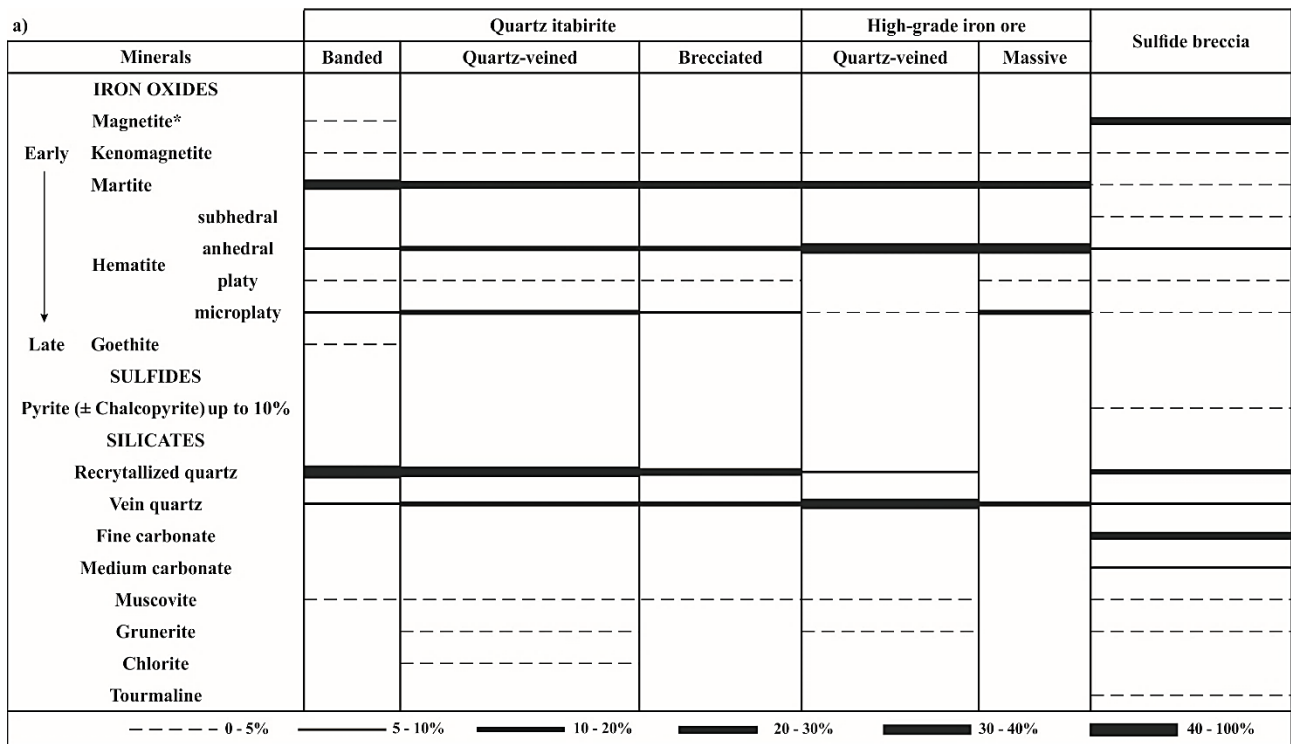
During itabirite → iron ore transition, iron alteration/mineralization stages involved (i) increase in the content of anhedronal hematite/martite; (ii) reduction in recrystallized quartz due to silica leaching; and (iii) increase and posterior reduction in vein quartz due to silicification and later leaching (Figs. 5.16a, b). The moderate to high intragranular porosity in most iron oxides (Figs. 5.6e, h) reflects fluid/rock interaction, which may have favored the flow of fluids and allowed continuous leaching of chemical elements.

#### Sulfide breccia

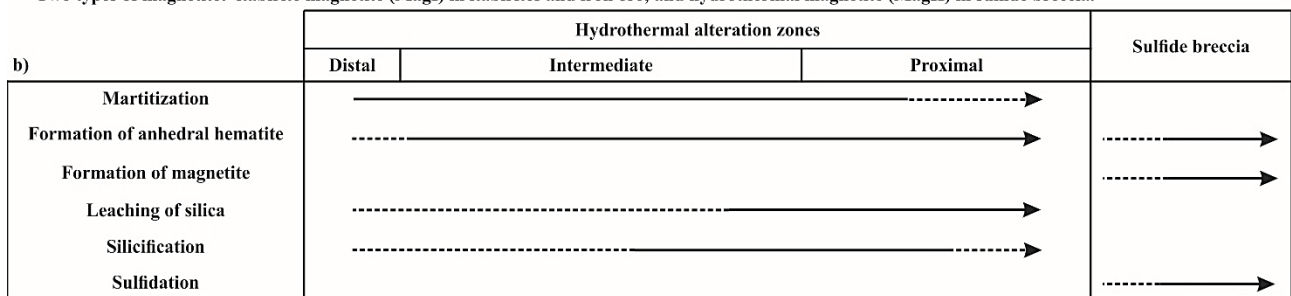
Sulfide breccia (SB) (Fig. 5.5f) shows different microstructures and mineralogy from the other lithotypes in the Minerita deposit. With medium granoblastic texture and the presence of magnetite, sulfides, carbonates and grunerite (Fig. 5.16a) in both rock matrix and veins, it is not considered a hydrothermal alteration zone along with the other rock types, but it is still a late phase result of hydrothermal alteration.

Sulfides associated with and/or that have grown over iron oxides and carbonates resulted from sulfidation (Fig. 5.16b) of magnetite and Fe-bearing carbonate in the presence of S and Cu. Carbonate in veins also reflects hydrothermal alteration caused by an aqueous-carbonic, neutral to alkaline pH fluid. In addition to grunerite occurring along bandings with quartz, this amphibole also forms in veins (Fig. 5.7a), suggesting its hydrothermal origin. The following reaction might have been responsible for the development of this last type of grunerite (e.g. Klein, 2005):





\* Two types of magnetite: itabirite magnetite (MagI) in itabirites and iron ore; and hydrothermal magnetite (MagII) in sulfide breccia.



**Figure 5.16:** Mineralogical parageneses of the Minerita deposit showing the **a)** Number of minerals in itabirites, iron ores and sulfide breccia. **b)** Hydrothermal alteration zones with various mineralization stages for the formation of high-grade iron ores, and sulfide breccia.

## 5.5.2. Chemical alterations during mineralization

### 5.5.2.1. Martitization

The chemical formula of magnetite,  $Fe^{+2}Fe^{+3}_3O_4$ , allows a range of complete or partial substitutions of chemical elements compatible with its crystalline structure (Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Zn and Ga) (Nadoll et al., 2014). In turn, hematite ( $Fe^{+3}_2O_3$ ) only permits substitutions by Al, Ti, V, Cr, Mn and Ga due to its trivalent state (Lindsley, 1976; Hensler et al., 2015). Lead can enter in the crystalline structure of both minerals through coupled substitution, occupying two bivalent sites. Nadoll et al. (2014) believe that trace element substitution in these iron oxides depends also on external factors, such as fluid composition (element availability), intensity of the fluid/rock interaction, temperature of the system, oxygen and sulfur fugacity ( $fO_2$  and  $fS_2$ ), activity of the silica component, and mineralogical composition of the host rock.



For the Minerita deposit martite, the small gains of Al, Cr, Ga and Pb, and loss of Mg and Zn (Figs. 5.11, 5.14a) must have occurred due to the crystalline structure of hematite, and the interaction with a fluid rich in Ga and Pb, and poor in Zn. Gains of Al, Cr and Ga can also reflect residual enrichment due to the loss of the mobile discriminating elements Mg and Zn (Gomes et al., 2018), and involvement of a fluid with temperature high enough ( $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) to incorporate Ga into the structure of iron oxides (Nadoll et al., 2014). With respect to Pb, enrichment might be related to its availability in the fluid.

Manganese, Co and V are also lost due to oxidizing-reducing conditions. Under oxidizing conditions, these elements develop high valence (Duuring et al., 2018), which is incompatible with hematite, and are easily leached. This condition is already expected, since magnetite, which is the main iron oxide of the initial paragenesis of the QF itabirites, is almost entirely substituted by martite due to intense oxidation (Rosière et al., 2008).

#### **5.5.2.2. Formation of anhedral hematite (AHem)**

During the development of martite and anhedral hematite (Fig. 5.6f) in itabirites and iron ore, there is continuous loss of Mg, Ti, Mn and Co, and gain of Al and Cr (Figs. 5.11, 5.14b). This becomes clear upon comparison with the kenomagnetite normalization. This chemical behavior is expected considering the crystalline structure of hematite and the oxidizing conditions of the fluid. The loss of Pb suggests impoverishment of this element in the fluid. Enrichment in V and Zn also occurs during the formation of anhedral hematite, which suggests interaction with a less oxidizing (Nadoll et al., 2014), Zn-rich fluid.

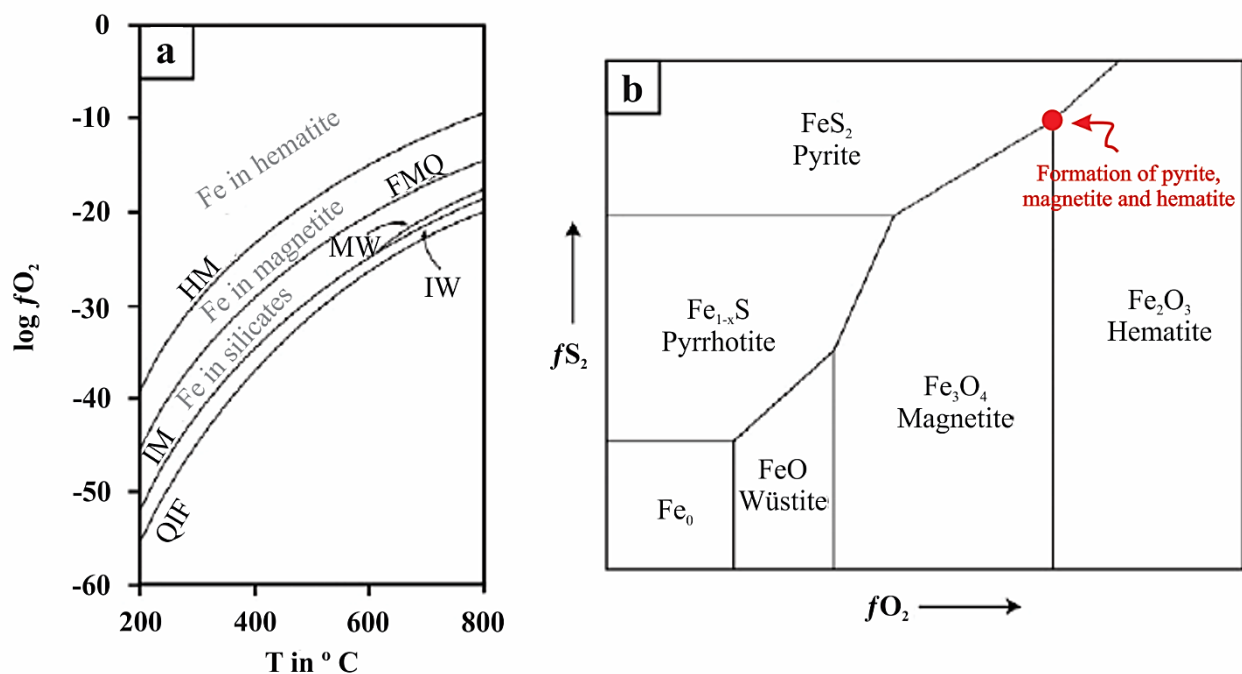
Titanium has an immobile behavior during metasomatic processes and in aqueous solutions (Purtov and Kotel'nikova, 1993). Its mobility, with continuous decline (Figs. 5.11, 5.14b), is indication of the involvement of saline fluids, with complexation of  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and/or  $\text{CO}_3^{2-}$  (e.g. basinal fluid), as had already been proposed by Hensler et al. (2015) for the mobilization of Ti in the formation of granoblastic hematite of the Águas Claras and Pau Branco deposits.

#### **5.5.2.3. Formation of hydrothermal magnetite and anhedral hematite in sulfide breccia (SB)**

Gains and losses of trace elements (Figs. 5.11, 5.14c) in hydrothermal magnetite and anhedral hematite in the SB indicate the involvement of low to moderate-temperature fluids (between  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Nadoll et al., 2014), with similar characteristics to those of martitization and formation of anhedral hematite in itabirites and iron ore. Gains of Zn, Ga and Pb (Figs. 5.11, 5.14c), which is an indication of the presence of these elements in the fluid, infer hydrothermal conditions at moderately high-temperature ( $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). This is because magnetite associated with sulfides tends to

have low concentration of chalcophile elements (Zn, Ga and Pb) (e.g. Araújo, 2018) due to high partition coefficient for sulfides (Drabek, 1982; Nadoll et al., 2014). However, Zn is an exception since it also shows a high partition coefficient for magnetite, which may confirm its enrichment (Nadoll et al., 2014).

Significant losses of trace elements (Figs. 5.11, 5.14c), especially Ti and V, in hydrothermal magnetite, and an increase in grain size and porosity, can also indicate re-precipitation from the dissolution of pre-existing magnetite (Putnis, 2009; Li et al., 2018). This would have taken place under  $fO_2$  conditions and temperature that are compatible with the incorporation of  $Fe^{+3}$  in this phase (upper limit of the fayalite-magnetite-quartz (FMQ) curve) (Fig. 5.17a). Moreover, the growth of pyrite and anhedral hematite, which depends on magnetite, also suggests that  $fO_2$  and  $fS_2$  were in balance during the formation of these three minerals (Fig. 5.17b).



**Figure 5.17:** Schematic diagrams from Nadoll et al. (2014). **a)** Temperature ( $^{\circ}C$ ) versus  $\log fO_2$  showing buffer condition in the Fe-Si-O system. Buffering for the quartz-iron-fayalite (QIF); iron-magnetite (IM); iron-wüstite (IW); magnetite-wüstite (MW); fayalite-magnetite-quartz (FMQ); and hematite-magnetite (HM) systems. **b)**  $fO_2$  versus  $fS_2$  for the Fe-O-S system. The geometry of the diagram is maintained even with significant changes of temperature. The solid red circle represents the balance point in which conditions of  $fO_2$  and  $fS_2$  allow the concomitant formation of magnetite, hematite and pyrite.

#### 5.5.2.4. Iron oxides and mobility of rare earth elements (REEs)

The iron oxides in itabirites and iron ore seems to follow the same trend of iron oxides of various other iron deposits in the QF, with loss of REEs (especially LREEs) during different iron mineralization stages (Table 5.8) (Fig. 5.12) (Morgan et al., 2013; Oliveira et al., 2013; Hensler et al., 2015). This reflects continuous fluid/rock interaction followed by changes in REEs, with possible removal of iron oxides and re-precipitation in other phases (e.g. monazite, xenotime). Hensler et al. (2015), in turn, proposed that fluids do not accumulate REEs because the young specular hematite of

the Pau Branco and Conceição deposits (QF), which formed from direct fluid precipitation, are poor in REEs.

For the sulfide breccia, hydrothermal magnetite and anhedral hematite show enrichment of LREEs compared with HREEs (Fig. 5.12d). It is known that igneous rocks have this same behavior (e.g. McDonough and Frey, 1989) which indicates that during the formation of these iron oxides the fluid probably interacted with these rocks.

### **Anomalies**

Positive true La and Pr anomalies, and negative Ce anomalies are detected in almost all iron oxide generations (Fig. 5.18a) in itabirites and iron ore. Exceptions are martite in quartz and quartz-veined itabirites, anhedral hematite in quartz-veined itabirite, and Ce in anhedral hematite in quartz-veined itabirite. Positive Eu anomaly is only identified in martite in quartz itabirite and anhedral hematite in quartz-veined quartz itabirite (Fig. 5.18b); and positive Sm in hydrothermal magnetite and anhedral hematite in sulfide breccia (Fig. 5.12d).

Elements such as Eu and Ce are sensitive to oxidizing-reducing conditions. Oxidizing fluid was involved during the martitization and formation of anhedral hematite in the Minerita deposit, which may have caused the oxidation from  $Ce^{+3}$  into  $Ce^{+4}$ . It is also likely that phyllites from the Batatal Formation (a reducing lithotype) contributed to fluid reduction, leading to the reduction of  $Eu^{+3}$  into  $Eu^{+2}$ .

In this scenario,  $Ce^{+4}$ , which is less soluble, may have been leached from the iron oxides in itabirites and iron ore of the Minerita deposit and precipitated in Mn-rich bands (dolomite itabirite bands of the Minerita deposit), which would also generate a negative Ce anomaly (Hensler et al., 2015). Without these bands, the anomaly might disappear, as is the case of some iron oxides (Fig. 5.18a). The positive Pr anomaly of some oxides in itabirites and iron ore in the deposit might also be related to the Ce anomaly, since the negative Ce anomaly results, inevitably, in a positive Pr anomaly (Bau and Dulski, 1996).

In turn,  $Eu^{+2}$  is not compatible with the crystalline structure of magnetite and hematite, and is concentrated along the mineral edges, which makes it easily mobilized during fluid/rock interaction (Bau and Dulski, 1996). The small magnitude of positive the Eu anomalies in some iron oxides might also indicate the involvement of a low-temperature fluid ( $< 250\text{ }^{\circ}C$ ) (Bau and Dulski, 1996).

The element  $Sm^{+3}$  decreases for when is an increasing in temperature (Provino et al., 2010). In this case,  $Sm^{+2}$  could be not compatible with crystalline structure of amphibole and clinopyroxene and easily mobilized during fluid/rock interaction. The high positive Sm anomalies in hydrothermal

magnetite and anhedral hematite in sulfide breccia is probably due the interaction the fluid with igneous rocks that contain amphibole and clinopyroxene. It most likely caused leaching of Sm and posterior precipitation in this iron oxides.

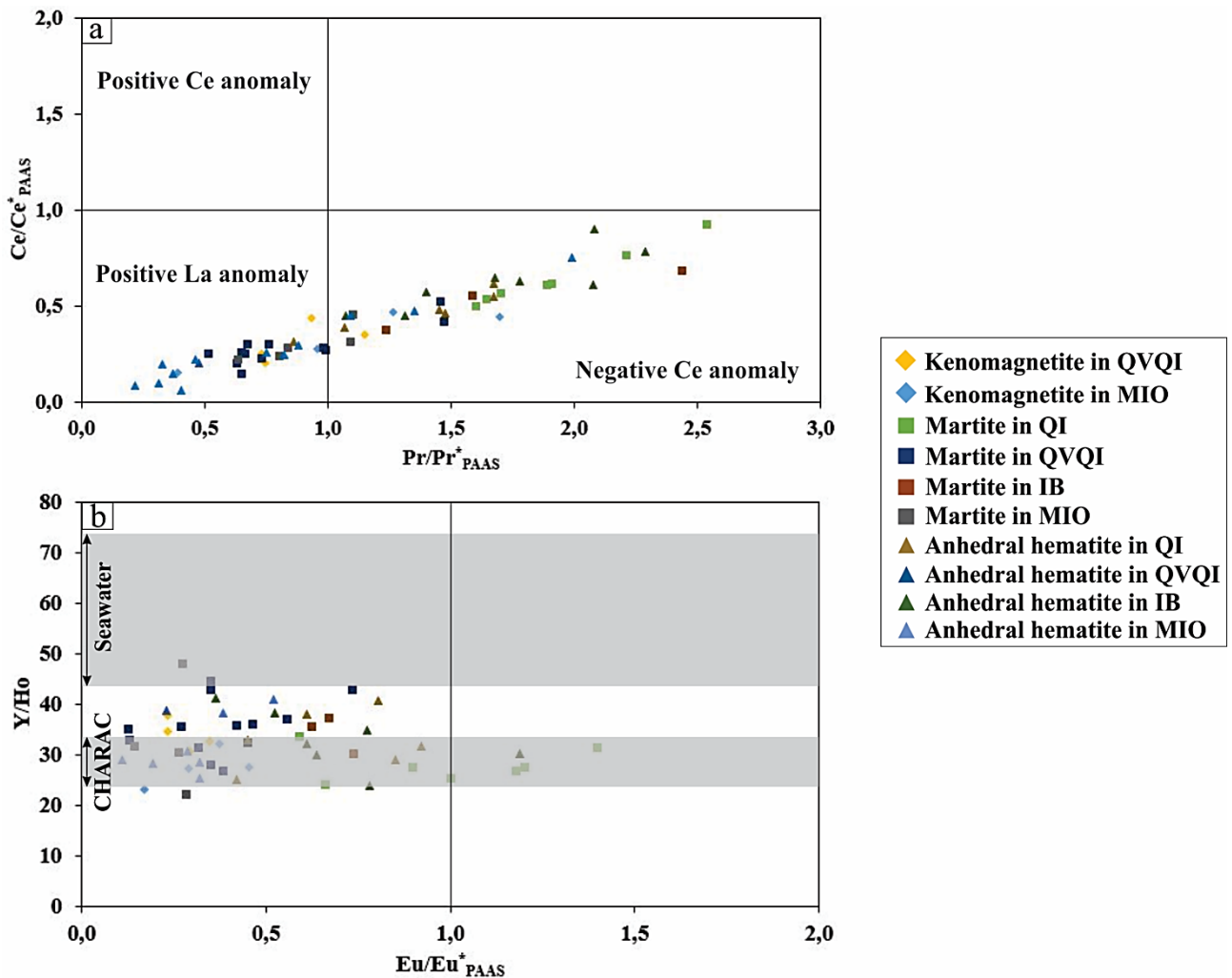
### **Y/Ho ratio and Y anomalies in itabirites and iron ore**

Most itabirites in the QF present a geochemical signature of seawater, with Y/Ho ratio between 35 and 58 (Spier et al., 2007; Morgan et al., 2013), and positive Y anomaly due to rapid precipitation of BIFs in an oxidizing marine environment (Bau and Dulski, 1996).

In the analysis of the less-altered martite from the Águas Claras, Baú, Mutuca, Usiminas, Córrego do Feijão and Cauê deposits, Hensler et al. (2015) detected a high Y/Ho ratio ( $> 44$ ) and a seawater signature. In turn, for the granoblastic and microplaty hematite from the Usiminas, Conceição, Esperança and Pico deposits, ratios are  $< 34$ . This is similar to what happens in itabirites and iron ore in the Minerita deposit, in which some of the martite present a seawater signature (Fig. 5.18b), and other iron oxides are in the primitive chondrite interval, with Y/Ho ratio  $< 24$  (Table 5.8).

The difference in ratios, and the loss of a positive Y anomaly (Fig. 5.12), can be related to the involvement of fluids that redefined the original signature of HREEs. In this case, there is Y fractioning and impoverishment compared with Ho. The origin of these fluids might be related to rocks that present low Y/Ho ratio. Spier et al. (2007) analyzed REEs + Y from the Batatal phyllite and concluded that the Y/Ho ratio is very low ( $< 27$ ). Therefore, fluids might have circulated and balanced with the Y/Ho ratio of the Batatal phyllite.





**Figure 5.18:** Diagrams showing anomalies and Y/Ho ratio for kenomagnetite, martite and anhedral hematite in itabirites and iron ore. **a)**  $Pr/Pr^*_{PAAS}$  versus  $Ce/Ce^*_{PAAS}$  results (Bau and Dulski, 1996), where most oxides show true positive La and Pr anomalies, and a negative Ce anomaly. Anomalies calculated using the formulas  $Pr/Pr^*_{PAAS} (mean) = Pr_{PAAS}/(0.5 \cdot Ce_{PAAS} + 0.5 \cdot Nd_{PAAS})$  and  $Ce/Ce^*_{PAAS} (mean) = Ce_{PAAS}/(0.5 \cdot La_{PAAS} + 0.5 \cdot Pr_{PAAS})$ . **b)**  $Eu/Eu^*_{PAAS}$  versus Y/Ho results with only a few grains of martite in QI, and anhedral hematite in IB, with positive Eu anomalies ( $Eu/Eu^*_{PAAS} > 1$ ). According to the Y/Ho ratio, most iron oxides are within the “CHARAC” interval. Eu anomalies were calculated using the formula  $Eu/Eu^*_{PAAS} = Eu_{PAAS}/(0.5 \cdot Sm_{PAAS} + 0.5 \cdot Gd_{PAAS})$ . Shaded areas define the seawater and “CHARAC” for the Y/Ho ratio (Bau and Dulski, 1996). QI = quartz itabirite; QVQI = quartz-veined quartz itabirite; IB = itabirite breccia; MIO = massive high-grade iron ore; SB = sulfide breccia.

### 5.5.3. Source of sulfur in sulfide breccia

The clear signature of MDF for hydrothermal pyrite (Fig. 5.15) indicates that the source of sulfur was mantellic/magmatic (Xue et al., 2013). Positive and negative values of  $\delta^{34}S$  (Fig. 5.15) also indicate an oxidizing fluid that progressively reduced (Gregory et al., 2016) due to interactions with the country rock.

The interaction between basal fluid and intrusive igneous rocks, or basement rocks, and incorporation of magmatic S was proposed for the Mississippi Valley-type deposits (MVT) from Missouri and Wisconsin, United States (Shelton et al., 1995; Luczaj and Huang, 2018). In the formation of the sulfide breccia, both sulfides might have originated from fluid that lixiviated S and Cu from subjacent intrusive rocks or, alternatively, from mafic to ultramafic rocks of the Rio das

Velhas Supergroup that are found thrust over the Minas Supergroup sequence in the Minerita area (Fig. 5.2).

#### **5.5.4. Hydrothermal fluid associated with iron mineralization**

Several studies on hypogene enrichment of itabirites from various iron deposits of the Quadrilátero Ferrífero (QF) (e.g. the Conceição, Águas Claras, Esperança, Pau Branco, Usiminas, Córrego do Feijão, Casa de Pedra, Baú, Pico and Retiro das Almas deposits) suggest the participation of basinal fluid and meteoric water, at different proportions, focused on structurally favorable zones (Rosière and Rios, 2004; Rosière et al., 2008; Sanglard et al., 2014; Mendes, 2015; Mendes et al., 2017; Hensler et al., 2014, 2015, 2017; Oliveira et al., 2015, 2017; Gomes et al., 2018). The involvement of metamorphic fluid has also been indicated (e.g. Rosière and Rios, 2004; Oliveira et al., 2017). Considering the similarities between the Minerita deposit and others in the QF, a model regarding its formation should consider what has been suggested for them.

Fluid inclusion (FI) microthermometry results suggest that one or more fluids participated in the formation of iron ores of the Minerita deposit. More than one type of FI within the same fluid inclusion assemblage (FIA) (Table 5.5) (Fig. 5.9), with different total homogenization temperatures and salinities, might suggest the trapping of a partial mixture between two or more homogeneous fluids (Anderson et al., 1992). It is possible there was a mixture between a low-temperature and low-salinity fluid (meteoric water?) and a low-temperature and moderate-salinity fluid (basinal?).

However, since the types of fluid inclusions were mainly defined based on differences in salinity, it is more likely that on homogeneous fluid (meteoric water?) acquired salinity through the interaction with country rocks (e.g. dolomite itabirite of the Minerita deposit). This has already been proposed by Rosière and Rios (2004) for the Conceição deposit.

#### **5.5.5. Hypogene model for the Minerita deposit**

##### **Quartz itabirites and high-grade iron ores**

For itabirites in the Minerita deposit to transform into high-grade iron ores, an effective hydrothermal removal of silica must have occurred. This may have been the result of direct leaching due to moderately- alkaline and silica-undersaturated fluids (e.g. Barnes, 1997).

Silica has low density (Klein, 2005) and is easily removed from itabirites, and transported to shallower crustal levels. The large volume loss that occurred can be accommodated by (i) an increase in band and grain porosity; (ii) collapse breccias; and (iii) the formation of new iron oxides in empty spaces due to availability of iron in fluid (e.g. Lobato et al., 2008). In shallow crustal levels, numerous quartz veins formed using the silica removed from deeper levels. This occurs due to depressurization

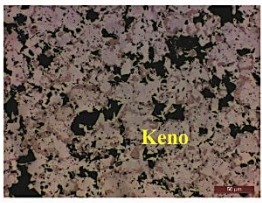
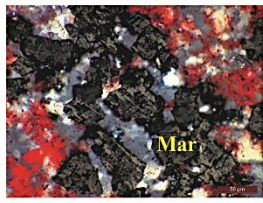
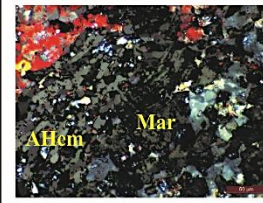
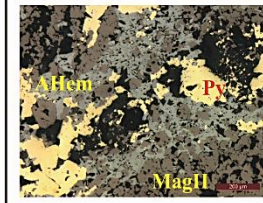
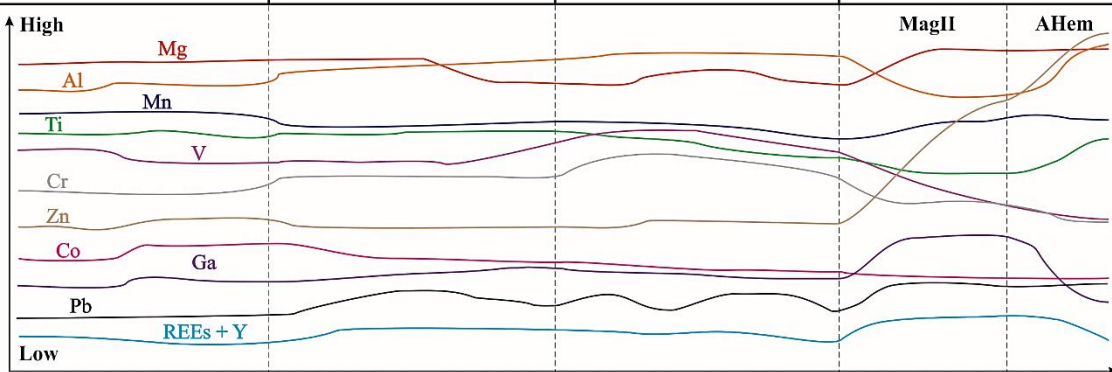
and precipitation in a high-fluid/rock ratio system that is structurally favorable for transport and deposition (Lobato et al., 2008).

During martitization in the Minerita deposit, there was loss of Ti due to complexation by F<sup>-</sup> or Cl<sup>-</sup>, and of elements Mn, Co and V, suggesting oxidizing conditions (Fig. 5.19). There was also localized gain of Ga and Pb, indicating high temperature and interaction with igneous rocks, and gain of REEs (Figs. 5.19, 5.20a, b). The intense leaching of silica (Fig. 5.20b) might have been facilitated by a possible alkalinity, undersaturation in silica and high salinity, typical of basinal fluid, which generated high porosity in itabirites and iron oxides.

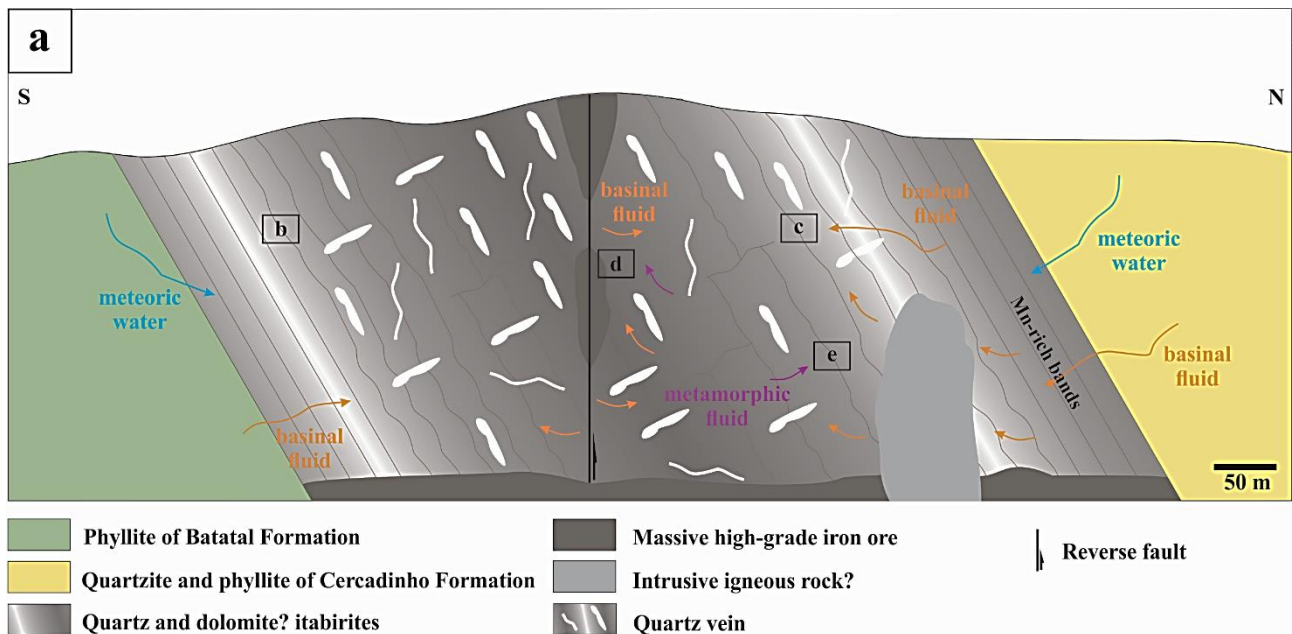
It is likely that a high flow of meteoric water, mixed with basinal fluid, favored the formation of anhedral hematite in the Minerita deposit in intermediate and proximal zones (Fig. 5.16a). This might have contributed to the continuous decrease of Ti, of elements that are incompatible with the crystalline structure of hematite, and of REEs; and to the localized gain of Ga and Zn due to interactions with igneous rocks (Figs. 5.19, 5.20a, b, c). There was low leaching of silica, with silicification (Fig. 5.20c), and formation of veins in shallow crustal levels due to depressurization.

### **Formation of sulfide breccia**

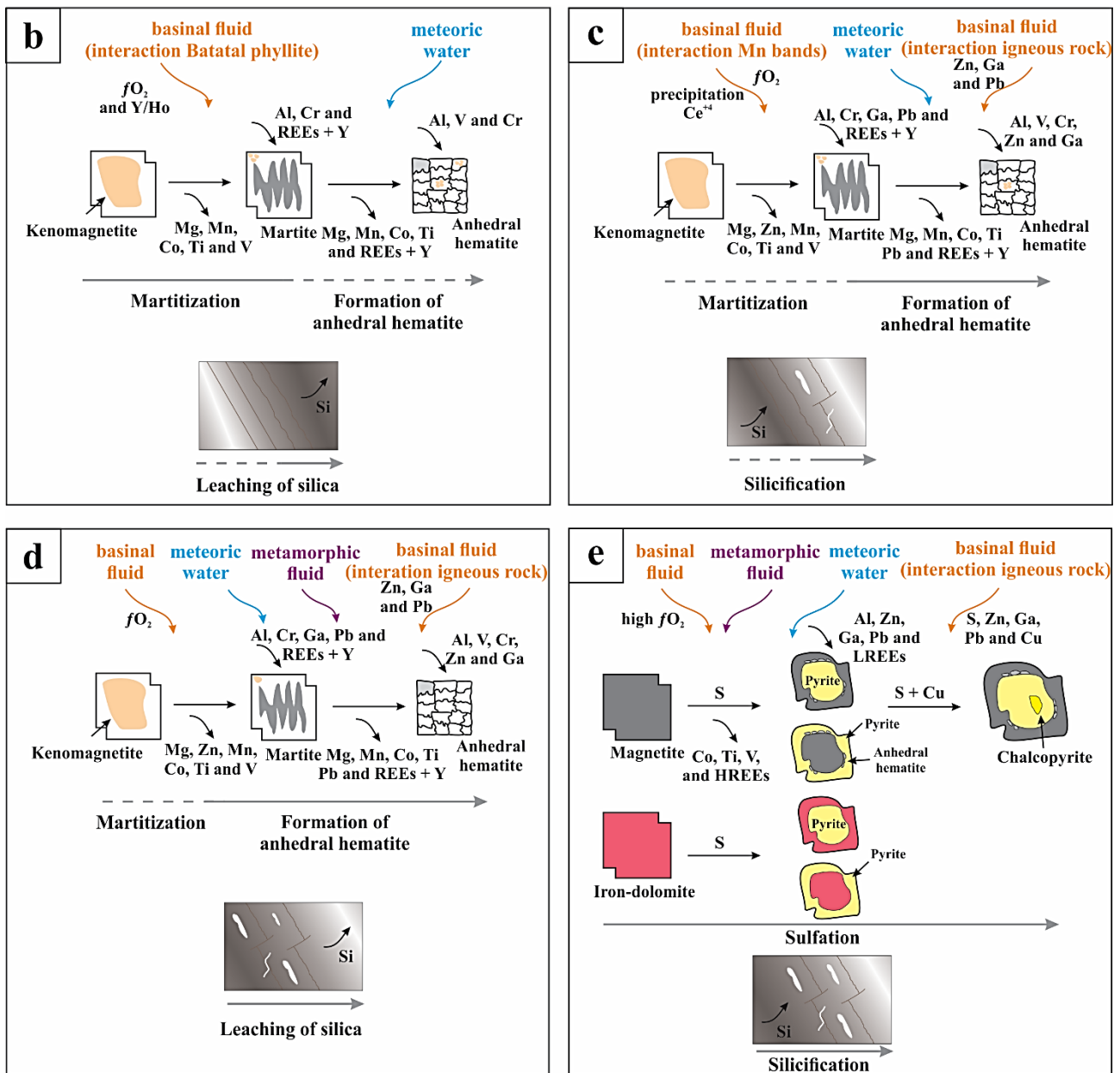
The interaction between fluids and igneous rocks, which would have been sources of S and Cu to form sulfides in the breccia, might have caused a significant enrichment in Zn, Ga and Pb (Figs. 5.19, 5.20e), and LREE, especially Sm (Fig. 5.12d); and loss of the other trace elements in iron oxides. Vanadium was lost due to the oxidizing condition confirmed by the positive values of  $\delta^{34}\text{S}$ . It is also suggested that sulfidation is the last stage of evolution associated with hydrothermal mineralization, since pyrite and chalcopyrite overlapped the other minerals (Figs. 5.6c, d, 5.7d). The formation of grunerite and medium carbonate in veins reflects the involvement of possibly metamorphic fluid (Figs. 5.20a, e). The breccia could also have been formed from dolomite itabirite rich in hydrothermal magnetite and with iron-dolomite (formation of pyrite), located at deep levels (Fig. 5.20a).

Mineralization stages	Martitization		Formation of anhedral hematite	Formation of hydrothermal magnetite and anhedral hematite in sulfide breccia
				
Lithotypes	Quartz-itabirites, iron ore and sulfide breccia	Quartz-itabirites, iron ore and sulfide breccia	Quartz-itabirites, iron ore and sulfide breccia	Sulfide breccia
Mineralogical characteristics	Very fine anhedral kenomagnetite as a relic within magnetite and martite	Very fine to fine euhedral to subhedral martite with high intragranular porosity	Very fine to fine anhedral hematite with moderate intragranular porosity	Fine to medium subhedral hydrothermal magnetite; very fine anhedral hematite. Both with moderate to high intragranular porosity
Trends of discriminating elements, Pb and REEs + Y				

**Figure 5.19:** Mineralization stages of iron oxides in the Minerita deposit with trends of gains and losses of discriminating elements, Pb and REEs + Y. MagII = hydrothermal magnetite; Keno = kenomagnetite; Mar = martite; AHem = anhedral hematite; Py = pyrite; SB = sulfide breccia.







**Figure 5.20:** Schematic hypogene model of the Minerita deposit. **a)** N-S profile, with squares **b**, **c**, **d** and **e** that present enrichment of itabirites, formation of sulfide breccia and physicochemical conditions of the fluids involved in mineralization stages. **b)** Distal hydrothermal zone showing the transition from quartz-veined quartz itabirite into quartz-veined quartz itabirite. Basinal fluid (interaction with Batatal phyllite) and meteoric water. Intense martitization, moderate formation of anhedral hematite and high leaching of silica. **c)** Intermediate zone reflecting the transition from quartz-veined quartz itabirite into itabirite breccia. Basinal fluid (interaction with Mn-rich band and intrusive igneous rocks?) and meteoric water. Low martitization, moderate formation of anhedral hematite and high silicification. **d)** Proximal zone with transition from itabirite breccia into massive high-grade iron ore. Basinal fluid (interaction with intrusive igneous rocks?), meteoric water and metamorphic fluid. Low martitization, intense formation of anhedral hematite and leaching of silica. **e)** Sulfide breccia and formation of magnetite, anhedral hematite, pyrite, chalcopyrite and iron-dolomite in veins. Basinal fluid (interaction with intrusive igneous rocks?), meteoric water and metamorphic fluid. Intense silicification. Dolomite itabirite(?) at deeper levels originating the sulfide breccia.

## 5.6. CONCLUSIONS

The investigation regarding the Minerita deposit was based on the petrographic characteristics of quartz itabirites, high-grade iron ores and sulfide breccia; analyses of fluid inclusions in vein quartz of the quartz-veined high-grade iron ore; determination of trace (Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Zn, Ga, Pb and REEs) in iron oxide generations of the various lithotypes; and sulfur isotopes in pyrite from the sulfide breccia. The main highlights are:

(i) Quartz itabirites (Fig. 5.3) make up distal hydrothermal zone – quartz itabirite; intermediate zone – quartz-veined itabirites and itabirite breccia. Iron ores represents proximal zone – quartz-veined and massive high-grade iron ores (Fig. 5.16b).

(ii) Martite and anhedral hematite are the main iron oxides of quartz itabirites and high-grade iron ores (Fig. 5.16a). They are the result of intense martitization and formation of hydrothermal anhedral hematite (Fig. 5.20a).

(iii) A sulfide breccia (SB), at a depth > 127 m, presents hydrothermal magnetite, anhedral hematite, pyrite and chalcopyrite. The presence of sulfides in association with iron mineralization in itabirites in Minerita deposit is noteworthy, since such occurrence is not well known. Magnetite was formed by dissolution and re-precipitation; anhedral hematite in SB by the interaction between magnetite and S; pyrite and chalcopyrite by sulfidation depending on magnetite (Figs. 5.6c, d, 5.16b, 5.20e), and also with pyrite from carbonate (Fig. 5.7d).

(iv) Fluid inclusion studies show a predominance of aqueous-saline, biphasic (L + V) inclusions, which suggests the involvement of at least two fluids, both with low-temperature (between 108° C and 142° C). One of these fluids has non-salinity and the other, low to moderate-salinity (up to 14.26 % in weight of NaCl eq.) (Table 5.5).

(v) LA-ICP-MS analyses in itabirites and iron ore show that martitization involved a small gain of Al, Cr, Ga and Pb, and loss of Mg, Mn, Co, Ti, V and Zn (Fig. 5.19). The formation of anhedral hematite was followed by enrichment in Al, Cr, V and Zn, and impoverishment in Mg, Ti, Mn, Co and Pb (Fig. 5.19). Both mineralization stages reflect interaction with fluids containing complexation agents (F<sup>-</sup> or Cl<sup>-</sup>), oxidizing to reducing conditions, low to high temperature (> 300 °C) and external source of Ga, Zn and Pb.

(vi) The formation of magnetite and anhedral hematite in the sulfide breccia involved the loss of almost all trace elements, with a significant enrichment in Zn, Ga and Pb (Figs. 5.11, 5.14). This reflects compatible conditions of  $fO_2$  and  $fS_2$  to simultaneously form magnetite, anhedral hematite, pyrite and subordinate chalcopyrite (Fig. 5.17b), and interaction between fluid and igneous rocks (Figs. 5.19, 5.20a, e).

(vii) Fluids caused the loss of a large amount of rare earth elements (REEs) from iron oxides until the formation of iron ores and in the breccia; negative Ce anomalies in itabirites and iron ore (oxidation and precipitation in Mn-rich bands of dolomite itabirite) (Figs. 5.18a, 5.20c); weak positive Eu anomalies in itabirites and iron ore (reduction due to interaction with Batatal phyllite) (Figs. 5.18b, 5.20b); positive Sm anomalies in sulfide breccia (fluid interaction with igneous rocks) (Fig. 5.12d); and Y/Ho ratio within the primitive chondrite interval in itabirites and iron ore (balanced with the Batatal phyllite) (Figs. 5.18b, 5.20b).

(viii) Since isotopic data of sulfur in pyrite of the sulfide breccia indicate a magmatic source for S, it is likely that the mineralizing hydrothermal fluid interacted either with subjacent intrusive igneous rocks (Fig. 5.20a) or, alternatively, rocks of the Rio das Velhas Supergroup, therefore incorporating not only S, but also subordinate Cu.

(ix) The hypogene model proposed for the Minerita deposit suggests the presence of basinal fluid and meteoric water, with contribution from subordinate metamorphic fluid (Fig. 5.20). This model is compatible with what has been suggested by other authors for iron deposits in the Quadrilátero Ferrífero.

(x) Massive iron ores are found preferentially in fault zones, at deep levels (Fig. 5.20a). This might have direct implications in the exploration of iron in the Minerita deposit.

(xi) The interaction between the mineralizing hydrothermal fluid and in the Minerita deposit, based on the interpretation of the sulfur isotopes, can be extrapolated to other iron deposits of the Quadrilátero Ferrífero. Moreover, the proposed hypogene model can be applied in the study of itabirites and their associated iron ores, especially where sulfides are also part of the hydrothermal evolution.

## **5.7. ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors wish to thank the Minerita deposit for the samples donated and all the support provided, particularly the company head, Lucas Fonseca, and the engineering geologist Luiz Eduardo Machado de Castro. They also thank the Microscopy Center of UFMG for the EPMA analyses. The ICP-MS Laboratory of the Geosciences Department of UPOF for the LA-ICP-MS analyses in iron oxides, especially the doctorate students Ana Alkmim and Adriana Trópia are acknowledged for their assistance. Professor Steffen G. Hagemann from the University of Western Australia provided immense help with the sulfur isotope analyses. Doctorate students Sérgio Pereira and Carolin Kresse are also thanked for their support during interpretation. We also wish to thank the Instituto de Geociências, UFMG for their support. This study was financed in part by the the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Finance Code 001. L. M. Lobato and R. C. F. e Silva are recipients of research grants provided by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

O estudo da jazida de ferro Minerita possibilitou o melhor entendimento da alteração hipogênica atuante. Baseou-se nas características petrográficas de seus itabiritos silicosos, minério de ferro de alto teor e brecha com sulfetos, além de inclusões fluidas em quartzo venular do minério de ferro quartzo venulado, de elementos traço (Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Zn, Ga, Pb e ETRs) das gerações de óxidos de ferro dos diferentes litotipos, e dos isótopos de enxofre em pirita na brecha com sulfetos. As principais conclusões são:

(i) Itabiritos silicosos e minérios de ferro de alto teor (Fig. 5.3) perfazem zonas de alteração hidrotermal: distal - itabirito silicoso; intermediária - itabirito quartzo venulado e brecha itabirítica; e proximal - minério de ferro de alto teor quartzo venulado e maciço (Fig. 5.16b).

(ii) Os principais óxidos de ferro dos itabiritos e minério são martita e hematita anédrica (Fig. 5.16a). São produto de intensa martitização e formação de hematita anédrica hidrotermal (Fig. 5.20a).

(iii) Em profundidade > 127 m, uma brecha com sulfetos contém magnetita, hematita anédrica, pirita e calcopirita hidrotermais. A presença de sulfetos em associação à mineralização de ferro nos itabiritos de Minerita chama atenção, uma vez que tal ocorrência é pouco conhecida. Magnetita hidrotermal formou-se por dissolução e reprecipitação; pirita e calcopirita por sulfetação às custas magnetita (Figs. 5.6c, d, 5.16b, 5.20e), com pirita também de carbonato (Fig. 5.7d).

(iv) Microtermometria de inclusões fluidas indicam predominância de inclusões bifásicas (L + V) e aquo-salinas, o que sugere o envolvimento de pelo menos dois fluidos para a mineralização de ferro, ambos com temperatura baixa (108° C a 142° C). Um dos fluidos não apresenta salinidade enquanto o outro possui salinidade baixa a moderada (até 14,26 % em peso de NaCl eq.) (Tabela 5.5).

(v) Análises de LA-ICP-MS em itabiritos e minério mostram que a martitização envolveu pequeno ganho de Al, Cr, Ga e Pb, e perda de Mg, Mn, Co, Ti, V e Zn (Fig. 5.19). A formação de hematita anédrica foi acompanhada de enriquecimento em Al, Cr, V e Zn, e empobrecimento de Mg, Ti, Mn, Co e Pb (Fig. 5.19). Ambos os estágios de mineralização refletem interação com fluidos com agentes de complexação F<sup>-</sup> ou Cl<sup>-</sup>, condições oxidantes a reduzidas, temperatura baixa a alta (> 300° C) e fonte externa de Ga, Zn e Pb.

(vi) Na brecha com sulfetos a formação de magnetita e hematita anédrica envolveu perda de quase todos os elementos traço, com enriquecimento significativo de Zn, Ga e Pb (Figs. 5.11, 5.14). Isso reflete condições de  $fO_2$  e  $fS_2$  compatível para a formação simultânea de magnetita, hematita anédrica, pirita e calcopirita subordinada (Fig. 5.17b), e interação do fluido com rochas ígneas (Figs. 5.19, 5.20a, e).

(vii) Os fluidos causaram perda de grande quantidade de elementos terras raras (ETRs) dos óxidos de ferro até a formação do minério e na brecha; anomalia negativa de Ce nos itabiritos e minério



(oxidação e precipitação em bandas ricas em Mn do itabirito dolomítico) (Figs. 5.18a, 5.20c); fraca positiva de Eu nos itabiritos e minério (redução devido interação com filito Batatal) (Figs. 5.18b, 5.20b); anomalia positiva de Sm na brecha com sulfetos (interação do fluido mineralizador com rochas ígneas) (Fig. 5.12d); e razão Y/Ho dentro da faixa do condrito primitivo nos itabiritos e minério (equilibrado com filito Batatal) (Figs. 5.18b, 5.20b).

(viii) É possível que o fluido hidrotermal mineralizador tenha interagido com rochas ígneas intrusivas subjacentes (Fig. 5.20a) ou, alternativamente, do Supergrupo Rio das Velhas, com incorporação não só de S, mas também de Cu subordinado, devido aos dados isotópicos de enxofre em pirita da brecha com sulfetos indicarem fonte magmática para S.

(ix) Para jazida Minerita o modelo hipogênico proposto sugere a presença de fluido basinal e água meteórica, com fluido metamórfico subordinado (Fig. 5.20), compatível com o que é preconizado por outros autores para jazidas de ferro do Quadrilátero Ferrífero.

(x) Minério de ferro maciço é encontrado preferencialmente em zonas de falha, com o aumento da profundidade (Fig. 5.20a). Isso pode ter implicações diretas na exploração de ferro da jazida.

(xi) A interação do fluido mineralizador com rochas ígneas na jazida Mineirita, com base na interpretação dos isótopos de enxofre, pode ser extrapolada para outros depósitos de ferro do Quadrilátero Ferrífero. O modelo hipogênico proposto poderá ser aplicado no estudo de itabiritos e seus minérios associados, em especial onde sulfetos também fazem parte da evolução hidrotermal.

## CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, C., Alkmim, F. F., Lana, C., Farina, F. (2017). Palaeoproterozoic assembly of the São Francisco craton, SE Brazil: New insights from U-Pb titanite and monazite dating. *Precambrian Research*, 289, p. 95-115.
- Alkmim, F. F.; Marshak, S. (1998). Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90, p. 29-58.
- Alkmim, F. F. (2009). Principais traços geológicos da Serra do Curral entre o vale do Paraopeba e Ponta da Serra. *Mineração Usiminas*, relatório técnico não publicado.
- Alkmim, F. F.; Martins-Neto, M. A. (2012). Proterozoic first-order sedimentary sequence of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33, p. 127-139.
- Alkmim, F. F.; Teixeira, W. (2017). The Paleoproterozoic mineiro belt and the Quadrilátero Ferrífero. In: *São Francisco Craton, eastern Brazil: tectonic genealogy of a miniature continent*, p. 71-94.
- Alkmim, A. R. (2014). *Investigações geoquímicas e estratigráficas da Formação Ferrífera Cauê na porção centro-oriental do Quadrilátero Ferrífero, MG*. Tese (Mestrado). Ouro Preto: Escola de Minas, Departamento de Geologia – UFOP.
- Allan, M. M.; Yardley, B. W.; Forbes, L. J.; Shmulovich, K. I.; Banks, D. A.; Shepherd, T. J. (2005). Validation of LA-ICP-MS fluid inclusion analysis with synthetic fluid inclusions. *American Mineralogist*, 90, p. 1767-1775.
- Almeida, F. F. M. (1977). O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7, p. 349-364.
- Amorim, L. Q.; Alkmim, F. F. (2011). New ore type from Cauê banded iron-formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil – Responses to the growing demand. *Iron Ore Conference*, Perth, p. 59-71.
- Anderson, M. R.; Rankin, A. H.; Spiro, B. (1992). Fluid mixing in the generation of mesothermal gold mineralisation in the Transvaal Sequence, Transvaal South Africa. *European Journal of Mineralogy*, 4, p. 933-948.
- Angerer, T.; Hagemann, S. G.; Danyushevsky, L. V. (2012). Geochemical evolution of the banded iron formation-hosted high-grade iron ore system in the Koolyanobbing greenstone belt, Western Australia. *Economic Geology*, 107, p. 599-644.
- Angerer, T.; Hagemann, S. G.; Danyushevsky, L. (2013). High-grade iron ore at Windarling, Yilgarn Craton: a product of syn-orogenic deformation, hypogene hydrothermal alteration and supergene modification in an Archean BIF-basalt lithostratigraphy. *Mineralium Deposita*, 48, p. 697-728.
- Araújo, J. C. S. (2018). *Modelo deposicional das formações ferríferas bandadas hospedeiras de ouro no greenstone belt arqueano Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, com base em geoquímica e análises in situ por ablação ICP-MS a laser de magnetita*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências – UFMG.
- Bailly, L.; Bouchot, V.; Bény, C.; Milési, J. P. (2000). Fluid inclusion study of stibinite using infrared microscopy: an example from the Brouzils Antimony Deposit (Vendée, Armorican Massif, France). *Economic Geology*, 95, p. 221-226.
- Baltazar, O. F.; Zucchetti, M. (2007). Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 32, p. 471-499.
- Barbosa, A. L. M. (1968). Contribuições recentes à geologia do Quadrilátero Ferrífero. Belo Horizonte: SBG-MG. Reimpressão (1985): UFMG, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia.

- Barbosa, P. F.; Lagoeiro, L. (2010). Crystallographic texture of the magnetite-hematite transformation: evidence for topotactic relationships in natural samples from Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *American Mineralogist*, 9, p. 118-125.
- Barnes, H. L. (1997). *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York, John Wiley and Sons, 3, p. 972.
- Bateman, R.; Hagemann, S. G. (2004). Gold mineralisation throughout about 45 Ma of Archaean orogenesis: 872 protracted flux of gold in the Golden Mile, Yilgarn craton, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 39, p. 536-559.
- Bau, M. (1996). Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123, p. 323-333.
- 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, p. 37-55.
- Bekker, A.; Holland, H. D.; Wang, P. L.; Rumble III, D.; Stein, H. J.; Hannah, J. L.; Coetzee, L. L.; Beukes, N. J. (2004). Dating the rise of atmospheric oxygen. *Nature*, 427, p. 117-120.
- Bekker, A.; Slack, J.; Planavsky, N.; Krapez, B.; Hotmann, 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, p. 467-508.
- Beukes, N. J.; Gutzmer, J.; Mukhopadhyay, J. (2003). The geology and genesis of high-grade hematite iron ore deposits. *Iron Ore Conference*, p. 23-29. Perth.
- Bhattacharya, H. N.; Chakraborty, I.; Ghosh, K. (2007). Geochemistry of some banded iron-formations of the Archean supracrustals, Jharkhand-Orissa region, India. *Journal of Earth System Science*, 116, p. 245-259.
- Bodnar, R. J.; Burnham, C. W.; Sterner, S. M. (1985). Synthetic fluid inclusions in natural quartz: III. Determination of phase equilibrium properties in the system H<sub>2</sub>O–NaCl to 1000°C and 1500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, p. 1861-1873.
- Brown, P. E.; Hagemann, S. G. (1995). MacFlinCor and its application to fluids in Archaean lode-gold deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, p. 3943-3952.
- Carlos, D. U.; Uieda, L.; Barbosa, V. C. F. (2014). Imaging iron ore from the Quadrilátero Ferrífero (Brazil) using geophysical inversion and drill hole data. *Ore Geology Reviews*, 61, p. 268-285.
- Carneiro, M. A. (1992). *O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais): litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do arqueano*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.
- Carneiro, M. A.; Ulbrich, H. H. G. J.; Kawashita, K. (1992). Proterozoic crustal evolution at the southern margin of the Amazonian Craton in the state of Mato Grosso, Brazil: Evidence from Rb-Sr and K-Ar data. *Precambrian Research*, 59, p. 263-282.
- Carneiro, M. A.; Teixeira, W.; Machado, N. (1994). Geological evolution of a sialic Archean crustal fragment from the Quadrilátero Ferrífero in eastern-central Brazil, based on U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr and K-Ar isotopic constraints. *Terra Nostra*, 2, p. 12-13.
- Carneiro, M. A.; Noce, C. M.; Teixeira, W. (1995). Evolução policíclica do Quadrilátero Ferrífero: uma análise fundamentada no conhecimento atual da geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Sm-Nd. *Revista da Escola de Minas*, 38, p. 264-273.
- Chauvet, A.; Faure, M.; Dossin, I.; Charvet, J. (1994). A three-stage structural evolution of the Quadrilátero Ferrífero: consequences for the Neoproterozoic age and the formation of gold concentrations of the Ouro Preto area, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 68, p. 139-167.
- Chemale, Jr. F.; Rosière, C. A.; Endo, I. (1994). The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Precambrian Research*, 65, p. 25-54.

- Clout, J. M. F. (1989). *Structural and isotopic studies of the Golden Mile gold–telluride deposit, Kalgoorlie, WA*. Tese (Doutorado). Melbourne: Universidade de Monash, Austrália.
- Clout, J. M. F.; Simonson, B. M. (2005). Precambrian Iron Formation and Iron Formation-Hosted Iron Ore Deposits. *Economic Geology 100th Anniversary*, p. 643-679.
- CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (2004). *Programa de mapeamento geológico, projeto Quadrilátero Ferrífero*. Escala 1:100.000. Belo Horizonte: USGS/DNPM.
- Dalstra, H. J.; Rosière, C. A. (2008). Structural controls on high-grade iron ores hosted by banded iron formation: a global perspective. In: Hagemann, S.; Rosière, C. A.; Gutzmer, J.; Beukes, N. J. (eds.), *Reviews Economic Geology Society of Economic Geologists*, p. 73-106.
- Dang, M. Z.; Rancourt, D. G.; Dutrizac, J. E.; Lamarche, G.; Provencher, R. (1998). Interplay of surface conditions, particle size, stoichiometry, cell parameters, and magnetism in synthetic hematite-like materials. *Hyperfine Interactions*, 117, p. 271-319.
- Dare, S. A. S.; Barnes, S. J.; Beaudoin, G. (2012). Variation in trace element content of magnetite crystallized from a fractionating sulfide liquid, Sudbury, Canada: implications for provenance discrimination. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 88, p. 27-50.
- Dare, S. A. S.; Barnes, S. J.; Beaudoin, G.; Méric, J.; Boutroy, E.; Potvin-Doucet, C. (2014). Trace elements in magnetite as petrogenetic indicators. *Mineralium Deposita*, 49, p. 785-796.
- Dismukes, G. C.; Klimov, V. V.; Baranov, S. V.; Kozlov, Y. N.; Dasgupta, J.; Tyryshkin, A. (2001). The origin of atmospheric oxygen on Earth: The innovation of oxygenic photosynthesis. *PNAS*, 98 (5), p. 2170-2175.
- Dorr, J. V. N. (1964). Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, 59(7), p. 1203-1239.
- Dorr, J. V. N. (1965). Nature and origin of the high-grade hematite ores of Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, 60(1), p. 1-46.
- Dorr, J. V. N. (1969). Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *USGS Professional Paper*, 641 (A), p. 110.
- Drabek, M. (1982). The system Fe–Mo–S–O and its geologic application. *Economic Geology*, 77, p. 1053-1056.
- Dupuis, C.; Beaudoin, G. (2011). Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types. *Mineralium Deposita*, 46, p. 319-335.
- Duuring, P.; Hagemann, S. G. (2012). Leaching of silica bands and concentration of magnetite in Archean BIF by hypogene fluids: Beebyn Fe ore deposit, Yilgarn Craton, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 48, p. 341-370.
- Duuring, P.; Hagemann, S. G.; Banks, D. A.; Schindler, C. (2018). A synvolcanic origin for magnetite-rich orebodies hosted by BIF in the Weld Range District, Western Australia. *Ore Geology Reviews*, 93, p. 211-254.
- Eichler, J. (1967). Das physikalische Milieu bei der Verwitterung von Itabiriten in Minas Gerais/Brasilien. *Chemie der Erde*, 26 (2), p. 119-132.
- Eschwege, W. L. V. (1822). Geognostisches Gemälde von Brasilien und wahrscheinliches Muttergestein der Diamanten. *Weimar*, 44.
- Farquhar, J.; Bao, H.; Thiemens, M. (2000). Atmospheric influence of earth's earliest sulfur cycle. *Science*, 28, p. 756-758.
- Farquhar, J.; Wing, B. A. (2003). Multiple sulfur isotopes and evolution of the atmosphere. *Earth Planet Science Letters*, 213, p. 1-13.



- Farquhar, J.; Cliff, J.; Zerkle, A. L.; Kamyshny, A.; Poulton, S. W.; Claire, M.; Adams, D.; Harms, B. (2013). Pathways for Neoproterozoic pyrite formation constrained by mass-independent sulfur isotopes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, p. 17638-17643.
- Figueiredo e Silva, R. C.; Hagemann, S. G.; Lobato, L. M.; Rosière, C. A.; Banks, D. A.; Davidson, G. J.; Vennemann, T.; Hergt, J. (2013). Hydrothermal fluid processes and evolution of the giant Serra Norte jaspilite hosted iron ore deposits, Carajás Mineral Province, Brazil. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 108, p. 739-779.
- Fleet, M. (1981). The structure of magnetite. *Acta Crystallographica*, B37, p. 917-920.
- Frost, B. R. (1991c). Stability of oxide minerals in metamorphic rocks. In: Lindsley, D. H. (ed.), *Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance*. Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, p. 469-487.
- Fuzikawa, K. (1985). Inclusões fluidas: métodos usuais de estudo e aplicações. *Boletim Especial da Sociedade Brasileira de Geologia e Mineralogia*, p. 29-44.
- Goldstein, R. H.; Reynolds, T. J. (1994). Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. *SEPM Short Course*, 31, p. 199.
- Gomes, S. D.; Berger, S.; Figueira e Silva, R. C.; Hagemann, S. G.; Rosière, C. A.; Banks, D. A.; Lobato, L. M.; Hensler, A. S. (2018). Oxide chemistry and fluid inclusion constraints on the formation of itabirite-hosted iron ore deposits at the eastern border of the southern Espinhaço Range, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 95, p. 821-848.
- Grant, J. A. (1986). The isocon diagram: a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 81, p. 1976-1982.
- Gregory, D. D.; Large, R. R.; Bath, A. B.; Steadman, J. A.; Wu, S.; Danyushevsky, L.; Ireland, T. R. (2016). Trace Element Content of Pyrite from the Kapai Slate, St. Ives Gold District, Western Australia. *Economic Geology*, 111(6), p. 1297-1320.
- Gresens, R. L. (1967). Composition–volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, 2, p. 47-65.
- Gross, G. A. (1983). Tectonic systems and the deposition of iron-formation. *Precambrian Research*, 20, p. 171-187.
- Günther, D.; Frischknecht, R.; Heinrich, C. A.; Kahlert, H. J. (1997). Capabilities of an argon fluoride 193nm excimer laser for laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry microanalysis of geological materials. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 12, p. 939-944.
- Hagemann, S. G.; Bateman, R.; Crowe, D.; Vielreicher, R. (1999). In situ sulfur isotope composition of pyrites from the Fimiston and Oroya style gold lodes in the Golden camp, Kalgoorlie: implications for sulfur source(s) and depositional processes. *Geological Society of America*.
- Hagemann, S. G.; Witt, W. K.; Fiorentini, M. (2014). Introduction to using research to benefit mineral exploration. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61 (1), p. 1-3.
- Harnmeijer, J. P. (2003). *Banded Iron Formation: A Continuing Enigma of Geology*. University of Washington, p. 25.
- Hartmann, L. A.; Endo, I.; Suita, M. T. F.; Santos, J. O. S.; Frantz, J. C.; Carneiro, M. A.; McNaughton, N. J.; Barley, M. E. (2006). Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U-Pb isotopes. *Journal of South American Earth Sciences*, 20, p. 273-285.
- Hensler, A. S.; Hagemann, S. G.; Brown, P. E.; Rosière, C. A. (2014). Using oxygen isotope chemistry to track hydrothermal processes and fluid sources in itabirite-hosted iron ore deposits in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Mineralium Deposita*, 49, p. 293-311.
- Hensler, A. S.; Hagemann, S. G.; Rosière, C. A.; Angerer, T.; Gilbert, S. (2015). Hydrothermal and metamorphic fluid rock interaction associated with hypogene hard iron ore mineralization in the

- Quadrilátero Ferrífero, Brazil: Implications from in-situ laser ablation ICP-MS iron oxide chemistry. *Ore Geology Reviews*, 69, p. 325-351.
- Hensler, A. S.; Rosière, C. A.; Hagemann, S. G. (2017). Iron oxide mineralization at the contact zone between phyllite and itabirite of the Pau Branco deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: Implications for fluid-rock interaction during iron ore formation. *Economic Geology*, 112, p. 941-982.
- Herz, N. (1978). Metamorphic rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, 641(C), p. 1-81.
- Hodkiewicz, P. F.; Groves, D. I.; Davidson, G. J.; Weinberg, R. F.; Hagemann, S. G. (2009). Influence of structural setting on sulphur isotopes in Archean orogenic gold deposits, Eastern Goldfields Province, Yilgarn, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 44, p. 129-150.
- Holland, H. D. (2006). The oxygenation of the atmosphere and oceans. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 361, p. 903-915.
- Hou, K.; Li, Y.; Wan, D. (2007). Constraints on the Archean atmospheric oxygen and sulfur cycle from mass-independent sulfur records from Anshan-Benxi BIFs, Liaoning Province, China. *Science China*, D50, p. 1471-1478.
- Humphris, S. E.; Alt, J. C.; Teagle, D. A. H.; Honnorez, J. J. (1998). Geochemical changes during hydrothermal alteration of basement in the stockwork beneath the active TAG hydrothermal mound. In: Herzig, P. M.; Humphris, S. E.; Miller, D. J.; Z, R. A. (eds), *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, p. 255-276.
- Jamieson, J. W.; Wing, B. A.; Farquhar, J.; Hannington, M. D. (2013). Neoproterozoic seawater sulphate concentrations from sulphur isotopes in massive sulphide ore. *Nature Geoscience*, 6, p. 61-64.
- Klein, C. (2005). Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry and origin. *American Mineralogist*, 90, p. 1473-1499.
- Kullerød, G.; Donnay, G.; Donnay, J. D. H. (1969). Omission solid solution in magnetite: Kenotetrahedral magnetite. *Zeitschrift für Kristallographie*, 128, p. 1-17.
- Ladeira, E. A. (1980). Metallogenesis of gold at the Morro Velho Mine, and in the Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Tese (Doutorado). Canada: University of Western Ontario.
- LaFlamme, C.; Martin, L.; Jeon, H.; Reddy, S. M.; Selvaraja, V.; Caruso, S.; Bui, T. H.; Roberts, M. P.; Voute, F.; Hagemann, S.; Wacey, D.; Littman, S.; Wing, B.; Fiorentini, M.; Kilburn, M. R. (2016). In situ multiple sulfur isotope analysis by SIMS of pyrite, pyrrhotite and pentlandite to refine magmatic ore genetic models. *Chemical Geology*, 444, p. 1-15.
- Lagoeiro, L. E. (2004). Transformation of magnetite to hematite and its influence on the dissolution of iron oxide minerals. *Journal of Metamorphic Geology*, 16, p. 415-423.
- Lana, C.; Alkmim, F. F.; Armstrong, R.; Scholz, R.; Romano, R.; Nalini Jr., H. A. (2013). The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. *Precambrian Research*, 231, p. 157-173.
- Laznicka, P. (2010). Giant Metallic Deposits, Future Sources of Industrial Metals. *Springer*, 2, p. 949.
- Li, D.; Fu, Y.; Sun, X.; Hollings, P.; Liao, J.; Liu, Q.; Feng, Y.; Liu, Y.; Lai, C. (2018). LA-ICP-MS trace element mapping: Element mobility of hydrothermal magnetite from the giant Beiya Fe-Au skarn deposit, SW China. *Ore Geology Reviews*, 92, p. 463-474.
- Liang, M. C.; Hartman, H.; Kopp, R. E.; Kirschvink, J. L. (2006). Production of hydrogen peroxide in the atmosphere of a snowball Earth and the origin of oxygenic photosynthesis. *PNAS*, 103 (50), p. 18896-18899.
- Lindsley, D. H. (1976). The crystal chemistry and structure of oxide minerals as exemplified by the Fe-Ti oxides. *Mineralogical Society of America, Short Course Notes* 3, p. L1-L60.

- Lobato, L. M.; Ribeiro-Rodrigues, L. C.; Vieira, F. W. R. (2001a). Brazil's premier gold province. Part II: geology and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, 36, p. 249-277.
- Lobato, L. M.; Figueiredo e Silva, R. C.; Hagemann, S.; Thorne, W.; Zucchetti, M. (2008). Hypogene alteration associated with high-grade banded iron formation-related iron ore. *Society of Economic Geology*, 15, p. 107-128.
- Lobato, L. M.; Renger, F. E.; Figueiredo e Silva, R. C.; Rosière, C. A.; Baars, F. J.; Rolim, V. K. (2014). Metalogênese do setor meridional do cráton São Francisco. In: M. G. Silva, M. B. R. Neto, H. Jost, R. M. Kuyumjian (Eds.), *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras* (119-140). Belo Horizonte: CPRM.
- Longerich, H. P.; Diegor, W. (2001). Introduction to mass spectrometry. In: Sylvester P. (ed.). *Laser – Ablation – ICPMS in the Earth Sciences—Principles and Applications*. *Mineralogical Association of Canada*, St. John's, Newfoundland, 29, p. 1-19.
- Luczaj, J.; Huang, H. (2018). Copper and sulfur isotope ratios in Paleozoic-hosted Mississippi Vally-type mineralization in Wisconsin, USA. *Applied Geochemistry*, 89, p. 173-179.
- Lüders, V.; Ziemann, M. (1999). Possibilities and limits of infrared light microthermometry applied to studies of pyrite-hosted fluid inclusions. *Chemical Geology*, 154(1-4), p. 169-178.
- Lyons, J. R. (2009). Atmospherically-derived mass-independent sulfur isotope signatures, and incorporation into sediments. *Chemical Geology*, 267, p. 164-174.
- Machado, N.; Schrank, A.; Abreu, F. R.; Knauer, L. G.; Almeida-Abreu, P. A. (1989). Resultados preliminares da geocronologia U/Pb na Serra do Espinhaço Meridional. In: *SBG, Simpósio Geologia de Minas Gerais*, 5, p. 171-174.
- Machado, N.; Carneiro, M. A. (1992). U-Pb evidence of the late Archean tectono-thermal activity in the southern São Francisco shield, Brazil. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 29, p. 2341-2346.
- Makvandi, S.; Beaudoin, G.; McClenaghan, M. B.; Quirt, D. (2017). Geochemistry of magnetite and hematite from unmineralized bedrock and local till at the Kiggavik uranium deposit: Implications for sediment provenance. *Journal of Geochemical Exploration*, 183, p. 1-21.
- Marshak, S.; Alkmim, F. F. (1989). Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, 8, p. 555-571.
- Maxwell, C. H. (1958). The Batatal Formation. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 2(7), p. 60-61.
- McDonough, W. F.; Frey, F. A. (1989). Rare earth elements in upper mantle rocks. In: B. R. Lipin and G. A. McKay (eds.), *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21, p. 99-145.
- McLennan, S. M. (1989). Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Review of Mineralogy*, 21, p. 169-200.
- Mendes, M.; Lagoeiro, L. (2012). Microstructures, crystallographic fabric development and deformation mechanisms in natural hematite aggregates deformed under varied metamorphic conditions. *Journal of Structural Geology*, 40, p. 29-43.
- Mendes, M. (2015). *Gênese dos itabiritos e minérios hipogênicos do Quadrilátero Ferrífero com base em geoquímica e isótopos de ferro e geocronologia de rochas associadas*. Tese (Doutorado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências – UFMG.
- Mendes, M.; Lobato, L. M.; Kunzmann, M.; Halverson, G. P.; Rosière, C. A. (2017). Iron isotope and REE+Y composition of the Cauê banded iron formation and related iron ores of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Mineralium Deposita*, 52, p. 159-180.

- Milani, L.; Bolhar, R.; Cawthorn, R. G.; Frei, D. (2016). In situ LA-ICP-MS and EPMA trace element characterization of Fe-Ti oxides from the phoscorite-carbonatite association at Phalaborwa, South Africa. *Mineralium Deposita*, 52, p. 747-768.
- Minerita – Minérios de Itaúna Ltda (2007). Relatório final de pesquisa da jazida Minerita. *DNPM*, relatório técnico não publicado.
- Morgan, R.; Orberger, B.; Rosière, C. A.; Wirth, R.; Carvalho, C. M.; Bellver-Baca, M. T. (2013). The origin of coexisting carbonates in banded iron formations: a micromineralogical study of the 2.4 Ga Itabira Group, Brazil. *Precambrian Research*, 224, p. 491-511.
- Mukhopadhyay, J.; Gutzmer, J.; Beukes, N. J.; Hayashi, K. I. (2008). Stratabound magnetite deposits from the eastern outcrop belt of Archaean Iron Ore Group, Singhbhum Craton, India. *Earth Science*, 117, p. 175-186.
- Mücke, A.; Cabral, A. R. (2005). Redox and nonredox reactions of magnetite and hematite in rocks. *Chemie der Erde Geochemistry*, 65, p. 271-278.
- Nadoll, P.; Koenig, A. E. (2011). LA-ICP-MS of magnetite: methods and reference materials. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26, p. 1872-1877.
- Nadoll, P.; Angerer, T.; Mauk, J. L.; French, D.; Walshe, J. (2014). The chemistry of hydrothermal magnetite: A review. *Ore Geology Reviews*, 61, p. 1-32.
- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in Carbonaceous and Ordinary Chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38, p. 757-775.
- Noce, C. M. (1995). *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.
- Oliveira, L. A. R.; Rosière, C. A.; Rios, F. J.; Andrade, S.; Moraes, R. (2013). REE + Y chemistry of iron oxides from Fe high-grade ores and BIFs from the Esperança Mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil — first results. 12th SGA Biennial Meeting. The Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Uppsala, Sweden.
- Oliveira, L. A. R. (2015). *Mineralizações ferríferas (especularíticas) e depósitos do tipo Jacutinga (Au-Pd-Pt), Quadrilátero Ferrífero e sul da Serra do Espinhaço (MG)*. Tese (Doutorado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências – UFMG.
- Oliveira, L. A. R.; Rosière, C. A.; Rios, F. J.; Andrade, S.; Moraes, R. (2015). Chemical fingerprint of iron oxides related to iron enrichment of banded iron formation from the Cauê Formation - Esperança Deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: a laser ablation ICP-MS study. *Brazilian Journal of Geology*, 45 (2), p. 193-216.
- Oliveira, L. A. R.; Rios, F. J.; Rosière, C. A.; Walle, M.; Orтели, M.; Kouzmanov, K. (2017). Nature and Evolution of fluids associated with specularite-bearing Fe and Au-PGE (Jacutinga) mineralization during the Brasiliano orogeny in the eastern São Francisco Craton, Minas Gerais, Brasil. *Ore Geology Reviews*, 86, p. 130-153.
- Otake, T.; Wesolowski, D. J.; Anovitz, L. M.; Allard, L. F.; Ohmoto, H. (2007). Experimental evidence for non-redox transformations between magnetite and hematite under H<sub>2</sub>-rich hydrothermal conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 257, p. 60-70.
- Pavlov, A.; Kasting, J. (2002). Mass-independent fractionation of S isotopes in Archean sediments: strong evidence for an anoxic Archean atmosphere. *Astrobiology*, 2, p. 27-41.
- Phillips, G. N.; Groves, D. I.; Neall, F. B.; Donnelly, T. H.; Lambert, I. (1986). Anomalous sulfur isotope compositions in the Golden Mile, Kalgoorlie. *Economic Geology*, 81, p. 2008-2015.
- Philippot, P.; Van Zuilen, M.; Lepot, K.; Thomazo, C.; Farquhar, J.; Van Kranendonk, M. J. (2007). Early Archaean microorganisms preferred elemental sulfur, not sul-fate. *Science*, 317, p. 1534-1537.



- Pires, F. R. M. (1995). Textural and mineralogical variations during metamorphism of the Proterozoic Itabira Iron Formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 67(1), p. 77-105.
- Pires, F. R. M.; Aranha, D. M.; Cabral, A. R. (2005). Volcanic Origin of the Proterozoic Itabira Iron Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Iron Ore*, p. 119-121.
- Planavsky, N.; Bekker, A.; Rouxel, O. J.; Knudsen, A.; Lyons, T. W. (2010). Rare earth element and yttrium compositions of Archean and Paleoproterozoic iron formations revisited: new perspectives on the significance and mechanisms of deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, p. 6387-6405.
- Prado, E. M. G.; Silva, A. M.; Ducart, F.; Toledo, C. L. B.; Assis, L. M. (2016). Reflectance spectroradiometry applied to a semi-quantitative analysis of the mineralogy of the N4ws deposit, Carajás Mineral Province, Pará, Brasil. *Ore Geology Reviews*, 78, p. 101-119.
- Provino, A.; Gschneidner Jr., K. A.; Manfrinetti, P. (2010). Structure and thermal stability of the RMgPb rare earth compounds, and the anomalous melting behavior of SMMgPb. *Journal of Alloys and Compounds*, 497, p. 131-138.
- Pufahl, P. K. (2010). Bioelemental sediments. In: N.P James and R.W. Dalrymple (eds). *Facies Models* 4th edition. Geological Association of Canada, p. 477-504.
- Pufahl, P. K.; Hiatt, E. E. (2012). Oxygenation of the Earth's atmosphere-ocean system: A review of physical and chemical sedimentologic responses. *Marine and Petroleum Geology*, 32, p. 1-20.
- Pufahl, P. K.; Pirajno, F.; Hiatt, E. E. (2013). Riverine mixing and fluvial iron formation: a new type of Precambrian biochemical sediment. *Geology*, 41 (12), p. 1235-1238.
- Purtov, V. K.; Kotelnikova, A. L. (1993). Solubility of titanium in chloride and fluoride hydrothermal solutions. *International Geology Review*, 35, p. 279-287.
- Putnis, A. (2009). Mineral Replacement Reactions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 70, p. 87-124.
- Ramanaidou, E.; Nahon, D.; Decarreau, A.; Melfi, A. J. (1996). Hematite ad goethite from duricrusts developed by lateritic chemical weathering of Precambrian banded iron formations, Minas Gerais, Brazil. *Clays and clay minerals*, 44 (1), p. 22-31.
- Renger, F. S.; Noce, C. M.; Romano, A. W.; Machado, N. (1994). Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, 2 (1), p. 1-11.
- Renger, F. E.; Noce, C. M.; Romano, A. W.; Machado, N. (1995). Stratigraphic evolution of the Minas Supergroup: 500 Ma geologic record in the Iron Quadrangle, Minas Gerais, Brazil. *Geonomos*, 2 (1), p. 1-11.
- Ribeiro, Y.; Figueira e Silva, R. C.; Lobato, L. M.; Lima, L. C.; Rios, F. J.; Hagemann, S. G.; Cliff, J. (2015). Fluid inclusion and sulfur and oxygen isotope studies on quartz-carbonate-sulfide veins of the Carvoaria Velha deposit, Córrego do Sítio gold lineament, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 67, p. 11-13.
- Richards, J. P.; Kerrich, R. (1993). Observations of zoning and fluid inclusions in pyrite using a transmitted infrared light microscope. *Economic Geology*, 88, p. 716-723.
- Robb, L. (2005). *Introduction to Ore-Forming Processes*. Cornwall: Blackwell Publishing.
- Robert, F.; Poulsen, K. H. (2001). Vein formation and deformation in greenstone gold deposits. In: Richards, J. P.; Tosdal, R. M. Structural Controls on Ore Genesis: *Reviews in Economic Geology*, v. 14, p. 111-155.
- Roedder, E. (1972). Composition of fluid inclusions. *USGS Data Geochemistry*, 440, p. 164.
- Roedder, E. (1984). Fluid Inclusions. *Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy*, 12, p. 664.

- Romano, R. (1989). *Evolution tectonique de la région NW du Quadrilatère Ferrifère- Minas Gerais, Brésil*. Unpublished PhD Thesis. France: University of Nancy, p. 259.
- Romano, A. W.; Bertrand, J. M.; Michard, A.; Zimmermann, J. L. (1991). Tectonique tangentielle et décrochements d'âge Proterozoïque inférieur (orogénèse transamazonienne, environ 2000 Ma) au Nord du "Quadrilatère ferrifère" (Minas Gerais Brésil). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 313 (II), p. 1195-1200.
- Romano, R.; Lana, C.; Alkmim, F. F.; Stevens, G. S; Armstrong, R. (2013). Stabilization of the southern portion of the São Francisco Craton, SE Brazil, through a long-lived period of the potassic magmatism. *Precambrian Research*, 244, p. 143-159.
- Rosière, C. A. (1981). Strukturelle und Texturale Untersuchungen in der Eisenerzlagerstätte "Pico Itabira" bei Itabirito, Minas Gerais. *Brasilien Clausthaler Geowissenschaftliche Dissertationen*, 9, p. 302.
- Rosière, C. A.; Chemale Jr., F. (2000). Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – Uma visão geral e discussão. *Geonomos*, 8(2), p. 27-43.
- Rosière, C. A.; Siemes, H.; Quade, H.; Brokmeier, H. G.; Jansen, E. (2001). Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. *Journal of Structural Geology*, 23(8), p. 1429-1440.
- Rosière, C. A.; Rios, F. J. (2004). The origin of hematite in high grade iron ores based on infrared microscopy and fluid inclusion studies: the example of the Conceição mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Economic Geology*, 99, p. 611-624.
- Rosière, C. A.; Spier, C. A.; Rios, F. J.; Suckau, V. E. (2008). The itabirite from the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade ores: an overview. *Reviews in Economic Geology*, 15, p. 223-254.
- Rosière, C. A.; Sanglard, J.; Schneider, J.; McNaughton, N.; Fletcher, I. R.; Suckau, V. E.; Spier, C. A. (2012). Structural control and age of the high-grade iron ore of the Quadrilátero Ferrífero, Brasil. 16<sup>th</sup> Peruvian Geological Congress and SEG 2012 Conference. Society of Economic Geologists, Lima, Peru.
- Sampaio, G. M. S.; Pufahl, P. K.; Raye, U.; Kyser, K. T.; Abreu, A. T.; Alkmim, A. R.; Nalini Jr, H. A. (2018). Influence of weathering and hydrothermal alteration on the REE and  $\delta^{56}\text{Fe}$  composition of iron formation, Cauê Formation, Iron Quadrangle, Brazil. *Chemical Geology*, 497, p. 27-40.
- Sanglard, J.; Rosière, C. A.; Suckau, V. E.; Amaral, U.; Meireles, H. (2011). The structure of the western Serra do Curral Range, Quadrilátero Ferrífero and the tectonic control of the high-grade Fe-orebodies. 11<sup>th</sup> Biennial Meeting SGA 2011. The Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Antofagasta, Chile.
- Sanglard, J. C. D.; Rosière, C. A.; Santos, J. O. S.; McNaughton, N. J.; Fletcher, I. R. (2014). A estrutura do segmento oeste da Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, e o controle tectônico das acumulações compactas de alto teor em Fe. *Boletim Geologia USP: Série científica*, 14 (1), p. 81-95.
- Schrank, A.; Abreu, F. R.; Roig, H. L.; Choudhuri, A.; Carvalho, E. D. R. (1990). Determinação dos vetores de transporte tectônico da borda sudoeste do Cráton do São Francisco. *Anais Congresso Brasileiro de Geologia*, 36(5), p. 2276- 2283.
- Shelton, K. L.; Burstein, I. B.; Hagni, R. D.; Vierrether, C. B.; Grant, S. K.; Hennigh, Q. T.; Bradley, M. F.; Bandom, R. T. (1995). Sulfur isotope evidence for penetration of MVT fluids into igneous basement rocks, southeast Missouri, USA. *Mineralium Deposita*, 30, p. 339-350.
- Shepherd, T. J.; Rankin, A. H.; Alderton, D. H. M. (1985). *A practical guide to fluid inclusions studies*. Blakie, Glasgow-London, p. 237.
- Sorby, H. C. (1858). On the microscopic structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 14 (1), p. 453-500.

- Spier, C. A.; Oliveira, S. M. B.; Rosière, C. A. (2003). Geology and geochemistry of the Águas Claras and Pico Iron Mines, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Mineralium Deposita*, 38, p. 751-774.
- Spier, C. A.; Vasconcelos, P. M.; Oliveira, S. M. B. (2006).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronological constraints on the evolution of lateritic iron deposits in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Chemical Geology*, 234, p. 79-104.
- Spier, C. A.; Oliveira, S. M. B.; Sial, A. N.; Rios, F. J. (2007). Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 152, p. 170-206.
- Taylor S R, McLennan S M (1985). *The Continental Crustal: its composition and evolution*. Oxford: Blackwell.
- Teitler, Y.; Duuring, P.; Hagemann, S. G. (2014). Styles and controls of BIF-hosted iron ore in Archean terranes, comparison between the Pilbara and Yilgarn Cratons. *Australian Earth Sciences Convention (AESC)*. Newcastle.
- Thomassot, E.; O'Neil, J.; Francis, D.; Cartigny, P.; Wing, B. A. (2015). Atmospheric record in the Hadean Eon from multiple sulfur isotope measurements in Nuvvuagittuq Greenstone Belt (Nunavik, Quebec). *PNAS*, 112, p. 707-712.
- Thorne, W.; Hagemann, S. G.; Webb, A.; Clout, J. (2008). Banded iron formation related iron ore deposits of the Hamersley Province, Western Australia. *Banded Iron Formation-Related High-Grade Iron Ore. Australian Geological Convention*, 15, p. 197-221.
- Wallace, R. M. (1958). The Moeda Formation. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 2(7), p. 59-60.
- Wechsler, B. A.; Lindsley, D. H.; Prewitt, C. T. (1984). Crystal structure and cation distribution in titanomagnetites ( $\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ ). *American Mineralogist*, 69, p. 754-770.
- Whitehouse, M. (2013). Multiple sulfur isotope determination by SIMS: evaluation of reference sulfides for  $\Delta^{33}\text{S}$  with observations and a case study on the determination of  $\Delta^{36}\text{S}$ . *Geostandard and Geoanalytical Research*, 37, p. 19-33.
- Xue, Y.; Campbell, I.; Ireland, T. R.; Holden, P.; Armstrong, R. (2013). No mass-independent S isotope fractionation in auriferous fluids supports a magmatic origin for Archean gold deposits. *Geology*, 41, p. 791-794.
- Zirkel, F. (1870). Mikromineralogische Mittheilungen. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie*, p. 801-832.

**ANEXOS**

---



# ANEXO A

---

## **Breve histórico da jazida Minerita baseado no site <http://minerita.com.br> (acesso em 01 de dezembro de 2018)**

A jazida Minerita teve suas atividades iniciadas em janeiro de 1972 por Cordovil Fonseca. Possui área total de, aproximadamente, 5,5 hectares. Atualmente é dirigida por sua família que também faz o gerenciamento dos demais empreendimentos.

A mina conta com cerca de 200 funcionários treinados, equipamentos modernos para extração e beneficiamento de minérios de ferro, barragem de rejeitos, galpões para manutenção, laboratório de análises, prédio administrativo, refeitório e salas de treinamento. Possui todas as certificações necessárias para seu funcionamento dentro da legalidade e se preocupa com a segurança dos seus funcionários.

Além da jazida existem outras empresas e empreendimentos que fazem parte do grupo e que lhes proporcionam suporte logístico. Dentre elas a BIOMINAS, que faz o transporte de minérios para os clientes ou para o embarcadouro, e o terminal Souza Noschese (TSA), em parceria com a mineração MBL.

### **Produção**

Os principais produtos de Minerita são o minério granulado (granulação de 1 ¼” mm a ¼” mm) e o *sinter-feed* (granulação de ¼” mm a 0,15mm). Há uma linha para produção de *pellet-feed* (granulação de 0,15 mm a 0,00 mm), mas se encontra desativada.

Na maioria das vezes o minério de ferro explorado é friável e proveniente do itabirito duro silicoso, dolomítico e anfibolítico. É extraído e encaminhado para a linha de beneficiamento para diminuição de sua granulação e aumento do seu teor em ferro. Uma parte do que sai da linha vai para concentração, que é o local de produção do *sinter-feed*, onde passa por nova cominuição e concentração. A outra parte do produto é estocada como minério granulado.

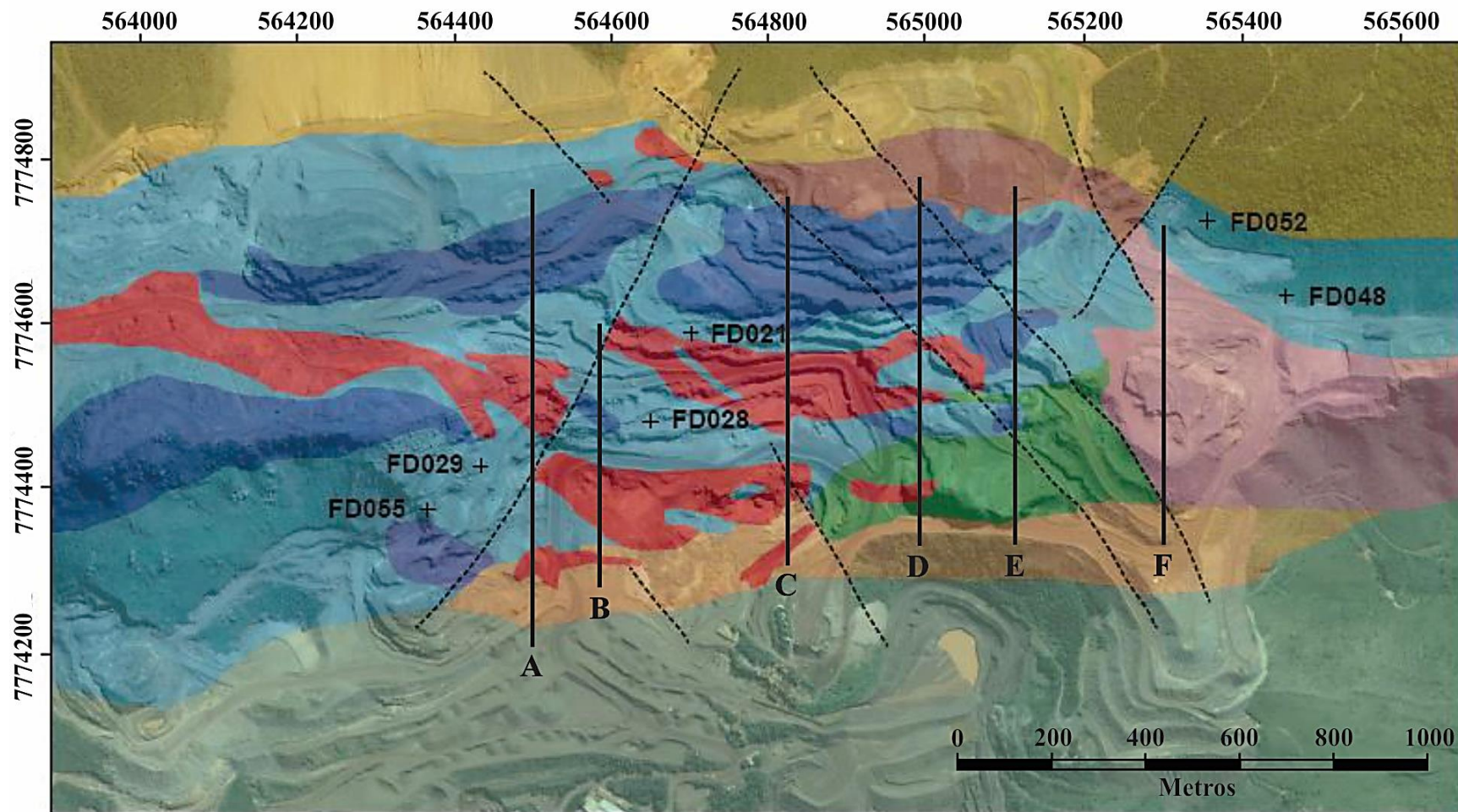
Todo o rejeito passa por ciclagem, sendo que o *over-flow* e o *under-flow* são encaminhados para barragens de rejeito. A mina é auto-suficiente em seu abastecimento de água, e reutiliza a água em seu processo de beneficiamento.

## ANEXO B

---

## Perfis geológicos

---



**Legenda**

---- Falhas de empurrão

— Cortes seções verticais

**Litologias**

Brécha tectônica

Itabirito dolomítico

Itabirito silicoso friável

Itabirito silicoso fragmentado

Itabirito silicoso compacto

Filito da Formação Batatal

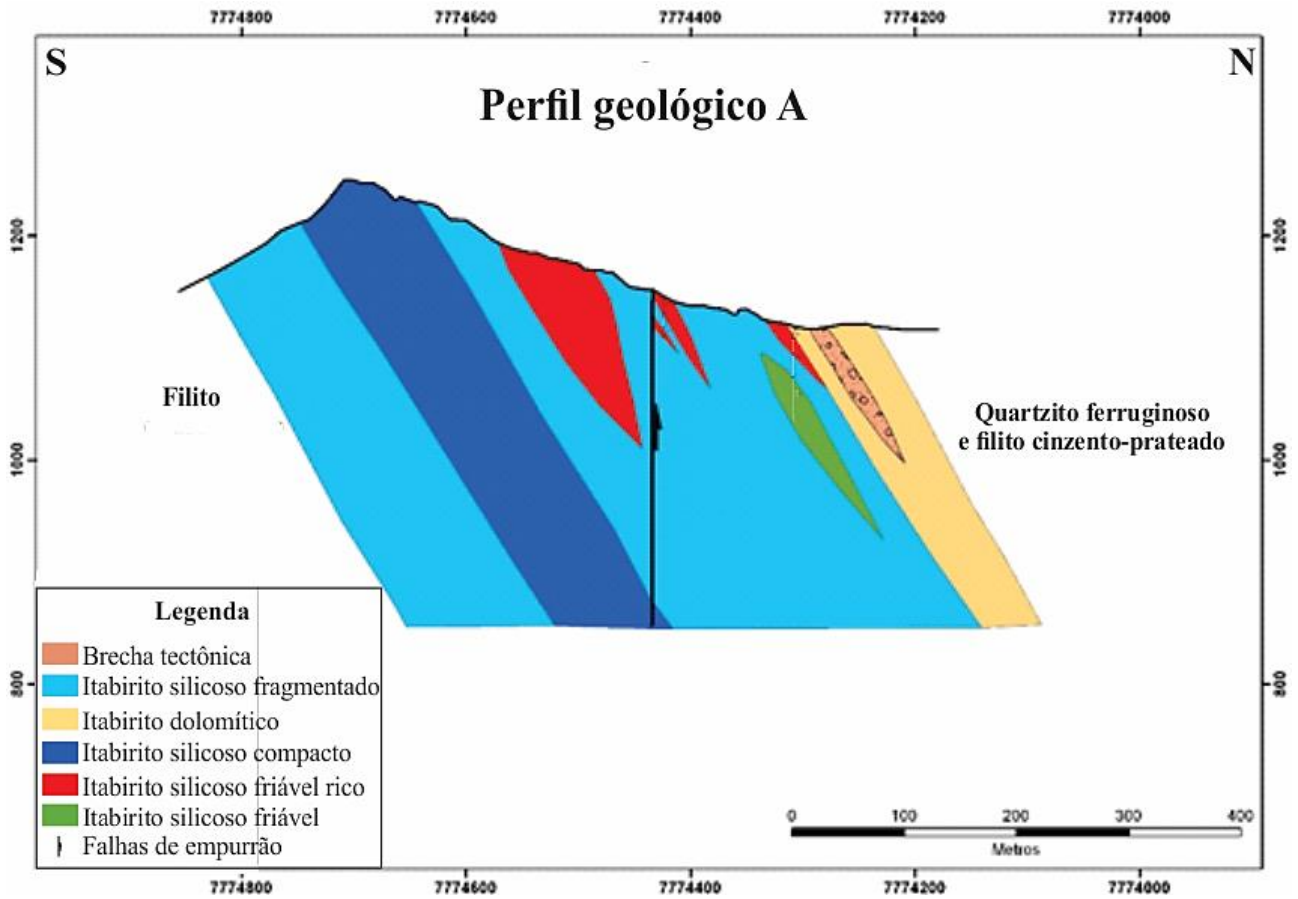
Itabirito anfibolítico

Itabirito silicoso friável rico

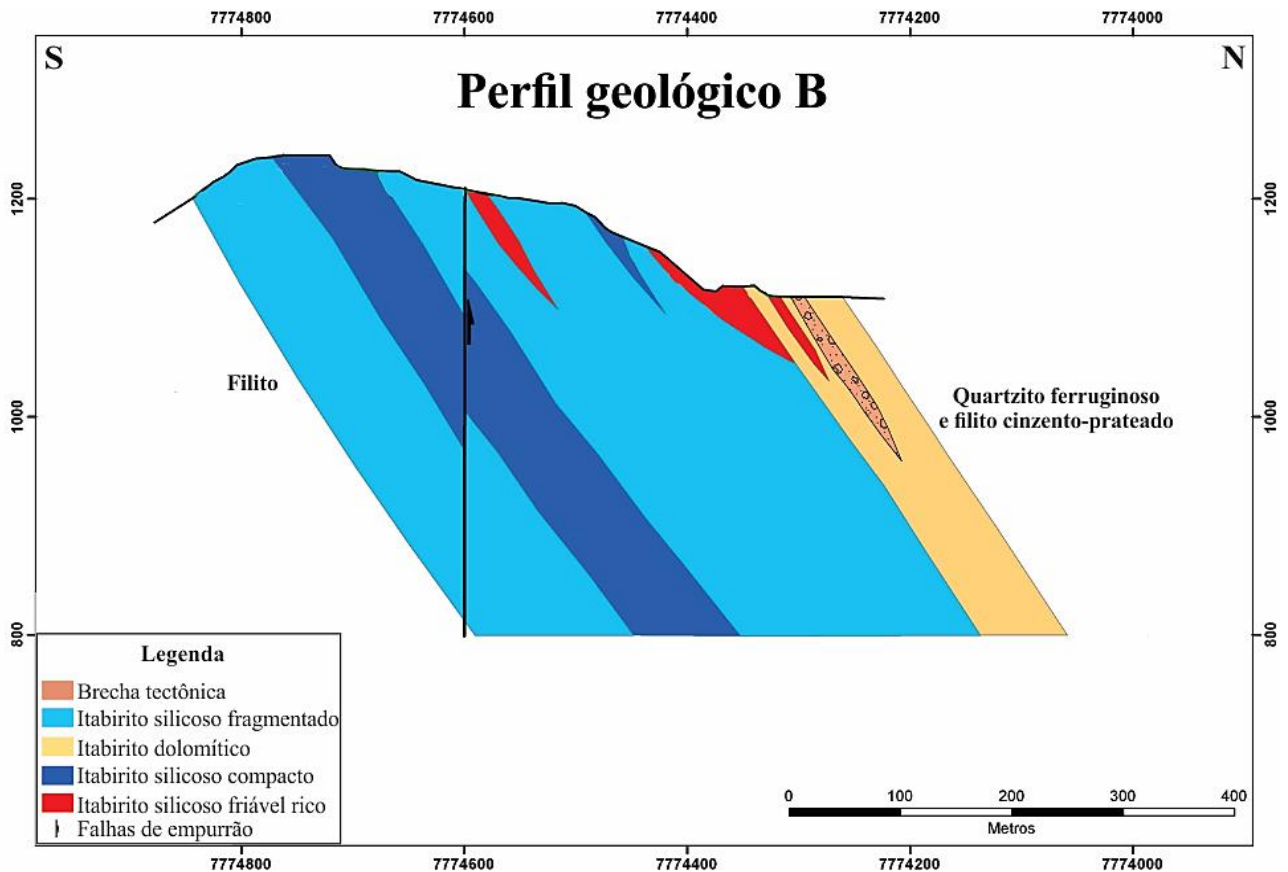
Quartzito ferrugionoso e filito cinzento-prateado da Formação Cercadinho

**Figura 1B:** Mapa geológico da jazida Minerita com a localização dos furos de sondagem e das seções verticais (modificado de Minerita, relatório interno inédito, 2007).

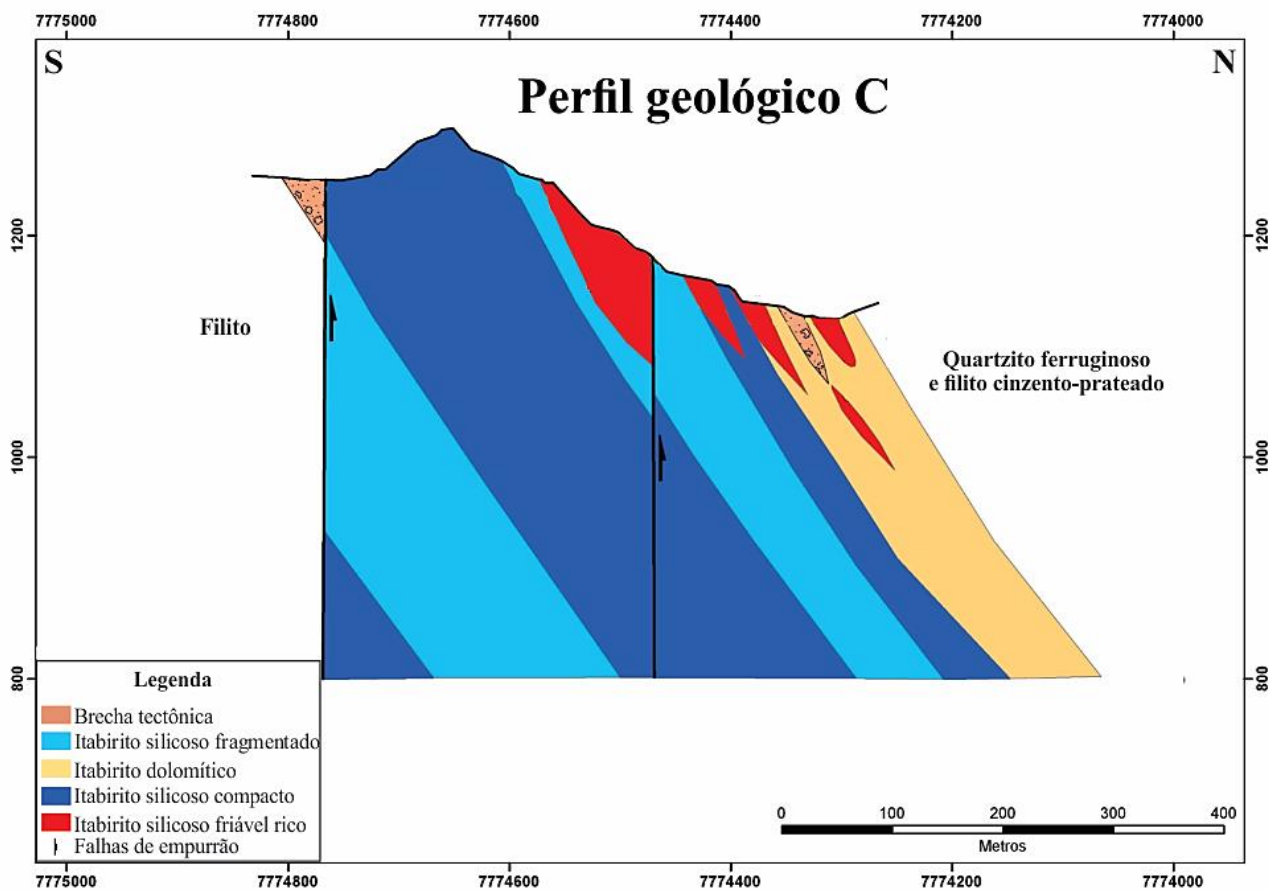




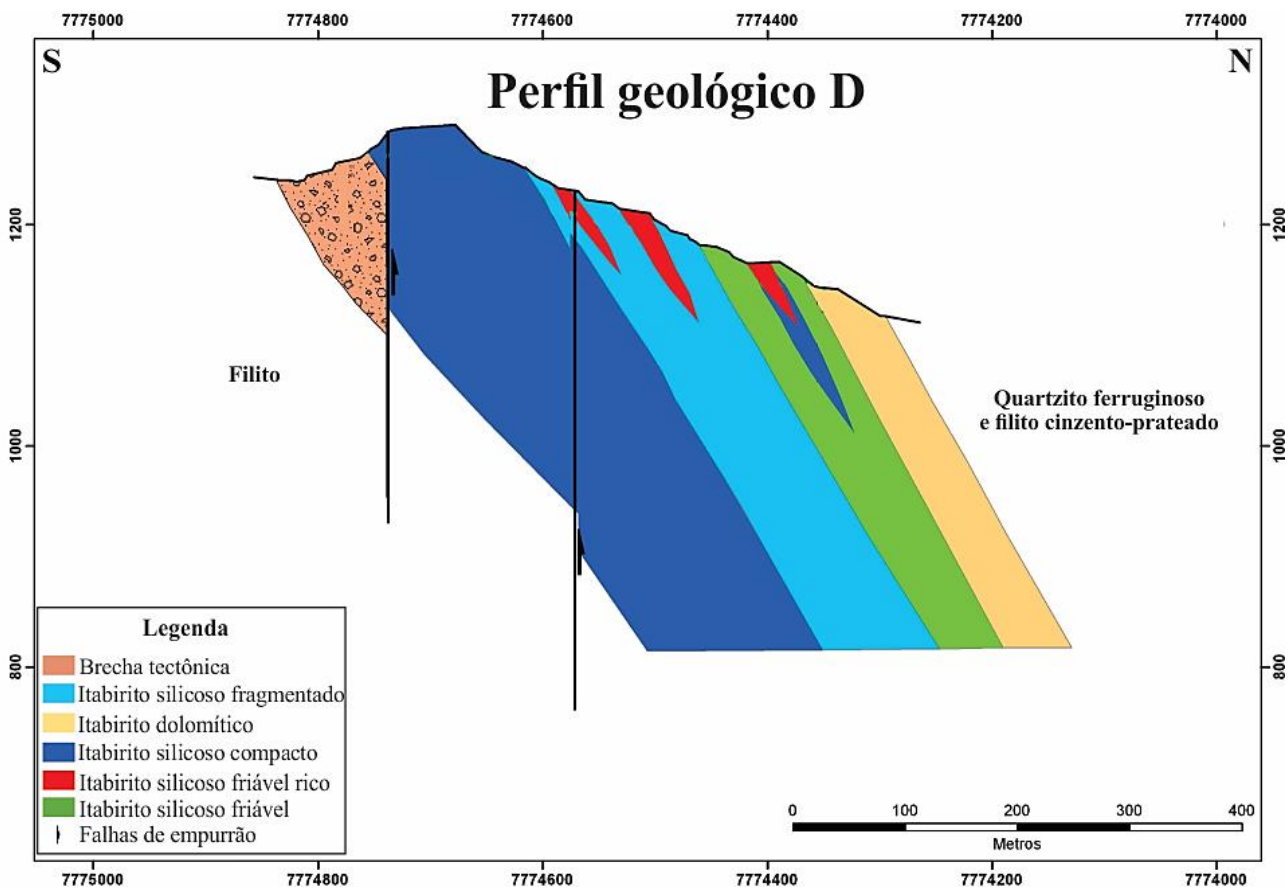
**Figura 2B:** Perfil geológico A da seção A com falha de empurrão vertical (modificado de Minerita, relatório interno inédito, 2007).



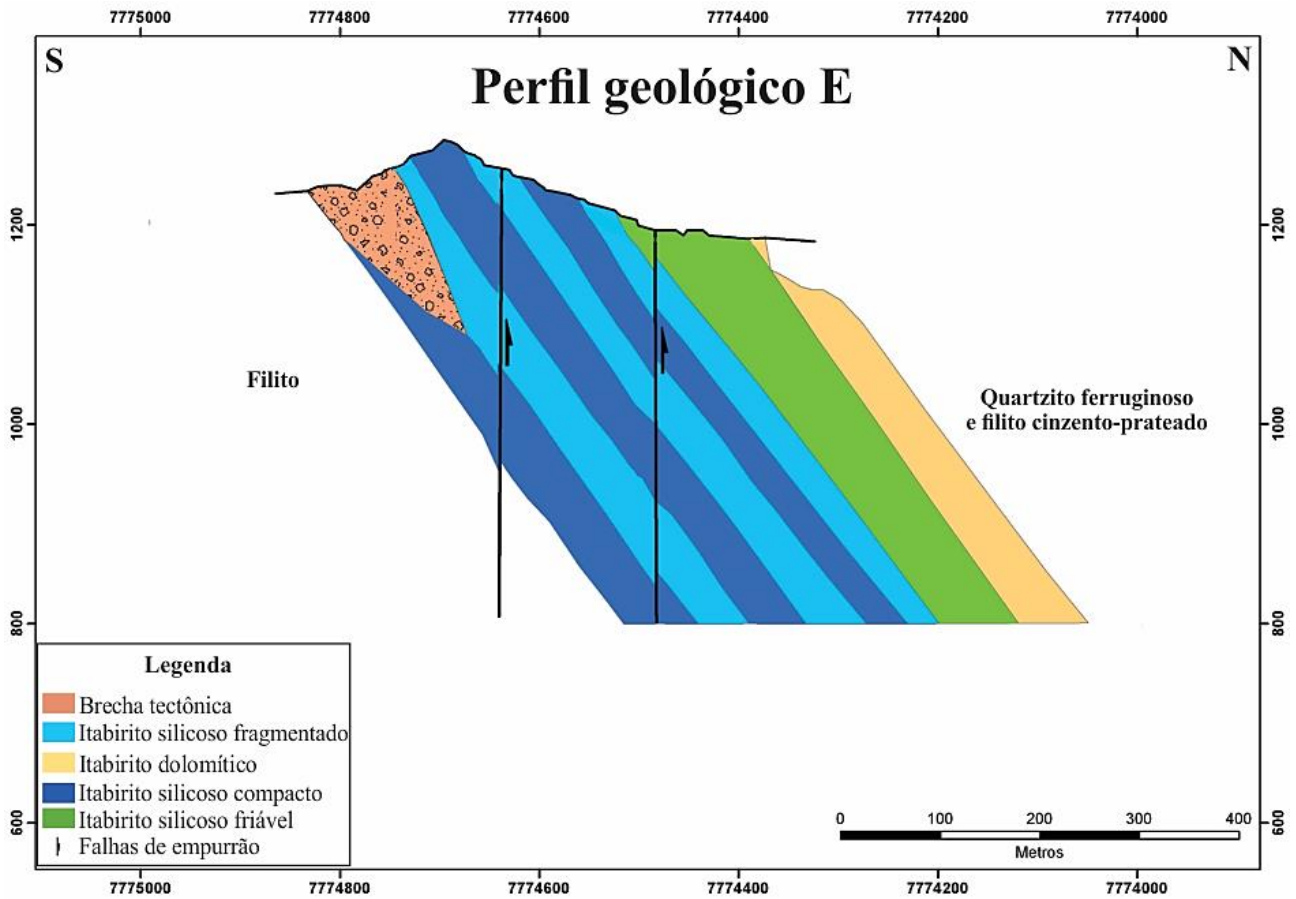
**Figura 3B:** Perfil geológico B da seção B com falha de empurrão vertical (modificado de Minerita, relatório interno inédito, 2007).



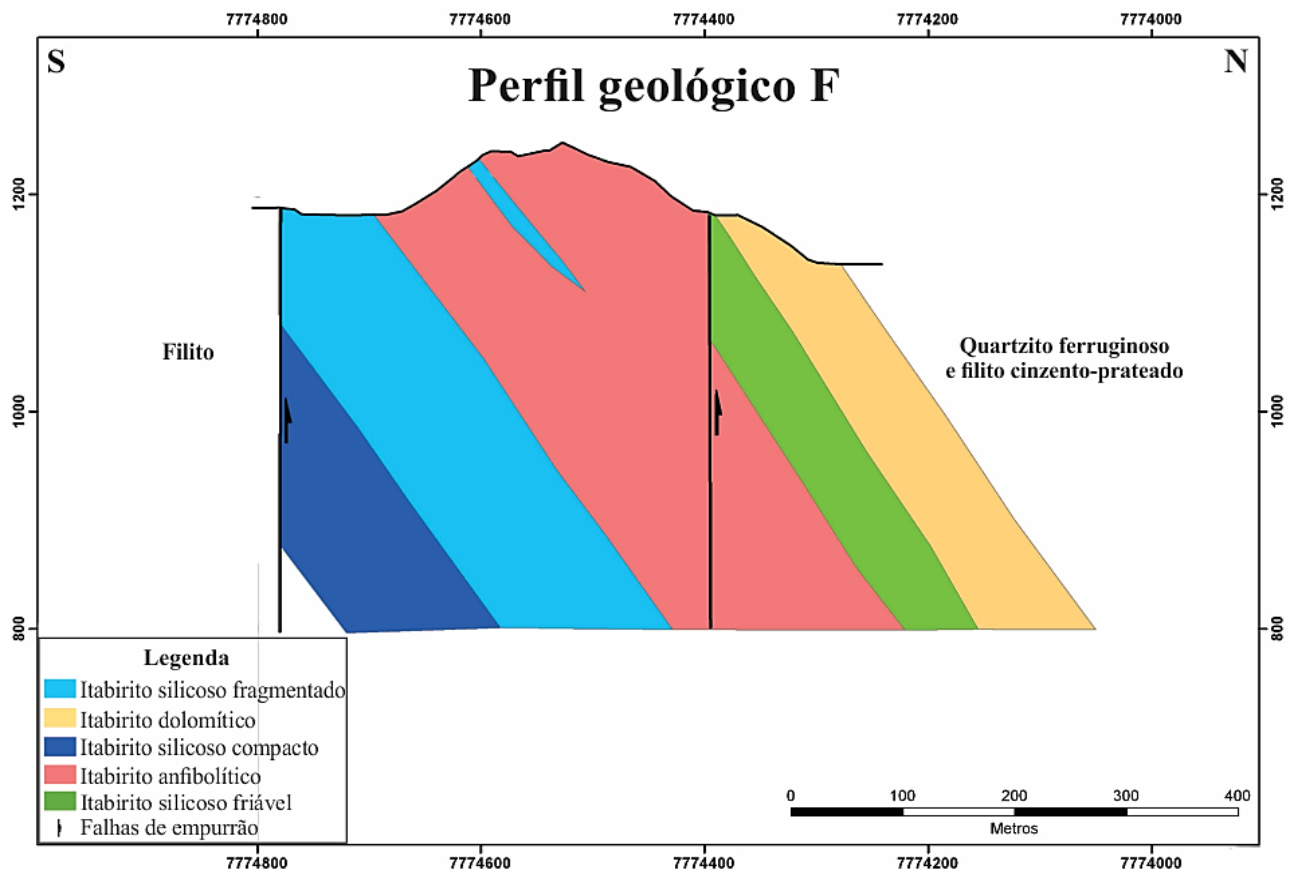
**Figura 4B:** Perfil geológico C da seção C com falhas de empurrão verticais (modificado de Minerita, relatório interno inédito, 2007).



**Figura 5B:** Perfil geológico D da seção D com falhas de empurrão verticais (modificado de Minerita, relatório interno inédito, 2007).



**Figura 6B:** Perfil geológico E da seção E com falhas de empurrão verticais (modificado de Minerita, relatório interno inédito, 2007).



**Figura 7B:** Perfil geológico F da seção F com falhas de empurrão verticais (modificado de Minerita, relatório interno inédito, 2007).

Descrição pontos visitados em mapeamento  
geológico

---

**Tabela 1B:** Descrição dos pontos visitados em mapeamento geológico da jazida Minerita (Minerita, relatório interno inédito, 2007).

Pontos	Coordenadas UTM		Litotipos	Atitude
	Leste	Norte		
1	564610	7774322	Itabirito silicoso friável com maior teor em ferro.	355/62
2	564724	7774314	Itabirito silicoso friável com maior teor em ferro.	95/84
3	564754	7774344	Itabirito silicoso friável, com maior teor em ferro.	280/60
4	564541	7774303	Itabirito silicoso friável com maior teor em ferro.	95/84
5	564467	7774287	Contato discordante do itabirito dolomítico friável com o itabirito silicoso friável de maior teor em ferro.	300/65
6	564515	7774357	Contato discordante entre o itabirito silicoso friável a compacto e o itabirito dolomítico friável.	280/50
7	564668	7774351	Itabirito silicoso friável com maior teor em ferro.	270/65
8	564707	7774353	Itabirito silicoso friável.	90/85
9	564776	7774308	Itabirito silicoso friável com maior teor em ferro e dobrado.	104/45
10	564442	7774325	Itabirito silicoso compacto dobrado.	
11	564918	7774392	Brecha com matriz argilosa sob o itabirito silicoso friável de maior teor em ferro.	
12	565034	7774378	Itabirito silicoso friável.	
13	565092	7774404	Itabirito silicoso friável a compacto.	
14	564539	7774554	Contato do itabirito silicoso friável de maior teor em ferro com itabirito silicoso friável a compacto.	
15	564986	7774534	Contato do itabirito silicoso compacto com o itabirito silicoso friável a compacto.	310/72
16	565105	7774568	Itabirito silicoso compacto.	
17	565208	7774531	Contato discordante do itabirito silicoso friável a compacto com o itabirito anfíbolítico friável.	
18	565137	7774560	Itabirito anfíbolítico friável a compacto muito dobrado.	265/75
19	565138	7774588	Itabirito silicoso friável a compacto.	90/70
20	565321	7774660	Contato discordante do itabirito anfíbolítico friável com o itabirito silicoso friável a compacto.	
21	565119	7774796	Brecha friável a compacto entre os itabiritos e o quartzito da Formação Cercadinho.	
22	564997	7774765	Lente de hematita presente dentro da brecha tectônica.	260/30
23	564499	7774633	Itabirito silicoso friável.	
24	564905	7774564	Lente de hematita (~4 m) presente dentro do itabirito silicoso friável com maior teor em ferro.	
25	564142	7774585	Itabirito silicoso friável com maior teor em ferro e brecha de colapso.	
26	564339	7774567	Itabirito silicoso friável com maior teor em ferro.	250/70
27	564081	7774608	Itabirito silicoso friável a compacto cortado por veio de quartzito.	
28	564137	7774689	Quartzito ferruginoso friável da Formação Cercadinho.	
29	564614	7774807	Contato do itabirito silicoso friável com itabirito silicoso compacto.	
30	564643	7774819	Itabirito silicoso friável com maior teor em ferro em contato discordante com quartzito ferruginoso.	
31	564681	7774784	Quartzito ferruginoso em contato discordante com os itabiritos.	
32	564837	7774623	Itabirito silicoso compacto com pequenas intercalações de friável.	255/60
33	564923	7774741	Brecha intemperizada e com pequena lente hematita.	
34	564554	7774246	Itabirito dolomítico friável em contato discordante com itabirito silicoso friável.	
35	564525	7774272	Itabirito dolomítico friável dobrado.	
36	564390	7774285	Itabirito dolomítico friável em contato discordante com itabirito silicoso friável com maior teor em ferro.	
37	565480	7774527	Itabirito anfíbolítico friável.	
38	564855	7774637	Exemplar superficial do minério de ferro de alto teor maciço.	



## ANEXO C

---

## Dados de microsonda eletrônica

---

**Tabela 1C:** Resultados de microsonda eletrônica, em % peso, para diferentes gerações de óxidos de ferro dos litotipos analisados na jazida Minerita.

Litotipos	Minerais	Pontos	FeO <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Total
Itabirito silicoso (IS)	Martita	A2i	87,958	0,264	0,050	0,012	0,112	0,000	0,000	88,396
		A2ii	88,023	0,214	0,015	0,036	0,093	0,000	0,063	88,444
		A2iii	87,781	0,293	0,008	0,012	0,000	0,020	0,000	88,114
	Martita	A1i	87,698	0,772	0,046	0,013	0,000	0,000	0,092	88,621
		A1ii	86,502	0,768	0,000	0,000	0,044	0,011	0,055	87,380
		A1iii	88,382	0,140	0,059	0,055	0,000	0,000	0,000	88,636
	Martita	C2i	88,868	0,479	0,045	0,009	0,060	0,000	0,033	89,494
		C2ii	87,447	0,462	0,000	0,027	0,010	0,010	0,098	88,054
	Martita	F1i	88,343	0,129	0,015	0,035	0,007	0,024	0,000	88,553
		F1ii	87,414	0,133	0,000	0,094	0,049	0,000	0,072	87,762
		F1iii	87,421	0,170	0,119	0,040	0,195	0,015	0,004	87,964
	Martita	F2i	88,241	0,626	0,025	0,038	0,024	0,000	0,078	89,032
	Martita	E11i	88,853	0,386	0,033	0,020	0,033	0,024	0,000	89,349
		E11ii	88,270	0,275	0,000	0,037	0,000	0,000	0,028	88,610
		E11iii	87,467	0,220	0,052	0,000	0,137	0,000	0,078	87,954
	Martita	E12i	88,374	0,579	0,024	0,041	0,013	0,000	0,050	89,081
		E12ii	88,437	0,263	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	88,703
		E12iii	88,185	0,734	0,029	0,319	0,000	0,000	0,000	89,267
	Hematita anédrica	C1i	88,868	0,479	0,045	0,009	0,060	0,000	0,033	89,494
		C1ii	87,447	0,462	0,000	0,027	0,010	0,010	0,098	88,054
	Hematita anédrica	B11i	87,750	0,200	0,074	0,012	0,000	0,031	0,102	88,169
		B11ii	89,412	0,278	0,058	0,000	0,000	0,057	0,074	89,879
		B11iii	87,831	0,367	0,091	0,011	0,000	0,031	0,024	88,355
	Hematita anédrica	B21i	87,750	0,200	0,074	0,012	0,000	0,031	0,102	88,169
		B21ii	89,412	0,278	0,058	0,000	0,000	0,057	0,074	89,879
		B21iii	87,831	0,367	0,091	0,011	0,000	0,031	0,024	88,355
	Hematita anédrica	B22iii	87,793	0,435	0,033	0,035	0,000	0,000	0,000	88,296
	Hematita anédrica	E21i	88,853	0,386	0,033	0,020	0,033	0,024	0,000	89,349
		E21ii	88,270	0,275	0,000	0,037	0,000	0,000	0,028	88,610
		E21iii	87,467	0,220	0,052	0,000	0,137	0,000	0,078	87,954
Hematita anédrica	E22i	88,374	0,579	0,024	0,041	0,013	0,000	0,050	89,081	
	E22ii	88,437	0,263	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	88,703	
	E22iii	88,185	0,734	0,029	0,319	0,000	0,000	0,000	89,267	
Itabirito silicoso quartzo venulado (ISQV)	Kenomagnetita	E2i	87,665	0,355	0,154	0,009	0,191	0,036	0,036	88,446
		E2ii	88,709	0,309	0,027	0,000	0,000	0,000	0,185	89,230
		E2iii	88,184	0,981	0,261	0,327	0,000	0,000	0,044	89,797
	Kenomagnetita	E4i	87,665	0,355	0,154	0,009	0,191	0,036	0,036	88,446
		E4ii	88,709	0,309	0,027	0,000	0,000	0,000	0,185	89,230
		E4iii	88,184	0,981	0,261	0,327	0,000	0,000	0,044	89,797

**Tabela 2C:** Resultados de microsonda eletrônica, em % peso, para diferentes gerações de óxidos de ferro dos litotipos analisados na jazida Minerita (cont.).

Litotipos	Minerais	Pontos	FeO <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Total
Itabirito silicoso quartzo venulado (ISQV)	Kenomagnetita	C11i	87,953	0,251	0,000	0,000	0,075	0,045	0,030	88,354
		C11ii	90,709	0,154	0,000	0,000	0,061	0,000	0,000	90,924
		C11iii	91,005	0,180	0,030	0,000	0,000	0,011	0,011	91,237
	Kenomagnetita	C22i	87,953	0,251	0,000	0,000	0,075	0,045	0,030	88,354
		C22ii	90,709	0,154	0,000	0,000	0,061	0,000	0,000	90,924
		C22iii	91,005	0,180	0,030	0,000	0,000	0,011	0,011	91,237
	Martita	G2ii	87,650	0,802	0,000	0,110	0,052	0,031	0,146	88,791
		G2iii	87,061	0,544	0,040	0,070	0,040	0,000	0,005	87,760
	Martita	F2i	87,716	0,143	0,000	0,027	0,000	0,000	0,010	87,896
		F2ii	87,043	0,342	0,010	0,000	0,000	0,018	0,026	87,439
		F2iii	88,256	0,175	0,074	0,025	0,000	0,025	0,040	88,595
	Martita	C13i	87,204	0,217	0,092	0,036	0,047	0,000	0,000	87,596
		C13ii	86,756	0,387	0,238	0,028	0,000	0,000	0,165	87,574
		C13iii	87,878	0,492	0,383	0,057	0,002	0,043	0,001	88,856
	Martita	C21i	87,204	0,217	0,092	0,036	0,047	0,000	0,000	87,596
		C21ii	86,756	0,387	0,238	0,028	0,000	0,000	0,165	87,574
		C21iii	87,878	0,492	0,383	0,057	0,002	0,043	0,001	88,856
	Martita	C23i	87,204	0,217	0,092	0,036	0,047	0,000	0,000	87,596
		C23ii	86,756	0,387	0,238	0,028	0,000	0,000	0,165	87,574
		C23iii	87,878	0,492	0,383	0,057	0,002	0,043	0,001	88,856
	Martita	B12ii	89,593	0,430	0,021	0,025	0,000	0,000	0,053	90,122
	Martita	B21iii	86,294	1,270	0,000	0,000	0,017	0,000	0,000	87,581
	Martita	B22ii	89,593	0,430	0,021	0,025	0,000	0,000	0,053	90,122
	Martita	B23ii	89,593	0,430	0,021	0,025	0,000	0,000	0,053	90,122
	Martita	A12ii	89,593	0,430	0,021	0,025	0,000	0,000	0,053	90,122
	Martita	A22ii	89,593	0,430	0,021	0,025	0,000	0,000	0,053	90,122
	Martita	A23ii	89,593	0,430	0,021	0,025	0,000	0,000	0,053	90,122
	Martita	D1i	87,920	0,533	0,010	0,058	0,134	0,021	0,009	88,685
		D1ii	88,392	0,698	0,024	0,130	0,000	0,009	0,056	89,309
		D1iii	86,902	0,519	0,136	0,038	0,040	0,005	0,000	87,640
Hematita anédrica	E3i	87,665	0,355	0,154	0,009	0,191	0,036	0,036	88,446	
	E3ii	88,709	0,309	0,027	0,000	0,000	0,000	0,185	89,230	
	E3iii	88,184	0,981	0,261	0,327	0,000	0,000	0,044	89,797	
Martita	C1i	86,898	0,542	0,008	0,019	0,000	0,012	0,032	87,511	
	C1ii	88,082	0,399	0,033	0,000	0,000	0,028	0,000	88,542	
	C1iii	87,498	0,660	0,053	0,040	0,013	0,008	0,000	88,272	
Martita	A1i	87,882	0,740	0,031	0,076	0,006	0,000	0,079	88,814	
	A1ii	87,585	0,520	0,023	0,020	0,000	0,030	0,000	88,178	
	A1iii	87,644	0,945	0,029	0,053	0,012	0,003	0,034	88,720	
Martita	B21ii	87,796	0,158	0,078	0,000	0,033	0,000	0,093	88,158	

Brecha itabirítica (BI)

**Tabela 3C:** Resultados de microsonda eletrônica, em % peso, para diferentes gerações de óxidos de ferro dos litotipos analisados na jazida Minerita (cont.).

Litotipos	Minerais	Pontos	FeO <sub>r</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Total
Brecha itabirítica (BI)	Hematita anédrica	E12i	88,477	0,308	0,198	0,009	0,000	0,001	0,000	88,993
		E12ii	88,400	0,317	0,212	0,000	0,076	0,022	0,000	89,027
		E12iii	86,582	0,306	0,137	0,000	0,000	0,007	0,000	87,032
	Hematita anédrica	E11i	87,836	0,261	0,109	0,022	0,033	0,000	0,000	88,261
		E11ii	88,687	0,312	0,237	0,056	0,049	0,000	0,070	89,411
		E11iii	87,924	0,340	0,079	0,022	0,000	0,021	0,000	88,386
	Hematita anédrica	E21i	86,756	0,697	0,320	0,040	0,021	0,000	0,073	87,907
		E21ii	87,713	0,633	0,188	0,043	0,073	0,000	0,000	88,650
		E21iii	88,361	0,091	0,049	0,020	0,000	0,043	0,006	88,570
	Hematita anédrica	E22i	88,477	0,308	0,198	0,009	0,000	0,001	0,000	88,993
		E22ii	88,400	0,317	0,212	0,000	0,076	0,022	0,000	89,027
		E22iii	86,582	0,306	0,137	0,000	0,000	0,007	0,000	87,032
	Hematita anédrica	B11ii	87,796	0,158	0,078	0,000	0,033	0,000	0,093	88,158
	Hematita anédrica	B13ii	86,640	1,292	0,030	0,198	0,000	0,000	0,005	88,165
	Hematita anédrica	B12ii	86,640	1,292	0,030	0,198	0,000	0,000	0,005	88,165
Hematita anédrica	B22ii	86,640	1,292	0,030	0,198	0,000	0,000	0,005	88,165	
Minério de ferro de alto teor maciço (MM)	Kenomagnetita	A21i	88,127	0,071	0,040	0,000	0,000	0,001	0,085	88,324
		A21ii	87,109	0,557	0,018	0,161	0,000	0,000	0,040	87,885
		A21iii	88,130	0,078	0,030	0,013	0,000	0,019	0,000	88,270
	Kenomagnetita	A23i	88,229	0,113	0,004	0,000	0,000	0,034	0,000	88,380
		A23ii	87,245	0,873	0,082	0,278	0,000	0,001	0,000	88,479
		A23iii	87,279	0,341	0,000	0,076	0,000	0,006	0,000	87,702
	Kenomagnetita	A31i	88,127	0,071	0,040	0,000	0,000	0,001	0,085	88,324
		A31ii	87,109	0,557	0,018	0,161	0,000	0,000	0,040	87,885
		A31iii	88,130	0,078	0,030	0,013	0,000	0,019	0,000	88,270
	Kenomagnetita	D1i	88,419	0,059	0,001	0,000	0,000	0,002	0,001	88,482
		D1ii	87,862	0,064	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	87,930
		D1iii	88,306	0,086	0,045	0,009	0,027	0,000	0,013	88,486
	Martita	A32i	88,229	0,113	0,004	0,000	0,000	0,034	0,000	88,380
		A32ii	87,245	0,873	0,082	0,278	0,000	0,001	0,000	88,479
		A32iii	87,279	0,341	0,000	0,076	0,000	0,006	0,000	87,702
Martita	C11i	88,037	0,104	0,007	0,003	0,079	0,000	0,027	88,257	
	C11ii	88,267	0,074	0,027	0,031	0,038	0,000	0,068	88,505	
	C11iii	88,927	0,091	0,074	0,000	0,000	0,032	0,000	89,124	
Martita	D2i	88,890	0,097	0,033	0,000	0,000	0,005	0,000	89,025	
	D2ii	87,641	0,031	0,112	0,016	0,026	0,000	0,025	87,851	
	D2iii	88,850	0,096	0,120	0,027	0,013	0,000	0,037	89,143	
Martita	B11i	87,377	0,228	0,099	0,015	0,002	0,000	0,000	87,721	
	B11iii	87,576	0,087	0,052	0,004	0,033	0,000	0,000	87,752	
Martita	B11i	87,377	0,228	0,099	0,015	0,002	0,000	0,000	87,721	
	B11iii	87,576	0,087	0,052	0,004	0,033	0,000	0,000	87,752	



**Tabela 4C:** Resultados de microsonda eletrônica, em % peso, para diferentes gerações de óxidos de ferro dos litotipos analisados na jazida Minerita (cont.).

<b>Litotipos</b>	<b>Minerais</b>	<b>Pontos</b>	<b>FeO<sub>T</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>MnO</b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Total</b>
Minério de ferro de alto teor maciço (MM)	Martita	B11i	87,377	0,228	0,099	0,015	0,002	0,000	0,000	87,721
		B11iii	87,576	0,087	0,052	0,004	0,033	0,000	0,000	87,752
	Martita	B12i	86,413	0,507	0,146	0,000	0,140	0,036	0,080	87,322
		B12iii	86,300	0,937	0,047	0,194	0,029	0,011	0,092	87,610
	Hematita anédrica	A11i	88,229	0,113	0,004	0,000	0,000	0,034	0,000	88,380
		A11ii	87,245	0,873	0,082	0,278	0,000	0,001	0,000	88,479
		A11iii	87,279	0,341	0,000	0,076	0,000	0,006	0,000	87,702
	Hematita anédrica	A13i	88,933	0,054	0,000	0,009	0,000	0,000	0,191	89,187
		A13ii	87,264	0,021	0,044	0,010	0,000	0,019	0,070	87,428
		A13iii	86,773	0,089	0,018	0,000	0,000	0,000	0,108	86,988
	Hematita anédrica	A22i	88,229	0,113	0,004	0,000	0,000	0,034	0,000	88,380
		A22ii	87,245	0,873	0,082	0,278	0,000	0,001	0,000	88,479
		A22iii	87,279	0,341	0,000	0,076	0,000	0,006	0,000	87,702
	Hematita anédrica	A33i	88,229	0,113	0,004	0,000	0,000	0,034	0,000	88,380
		A33ii	87,245	0,873	0,082	0,278	0,000	0,001	0,000	88,479
	Hematita anédrica	C13i	88,037	0,104	0,007	0,003	0,079	0,000	0,027	88,257
		C13ii	88,267	0,074	0,027	0,031	0,038	0,000	0,068	88,505
		C13iii	88,927	0,091	0,074	0,000	0,000	0,032	0,000	89,124
	Hematita anédrica	C23ii	88,387	0,227	0,037	0,000	0,001	0,000	0,082	88,734
		C23iii	89,626	0,074	0,032	0,000	0,000	0,000	0,000	89,732
	Hematita anédrica	D2i	88,890	0,097	0,033	0,000	0,000	0,005	0,000	89,025
		D2ii	87,641	0,031	0,112	0,016	0,026	0,000	0,025	87,851
		D2iii	88,850	0,096	0,120	0,027	0,013	0,000	0,037	89,143
	Hematita anédrica	E11i	88,184	0,030	0,000	0,000	0,000	0,020	0,001	88,235
		E11ii	88,041	0,110	0,011	0,000	0,055	0,001	0,072	88,290
		E11iii	88,245	0,359	0,003	0,041	0,000	0,003	0,000	88,651
	Hematita anédrica	E13i	88,046	0,080	0,059	0,000	0,033	0,000	0,063	88,281
		E13ii	87,602	0,311	0,021	0,034	0,007	0,000	0,044	88,019
		E13iii	88,851	0,025	0,051	0,000	0,000	0,007	0,040	88,974
	Hematita anédrica	E22i	89,597	0,157	0,003	0,000	0,054	0,007	0,040	89,858
E22ii		88,492	0,134	0,025	0,000	0,000	0,022	0,043	88,716	
E22iii		86,364	0,472	0,055	0,013	0,077	0,000	0,028	87,009	
Hematita anédrica	E21i	88,046	0,080	0,059	0,000	0,033	0,000	0,063	88,281	
	E21ii	87,602	0,311	0,021	0,034	0,007	0,000	0,044	88,019	
	E21iii	88,851	0,025	0,051	0,000	0,000	0,007	0,040	88,974	
Hematita anédrica	B21i	87,735	0,023	0,034	0,000	0,000	0,000	0,029	87,821	
	B21ii	88,794	0,240	0,015	0,000	0,000	0,017	0,070	89,136	
	B21iii	89,992	0,456	0,084	0,066	0,012	0,000	0,050	90,660	
Hematita anédrica	B22i	87,072	0,187	0,000	0,055	0,048	0,020	0,000	87,382	
	B22ii	86,652	0,511	0,036	0,052	0,033	0,000	0,000	87,284	
	B22iii	88,000	0,205	0,115	0,000	0,134	0,000	0,030	88,484	

**Tabela 5C:** Resultados de microsonda eletrônica, em % peso, para diferentes gerações de óxidos de ferro dos litotipos analisados na jazida Minerita (cont.).

Litotipos	Minerais	Pontos	FeO <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Total
Brecha com sulfetos (BS)	Magnetita hidrotermal	G3i	91,780	0,046	0,029	0,009	0,039	0,000	0,024	91,927
		G3ii	91,343	0,034	0,005	0,000	0,075	0,007	0,000	91,464
		G3iii	92,659	0,098	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	92,761
	Magnetita hidrotermal	D11ii	90,484	0,610	0,025	0,182	0,017	0,000	0,053	91,371
	Magnetita hidrotermal	C2i	91,926	0,000	0,008	0,003	0,000	0,000	0,050	91,987
		C2ii	91,219	0,084	0,013	0,013	0,000	0,000	0,000	91,329
		C2iii	90,589	0,249	0,000	0,071	0,084	0,015	0,060	91,068
	Magnetita hidrotermal	D13i	92,085	0,647	0,020	0,258	0,027	0,005	0,000	93,042
		D13ii	91,840	0,906	0,013	0,413	0,025	0,000	0,000	93,197
		D13iii	90,828	0,947	0,000	0,347	0,052	0,016	0,000	92,190
	Magnetita hidrotermal	D22i	88,796	0,380	0,087	0,098	0,000	0,000	0,155	89,516
		D22ii	87,247	0,093	0,000	0,000	0,040	0,001	0,894	88,275
		D22iii	86,672	0,044	0,000	0,004	0,055	0,019	0,836	87,630
	Magnetita hidrotermal	B21i	91,004	0,448	0,029	0,099	0,035	0,000	0,000	91,615
		B21ii	90,394	0,247	0,000	0,129	0,153	0,000	0,099	91,022
	Magnetita hidrotermal	B22ii	90,133	0,332	0,012	0,102	0,014	0,000	0,012	90,605
	Magnetita hidrotermal	A21i	90,073	0,873	0,013	0,199	0,004	0,006	0,000	91,168
		A21ii	90,412	0,250	0,068	0,122	0,000	0,000	0,009	90,861
		A21iii	91,190	0,192	0,023	0,032	0,000	0,000	0,078	91,515
	Magnetita hidrotermal	A22ii	90,365	0,230	0,011	0,069	0,049	0,019	0,000	90,743
		A22iii	89,926	0,266	0,017	0,097	0,014	0,009	0,061	90,390
	Magnetita hidrotermal	A23i	87,609	0,094	0,031	0,014	0,010	0,000	0,050	87,808
		A23iii	87,198	0,091	0,019	0,000	0,076	0,000	0,390	87,774
	Magnetita hidrotermal	C1i	91,416	0,003	0,009	0,000	0,000	0,036	0,030	91,494
		C1ii	90,549	0,181	0,010	0,088	0,031	0,000	0,016	90,875
		C1iii	90,592	0,060	0,007	0,000	0,099	0,031	0,012	90,801
	Magnetita hidrotermal	C3i	90,724	0,787	0,000	0,381	0,028	0,007	0,000	91,927
		C3ii	90,969	0,286	0,024	0,137	0,038	0,035	0,119	91,608
		C3iii	90,054	0,405	0,064	0,187	0,043	0,000	0,049	90,802
	Magnetita hidrotermal	C2i	90,724	0,787	0,000	0,381	0,028	0,007	0,000	91,927
C2ii		90,969	0,286	0,024	0,137	0,038	0,035	0,119	91,608	
C2iii		90,054	0,405	0,064	0,187	0,043	0,000	0,049	90,802	
Magnetita hidrotermal	D2ii	91,065	0,346	0,041	0,193	0,007	0,000	0,000	91,652	
Magnetita hidrotermal	F2ii	90,144	0,525	0,020	0,270	0,006	0,004	0,000	90,969	
	F2iii	90,389	1,110	0,014	0,279	0,000	0,018	0,059	91,869	
Magnetita hidrotermal	F1i	90,964	0,179	0,000	0,076	0,000	0,000	0,014	91,233	
	F1ii	90,125	0,580	0,033	0,255	0,018	0,000	0,075	91,086	
	F1iii	90,108	0,114	0,000	0,010	0,032	0,015	0,093	90,372	
Magnetita hidrotermal	E4i	91,383	0,042	0,000	0,021	0,021	0,021	0,003	91,491	
	E4ii	91,151	0,116	0,004	0,090	0,000	0,000	0,026	91,387	
	E4iii	89,949	0,111	0,000	0,026	0,000	0,000	0,000	90,086	

**Tabela 6C:** Resultados de microsonda eletrônica, em % peso, para diferentes gerações de óxidos de ferro dos litotipos analisados na jazida Minerita (cont.).

Litotipos	Minerais	Pontos	FeO <sub>T</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Total
Brecha com sulfetos (BS)	Magnetita hidrotermal	E1i	92,852	0,065	0,000	0,017	0,003	0,008	0,090	93,035
		E1ii	91,630	0,321	0,054	0,182	0,000	0,000	0,028	92,215
	Magnetita hidrotermal	E3i	91,383	0,042	0,000	0,021	0,021	0,021	0,003	91,491
		E3ii	91,151	0,116	0,004	0,090	0,000	0,000	0,026	91,387
		E3iii	89,949	0,111	0,000	0,026	0,000	0,000	0,000	90,086
	Magnetita hidrotermal	B12i	89,063	0,647	0,018	0,341	0,024	0,000	0,054	90,147
		B12ii	89,995	0,248	0,010	0,090	0,063	0,033	0,010	90,449
		B12iii	91,554	0,325	0,034	0,038	0,028	0,000	0,030	92,009
	Magnetita hidrotermal	B11i	89,063	0,647	0,018	0,341	0,024	0,000	0,054	90,147
		B11ii	89,995	0,248	0,010	0,090	0,063	0,033	0,010	90,449
		B11iii	91,554	0,325	0,034	0,038	0,028	0,000	0,030	92,009
	Magnetita hidrotermal	A11i	91,268	0,110	0,020	0,025	0,012	0,008	0,000	91,443
		A11iii	91,589	0,056	0,037	0,016	0,070	0,043	0,006	91,817
	Magnetita hidrotermal	A12i	91,117	0,205	0,000	0,058	0,013	0,000	0,000	91,393
		A12iii	90,977	0,651	0,021	0,105	0,000	0,000	0,000	91,754
	Magnetita hidrotermal	B22i	90,704	0,359	0,004	0,134	0,064	0,000	0,102	91,367
		B22ii	92,498	0,021	0,004	0,019	0,024	0,010	0,009	92,585
	Magnetita hidrotermal	A11i	90,704	0,359	0,004	0,134	0,064	0,000	0,102	91,367
		A11ii	92,498	0,021	0,004	0,019	0,024	0,010	0,009	92,585
	Magnetita hidrotermal	A12i	91,307	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,081	91,388
		A12ii	92,294	0,088	0,015	0,081	0,003	0,000	0,000	92,481
		A12iii	91,077	0,578	0,025	0,212	0,044	0,025	0,000	91,961
	Magnetita hidrotermal	F1i	91,358	0,169	0,000	0,110	0,000	0,000	0,000	91,637
		F1ii	91,497	0,036	0,000	0,009	0,064	0,012	0,000	91,618
F1iii		90,755	0,364	0,027	0,177	0,000	0,004	0,000	91,327	
Magnetita hidrotermal	H1i	91,099	0,000	0,023	0,000	0,048	0,003	0,051	91,224	
	H1ii	91,442	0,083	0,000	0,000	0,038	0,011	0,000	91,574	
	H1iii	91,509	0,037	0,011	0,000	0,068	0,000	0,090	91,715	
Magnetita hidrotermal	D1i	90,706	0,067	0,000	0,002	0,053	0,010	0,000	90,838	
	D1ii	91,321	0,118	0,060	0,020	0,000	0,013	0,061	91,593	
	D1iii	91,145	0,271	0,007	0,099	0,000	0,027	0,000	91,549	
Magnetita hidrotermal	D3i	90,761	0,236	0,028	0,105	0,003	0,035	0,000	91,168	
	D3ii	90,549	0,039	0,014	0,016	0,001	0,011	0,010	90,640	
	D3iii	91,061	0,340	0,055	0,228	0,037	0,016	0,000	91,737	
Hematita anédrica	E12i	86,476	0,716	0,347	0,000	0,027	0,000	0,003	87,569	
	E12iii	88,058	0,057	0,013	0,000	0,031	0,000	0,001	88,160	
Hematita anédrica	E22i	86,476	0,716	0,347	0,000	0,027	0,000	0,003	87,569	
	E22iii	88,058	0,057	0,013	0,000	0,031	0,000	0,001	88,160	

## ANEXO D

---

## Descrição furos de sondagem analisados

---



**Tabela 1D:** Descrição geológica do furo de sondagem FD021.

Coordenadas UTM				Profundidade total	Descrição detalhada
Leste	Norte	Cota	Mergulho		
De	Até	Metragem	Classificação	Amostra	
564716	7774569	1149m	60°	126,55m	
37,10	38,00	0,90	Itabirito silicoso	2015-FD021-001	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, com pequenas crenulações, algumas microfalhas e vênulas de quartzo cortando estruturas, com mistura incipiente das bandas de quartzo e de óxidos de ferro, pouco magnético, de coloração cinza médio a roseado/esbranquiçado.
53,80	54,30	0,50	Itabirito silicoso	2015-FD021-002	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, pouco dobrados, com pequenas crenulações, vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, com pequenos aglomerados de quartzo, algumas pequenas cavidades sem preenchimento, microfalhas, pouco magnético, de coloração cinza médio a roseado/esbranquiçado.
55,15	55,95	0,80	Brecha itabirítica	2015-FD021-003	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, totalmente dobradas, com textura brechada, vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, pequenas crenulações, microfalhas, algumas pequenas cavidades sem preenchimento, com pequenos aglomerados de quartzo, pouco magnético, de coloração cinza médio a escuro e pouco roseado/esbranquiçado.
77,95	79,35	1,40	Brecha itabirítica	2015-FD021-005	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, totalmente obliteradas, com textura brechada, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, pequenos e médios aglomerados de quartzo, microfalhas, com pequenas cavidades com crescimento de quartzo em pente, pouco magnético, de coloração cinza médio a roseado/esbranquiçado.
81,40	82,10	0,70	Minério de ferro maciço	2015-FD021-006	Minério de alto teor em ferro, brechado e em certos locais maciço, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, com cristais transparentes de quartzo, com pequenos à médios aglomerados de quartzo, magnético, de coloração cinza escuro a esbranquiçado.
88,15	89,00	0,85	Brecha itabirítica	2015-FD021-008	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e de óxidos de ferro alternadas, totalmente obliteradas e crenuladas no início do intervalo, com veio de quartzo formando brechas, com microfalhas, vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, com pequenas cavidades sem preenchimento, pouco magnético, de coloração cinza médio a escuro, roseado/esbranquiçado.
92,60	93,15	0,55	Minério de ferro quartzo venulado	2015-FD021-009	Minério de ferro, brechado e em certos locais maciço, com microfalhas, vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, com pequenos à médios aglomerados de quartzo, magnético, de coloração cinza escuro a esbranquiçado e levemente roseado.
116,55	117,40	0,85	Minério de ferro quartzo venulado	2015-FD021-010	Minério de ferro, brechado e em certos locais maciço, com microfalhas, com pequenas cavidades sem preenchimento, pequenos à médios aglomerados de quartzo, vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, magnético, de coloração cinza escuro a esbranquiçado.

**Tabela 2D:** Descrição geológica do furo de sondagem FD028.

Coordenadas UTM				Profundidade total	Descrição detalhada
Leste	Norte	Cota	Mergulho		
564636	7774471	1052 m	60°	144,10 m	
De	Até	Metragem	Classificação	Amostra	
7,05	8,05	1,00	Itabirito silicoso	2015-FD028-001	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, com pequenas crenulações, com algumas vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, com pequenas cavidades com crescimento de quartzo e sem preenchimento, pouco magnético, de coloração cinza médio a roseado/esbranquiçado.
8,90	10,70	1,80	Itabirito silicoso	2015-FD028-002	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, com pequenas crenulações, com pequeno crescimento das bandas de quartzo, com pequenos à médios aglomerados de quartzo esparsos, com microfalhas, com pequenas cavidades sem preenchimento e com crescimento de quartzo, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, pouco magnético, de coloração cinza médio a esbranquiçado.
30,25	33,70	3,45	Itabirito silicoso quartzo venulado	2015-FD028-003	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, com muitas microfalhas, pequenos à médios veios de quartzo cortando discordantemente estruturas, pequenos à médios aglomerados de quartzo e de óxidos de ferro, com aumento da espessura das bandas de quartzo, com pequenas cavidades sem preenchimento, pouco magnético, de coloração cinza médio a roseado/esbranquiçado.
43,70	45,20	1,50	Brecha itabirítica	2015-FD028-004	Itabirito compacto, silicoso, com algumas bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, misturadas e totalmente obliteradas, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, com muitas microfalhas, textura brechada, com pequenos aglomerados de quartzo, pequenas cavidades sem preenchimento, com aumento da espessura de algumas bandas de quartzo, pouco magnético, de coloração cinza médio a roseado/esbranquiçado.
49,70	51,15	1,45	Itabirito silicoso quartzo venulado	2015-FD028-005	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas e misturadas, com microfalhas escalonadas, com pequenos aglomerados de quartzo e de óxidos de ferro, com aumento da espessura das bandas de quartzo, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, pequenas crenulações, pouco magnético, de coloração cinza médio a roseado/esbranquiçado.
93,25	94,15	0,90	Itabirito silicoso	2015-FD028-007	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, com aumento da espessura de algumas bandas de quartzo, com pequenos aglomerados esparsos de quartzo, pequenas crenulações, algumas vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, pequenas cavidades sem preenchimento, pouco magnético, de coloração cinza médio a esbranquiçado.
139,35	140,95	1,60	Brecha itabirítica	2015-FD028-008	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, misturadas e totalmente obliteradas, com aumento da espessura das bandas de quartzo, com pequenos aglomerados e pseudobandas de quartzo e de óxidos de ferro, com pequenas crenulações e microdobras, pequenas cavidades sem preenchimento, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, pouco magnético, de coloração cinza médio a roseado/esbranquiçado.

**Tabela 3D:** Descrição geológica do furo de sondagem FD029.

Coordenadas UTM			Mergulho	Profundidade total	Descrição detalhada
Leste	Norte	Cota			
564418	7774450	1179m	60°	212,60m	
De	Até	Metragem	Classificação	Amostra	
15,10	17,90	2,80	Itabirito silicoso	2015-FD029-001	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e de óxidos de ferro alternadas e pouco misturadas, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, com pequenas crenulações, com aumento incipiente da espessura das bandas de quartzo, pequenos aglomerados esparsos de quartzo e óxidos de ferro, com microfalhas, magnético, de coloração cinza médio a roseado/esbranquiçado.
21,25	23,40	2,15	Itabirito silicoso quartzo venulado	2015-FD029-002	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas e misturadas, com aumento da espessura das bandas de quartzo, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, com pequenos aglomerados de quartzo e óxidos de ferro, com microfalhas, magnético, de coloração cinza escuro a roseado/esbranquiçado.
35,65	37,20	1,55	Brecha itabirítica	2015-FD029-003	Itabirito compacto, silicoso, com algumas bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, misturadas e totalmente obliteradas, com muitos aglomerados de óxidos de ferro, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, com pequenos aglomerados de quartzo, com pequenas crenulações nas bandas existentes, magnético, de coloração cinza escuro a roseado/esbranquiçado.
124,05	126,80	2,75	Itabirito silicoso quartzo venulado	2015-FD029-005	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas e misturadas, com aumento da espessura das bandas de quartzo, com pequenas crenulações, com pequenos aglomerados de quartzo, bastante aglomerados de óxidos de ferro, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, cavidades com crescimento de grãos, magnético, de coloração cinza escuro a esbranquiçado.
156,65	156,85	0,20	Itabirito silicoso quartzo venulado	2015-FD029-007	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas e misturadas, com pequenas crenulações, pequenos aglomerados de quartzo, vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, com mineral verde nas bandas de quartzo, magnético, de coloração cinza escuro a roseado/esbranquiçado.
166,30	166,90	0,60	Minério de ferro quartzo venulado	2015-FD029-009	Minério de ferro, brechado e em certos locais maciço, com pequenos à médios aglomerados e veios de quartzo, com bastante quantidade de quartzo e óxidos de ferro, magnético, de coloração cinza escuro a esbranquiçado e pouco roseado.
211,15	212,60	1,45	Brecha itabirítica	2015-FD029-011	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas incipientes de quartzo e óxidos de ferro alternadas, misturadas e totalmente obliteradas, com microfalhas, com pequenas brechas esparsas, com pequenos à médios aglomerados de quartzo e óxidos de ferro, com pequenas crenulações, com aumento da espessura das bandas de quartzo existentes, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, com mineral verde, magnético, de coloração cinza escuro a roseado/esbranquiçado.

**Tabela 4D:** Descrição geológica do furo de sondagem FD048.

Coordenadas UTM				Profundidade total	Descrição detalhada
Leste	Norte	Cota	Mergulho		
565348	7774620	1207m	90°	179,75m	
De	Até	Metragem	Classificação	Amostra	
178,95	179,75	0,8	Brecha com sulfetos	2017-FD048-001	Brecha compacta com sulfetos, com bandas centimétricas de quartzo/carbonato e óxidos de ferro alternadas, dobradas e fraturadas, com vênulas de quartzo/carbonato cortando discordantemente estruturas, pequenas crenulações, pequenos aglomerados de quartzo, magnético, de coloração cinza médio a esbranquiçado.

**Tabela 5D:** Descrição geológica do furo de sondagem FD052.

Coordenadas UTM				Profundidade total	Descrição detalhada
Leste	Norte	Cota	Mergulho		
565275	7774707	1138m	90°	225,25m	
De	Até	Metragem	Classificação	Amostra	
141,25	142,80	1,55	Brecha com sulfetos	2015-FD052-003	Brecha compacta com sulfetos, com textura maciça, com veios de quartzo/carbonato, magnético, de coloração cinza claro a médio/esbranquiçado e brilhante.
164,30	170,70	6,40	Brecha com sulfetos	2015-FD052-005	Brecha compacta com sulfetos, com vênulas de quartzo e sulfetos, com sulfetos em todo o intervalo amostrado, com pequenos aglomerados de óxidos de ferro, magnético, de coloração cinza claro a médio/esbranquiçado e brilhante.
211,80	212,65	0,85	Brecha com sulfetos	2015-FD052-006	Brecha compacta com sulfetos, com vênulas de quartzo/carbonato, com veios de óxidos de ferro, com pequenos aglomerados de óxidos de ferro presentes dentro dos veios de quartzo/carbonato, magnético, de coloração cinza claro a médio/esbranquiçado e brilhante.
220,40	223,95	3,55	Brecha com sulfetos	2015-FD052-007	Brecha compacta com sulfetos, com pequenos aglomerados de óxidos de ferro, com veios de quartzo/carbonato, com sulfetos nas bandas de óxidos de ferro, magnético, de coloração cinza claro a médio/esbranquiçado e brilhante.

**Tabela 6D:** Descrição geológica do furo de sondagem FD055.

<b>Coordenadas UTM</b>				<b>Profundidade total</b>	<b>Descrição detalhada</b>
<b>Leste</b>	<b>Norte</b>	<b>Cota</b>	<b>Mergulho</b>		
564346	7774349	1044m	60°	180,50m	
<b>De</b>	<b>Até</b>	<b>Metragem</b>	<b>Classificação</b>	<b>Amostra</b>	
115,85	116,95	1,10	Itabirito silicoso	2015-FD055-001	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, com vênula de quartzo cortando discordantemente estruturas, com pequenas cavidades sem preenchimento, pouco magnético, de coloração cinza médio a roseado/esbranquiçado.
131,40	133,50	2,10	Itabirito silicoso quartzo venulado	2015-FD055-002	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, com aumento da espessura das bandas de quartzo, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, microdobras, pouco magnético, de coloração cinza médio a esbranquiçado e pouco roseado.
144,85	148,85	4,00	Itabirito silicoso quartzo venulado	2015-FD055-003	Itabirito compacto, silicoso, com bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, com aumento da espessura das bandas de quartzo, com microfalhas, com pequenas crenulações, com vênulas de quartzo cortando discordantemente estruturas, com textura brechada em algumas passagens, pouco magnético, de coloração cinza médio a bastante roseado.
171,00	172,05	1,05	Brecha itabirítica	2015-FD055-004	Itabirito compacto, silicoso, com algumas bandas centimétricas de quartzo e óxidos de ferro alternadas, misturadas e totalmente obliteradas, com pequenas crenulações, microdobras, pequenos aglomerados de quartzo, microfalhas, pouco magnético, de coloração cinza médio a pouco roseado/esbranquiçado.

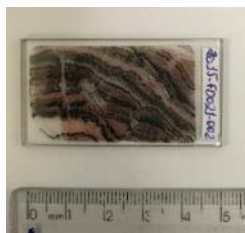


## ANEXO E

---

Descrição detalhada de algumas lâminas  
analizadas

---

**LÂMINA 2016-FD021-002****Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 40%	Martita (Mar)	± 36%
Quartzo venular (QtzV)	± 10%	Hematita anédrica (HemA)	± 10%
		Hematita microlamelar (HemMI)	± 4%

**Escala de Wentworth**Granulação muito fina:  $\varnothing < 0,004$  mmGranulação fina:  $0,004 < \varnothing < 0,064$  mmGranulação média:  $0,064 < \varnothing < 2$  mm**Nome da rocha:** Itabirito silicoso microdobrado e com vênulas.**Descrição microscópica**

Lâmina com bandas milimétricas microdobradas e alternadas de quartzo recristalizado e opacos. Vênulas de quartzo venular. Finos a médios aglomerados de quartzo venular nas bandas milimétricas. Porosidade moderada a alta dos grãos e das bandas milimétricas de opacos.

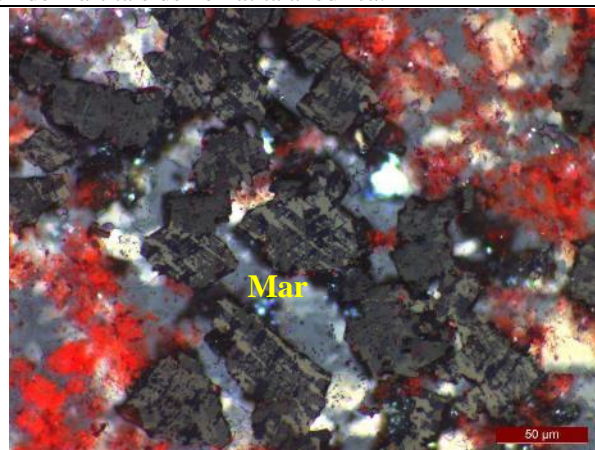
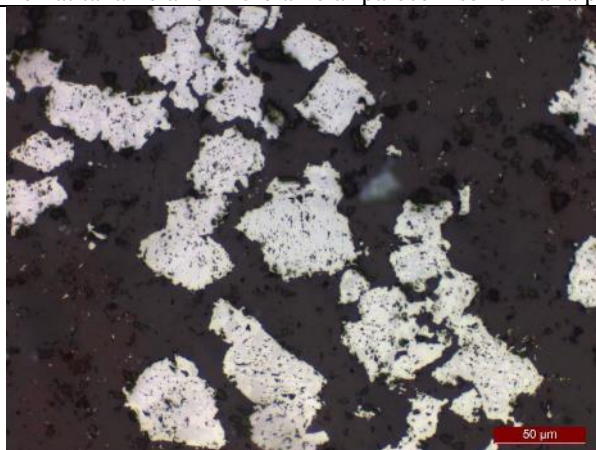
Bandas milimétricas microdobradas de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; de grãos esparsos, e em aglomerados, de martita euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina (Fotomicrografia 1); de pouca quantidade de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina (Fotomicrografia 2); e de hematita microlamelar euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina. Pequenos aglomerados de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média (Fotomicrografia 3).

Bandas milimétricas microdobradas de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina; de pouca quantidade de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; e de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 4).

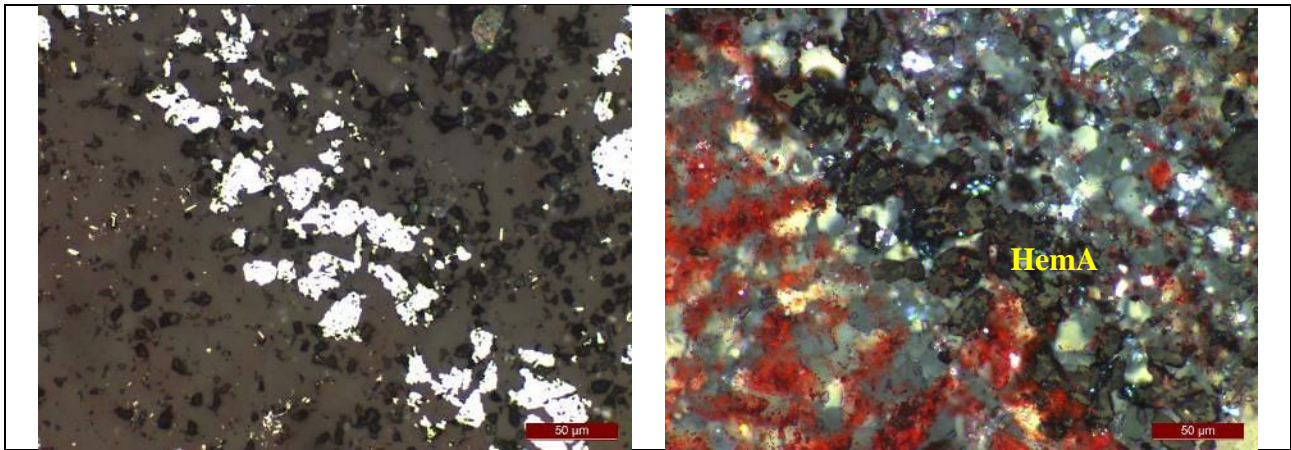
Vênulas de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê e de granulação fina a média. Cortam as bandas milimétricas microdobradas (Fotomicrografia 5).

**Observações:**

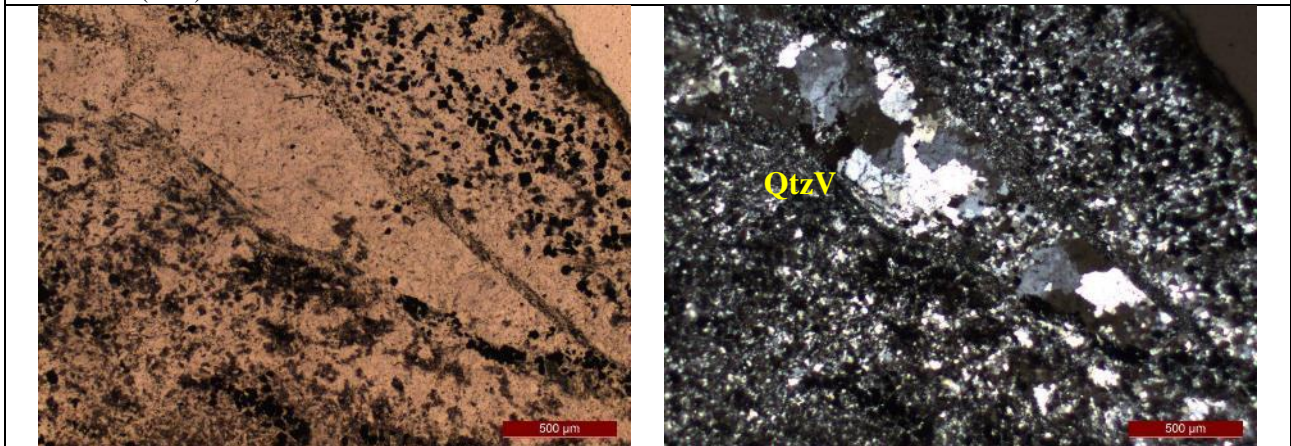
- Alta quantidade de quartzo recristalizado que pode indicar baixo grau de alteração da rocha;
- Vênulas de quartzo venular são posteriores as microdobras;
- Hematita anédrica parece se formar a partir de martita;
- Hematita lamelar e microlamelar parecem se formar a partir de martita e de hematita anédrica.



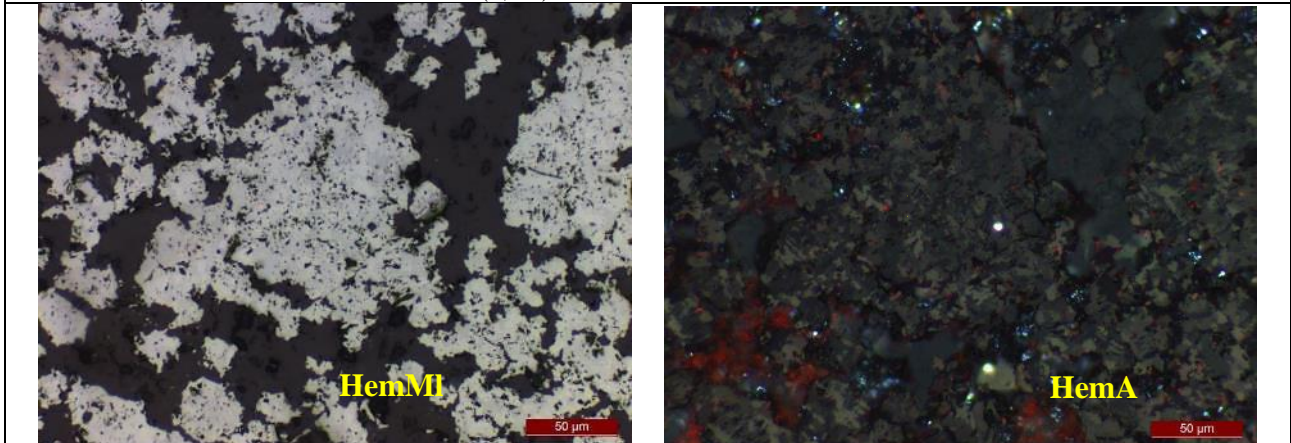
**Fotomicrografia 1:** Grãos esparsos, e em aglomerados, de martita (Mar) na banda milimétrica microdobrada de quartzo recristalizado. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



**Fotomicrografia 2:** Grãos esparsos, e em aglomerados, de hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados na banda milimétrica microdobrada de quartzo recristalizado. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

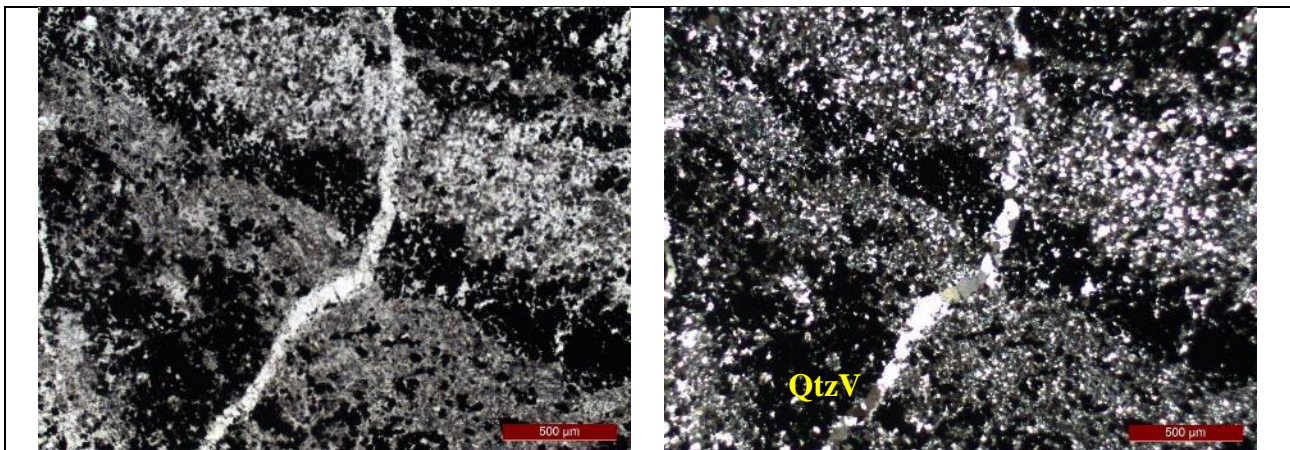


**Fotomicrografia 3:** Pequeno aglomerado de quartzo venular (QtzV) na banda milimétrica microdobrada. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).



**Fotomicrografia 4:** Martita (Mar), hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, e hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica microdobrada de opacos. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).





**Fotomicrografia 5:** Vênula de quartzo venular (QtzV) que cortam ambas as bandas milimétricas microdobradas. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

**LÂMINA 2016-FD021-005**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 25%	Martita (Mar)	± 21%
Quartzo venular (QtzV)	± 25%	Hematita anédrica (HemA)	± 20%
		Hematita microlamelar (HemMI)	± 5%
		Kenomagnetita (Keno)	± 4%

**Escala de Wentworth**

- Granulação muito fina:  $\varnothing < 0,004$  mm
- Granulação fina:  $0,004 < \varnothing < 0,064$  mm
- Granulação média:  $0,064 < \varnothing < 2$  mm

**Nome da rocha:** Brecha itabirítica.

**Descrição microscópica**

Lâmina com pseudobandas milimétricas alternadas de quartzo recristalizado e de opacos. Vênulas de quartzo venular. Aglomerados de quartzo venular na porção leste e textura brechada. Porosidade baixa dos grãos e das pseudobandas milimétricas de opacos.

Pseudobandas milimétricas de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; e de aglomerados de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina a média (Fotomicrografia 1). Grãos esparsos, e em aglomerados, de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita (Fotomicrografia 2); de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; e de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 3).

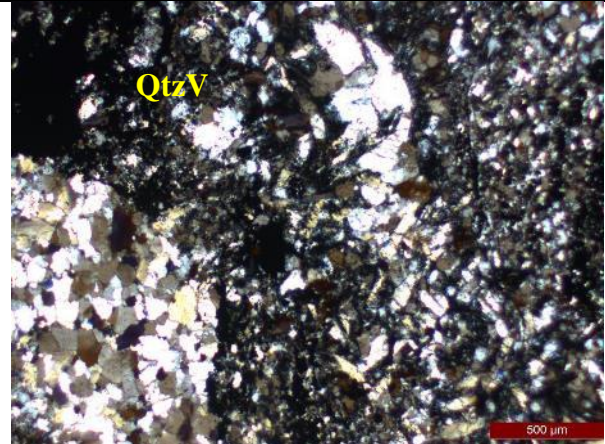
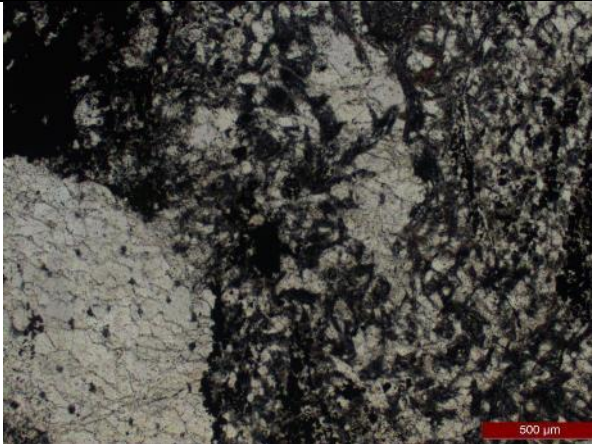
Pseudobandas milimétricas de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita (Fotomicrografias 4 e 5); e de pouca quantidade de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 6). Pouca quantidade de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina.

Vênulas de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê e de granulação fina (Fotomicrografia 7). Cortam todas as pseudobandas milimétricas e formam aglomerados de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média (Fotomicrografia 8).

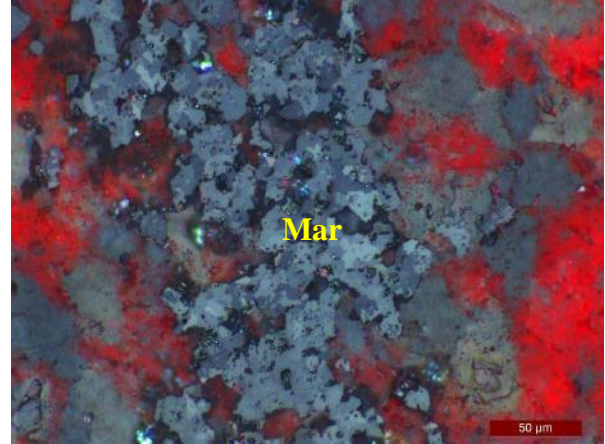
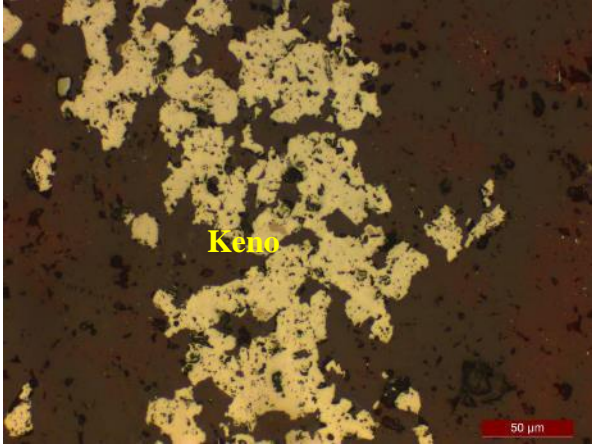


Observações:

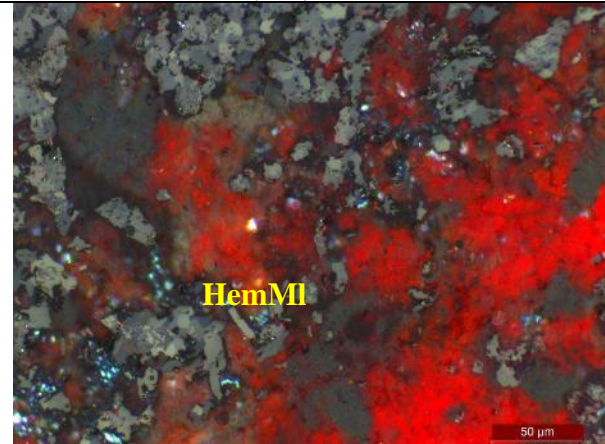
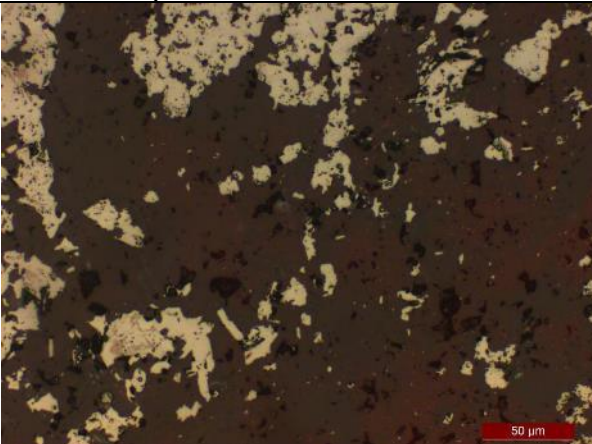
- Vênulas de quartzo venular podem ter se originado em outros locais ou das próprias pseudobandas milimétricas de quartzo;
- Hematita microlamelar parece se formar a partir de hematita anédrica e de martita;
- Martita parece dar origem a hematita anédrica de granulação muito fina e fina;
- Alta quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica deficiência em  $Fe^{+2}$  do sistema e baixo grau de oxidação da rocha.



**Fotomicrografia 1:** Aglomerados de quartzo venular (QtzV) na pseudobanda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

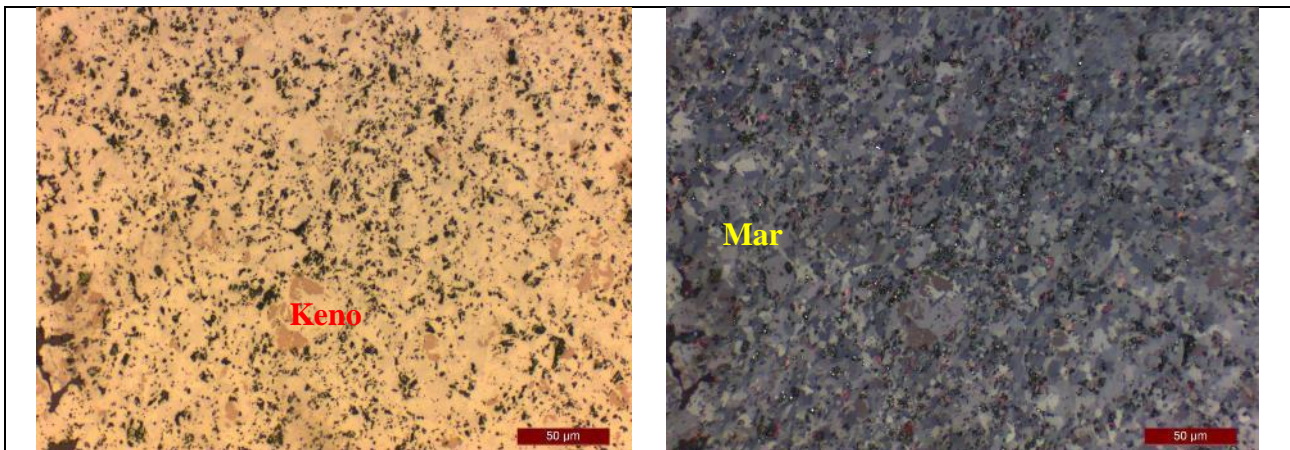


**Fotomicrografia 2:** Grãos esparsos de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) na pseudobanda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

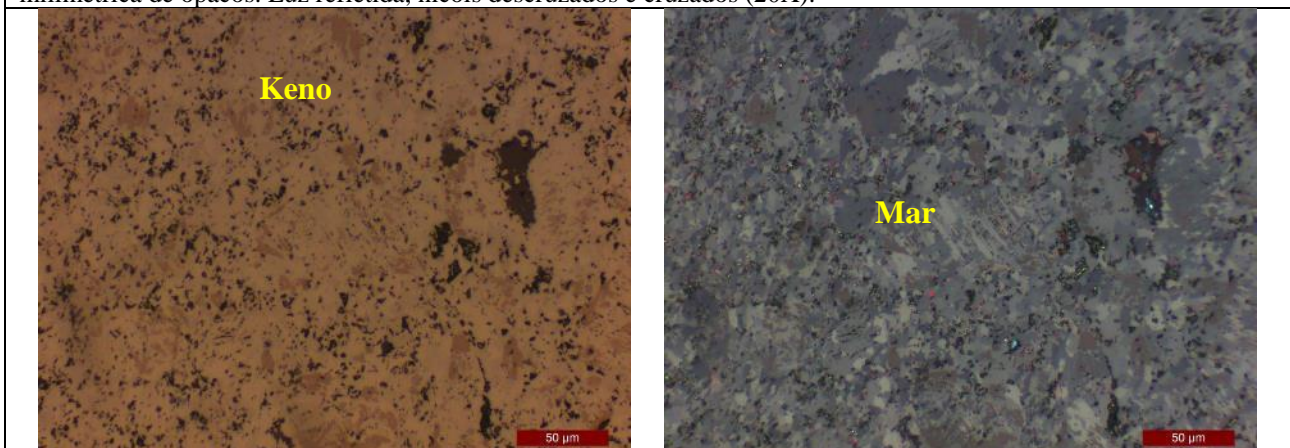


**Fotomicrografia 3:** Hematita microlamelar (HemMI) na pseudobanda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

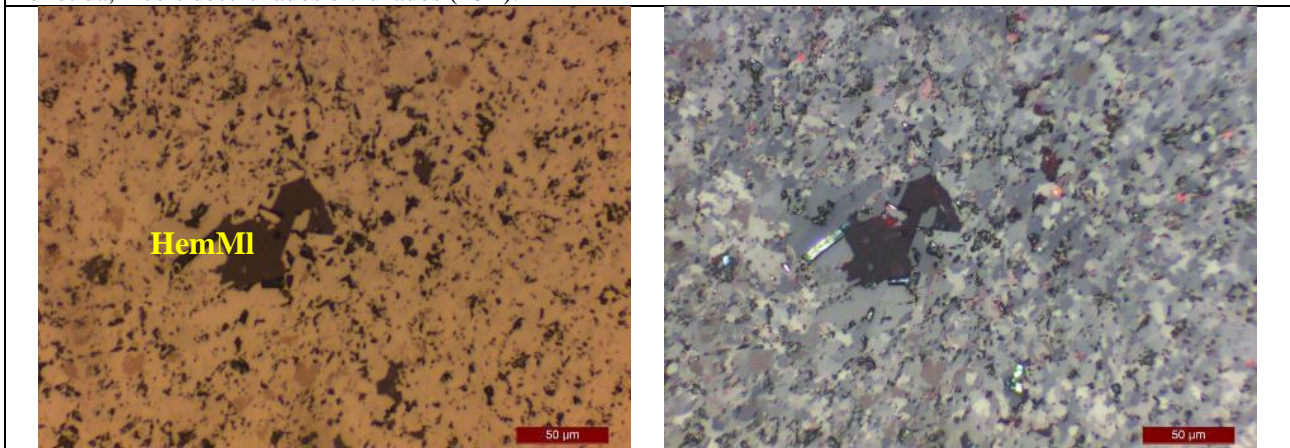




**Fotomicrografia 4:** Grãos em aglomerados de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) na pseudobanda milimétrica de opacos. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

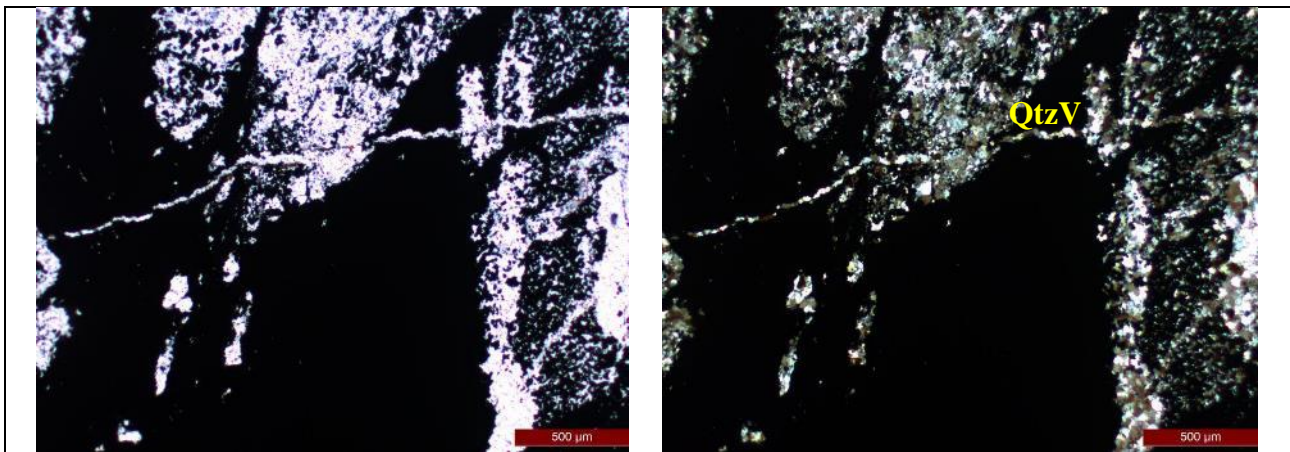


**Fotomicrografia 5:** Martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) na pseudobanda milimétrica de opacos. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

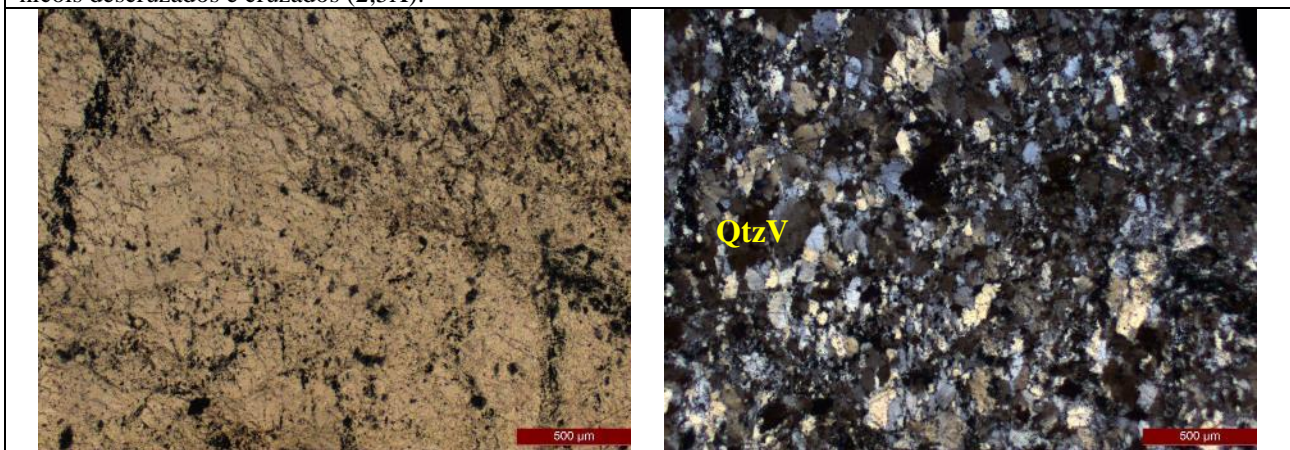


**Fotomicrografia 6:** Hematita microlamelar (HemMI) na pseudobanda milimétrica de opacos. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).





**Fotomicrografia 7:** Vênula de quartzo venular (QtzV) que cortam as pseudobandas milimétricas. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).



**Fotomicrografia 8:** Aglomerado de quartzo venular (QtzV) formado por vênula. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

**LÂMINA 2016-FD021-006**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo venular (QtzV)	± 15%	Hematita anédrica (HemA)	± 39%
		Martita (Mar)	± 26%
		Hematita microlamelar (HemMI)	± 18%
		Hematita lamelar (HemL)	± 2,5%
		Kenomagnetita (Keno)	± 0,5%

**Escala de Wentworth**

Granulação muito fina:  $\varnothing < 0,004$  mm  
 Granulação fina:  $0,004 < \varnothing < 0,064$  mm  
 Granulação média:  $0,064 < \varnothing < 2$  mm

**Nome da rocha:** Minério de ferro de alto teor maciço com vênulas.

**Descrição microscópica**

Lâmina sem estrutura definida composta por uma mistura de quartzo venular e opacos. Aglomerados de quartzo venular em alta quantidade na porção oeste, e vênulas de quartzo venular e opacos. Porção central e leste composta por quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média que, por vezes, formam finos aglomerados (Fotomicrografia 1). Presença de hematita anédrica com

bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita (Fotomicrografias 2 e 3); e de hematita lamelar e microlamelar euédricas tabulares, bordas regulares, de granulação fina e muito fina (Fotomicrografia 4).

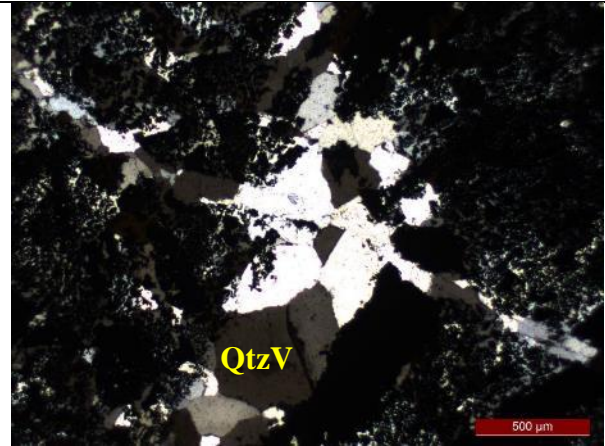
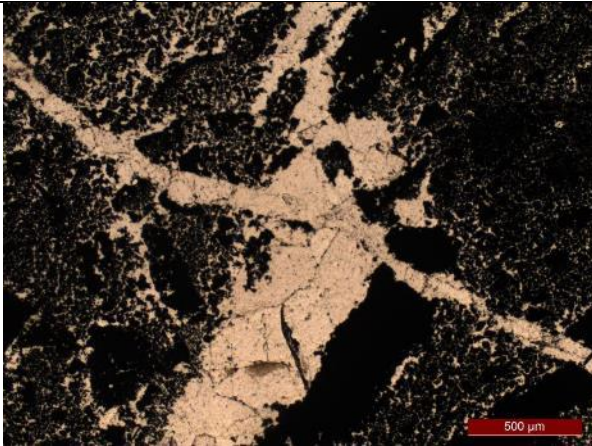
Porção oeste composta por quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média que, por vezes, formam pequenos aglomerados e pseudobandas (Fotomicrografia 5). Presença de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina (Fotomicrografia 6); de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 7); e de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita (Fotomicrografia 8).

Vênulas de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê e de granulação fina a média. Cortam a mistura de grãos da lâmina (Fotomicrografia 9).

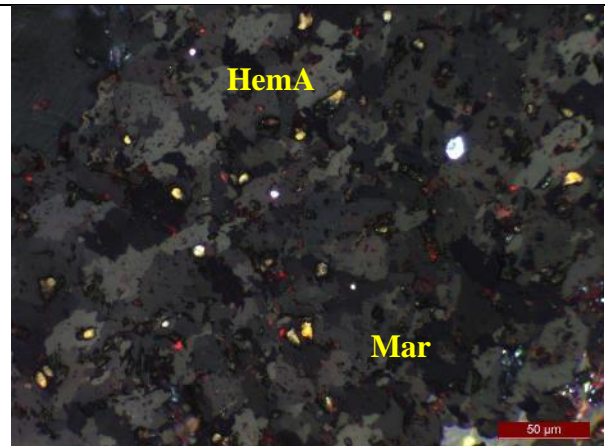
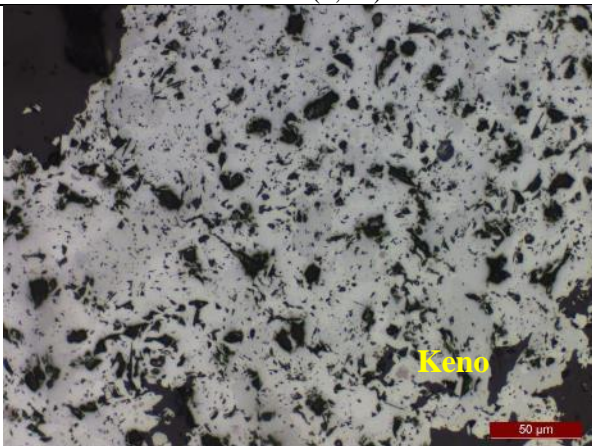
Vênulas de opacos que cortam a mistura de grãos da lâmina (Fotomicrografia 10). Presença de aglomerados de opacos.

Observações:

- Só quartzo venular pode indicar alto grau de alteração da rocha;
- Vênulas e aglomerados de opacos cortam alguns aglomerados de quartzo (Fotomicrografia 10) o que indica que são posteriores;
- Vênulas de quartzo venular cortam todas as outras estruturas existentes o que indica serem também posteriores;
- Hematita lamelar e microlamelar parecem se formar a partir de hematita anédrica e de martita;
- Martita parece dar origem a hematita anédrica de granulação muito fina a fina;
- Pouca quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica deficiência em  $Fe^{+2}$  do sistema e alto grau de oxidação da rocha.

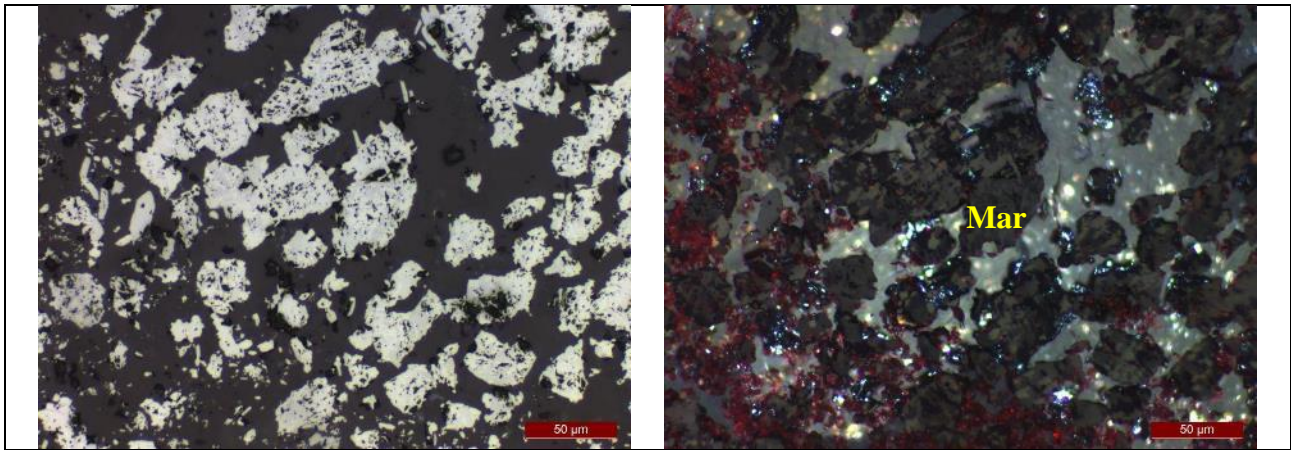


**Fotomicrografia 1:** Aglomerados de quartzo venular (QtzV) na mistura de grãos da porção leste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

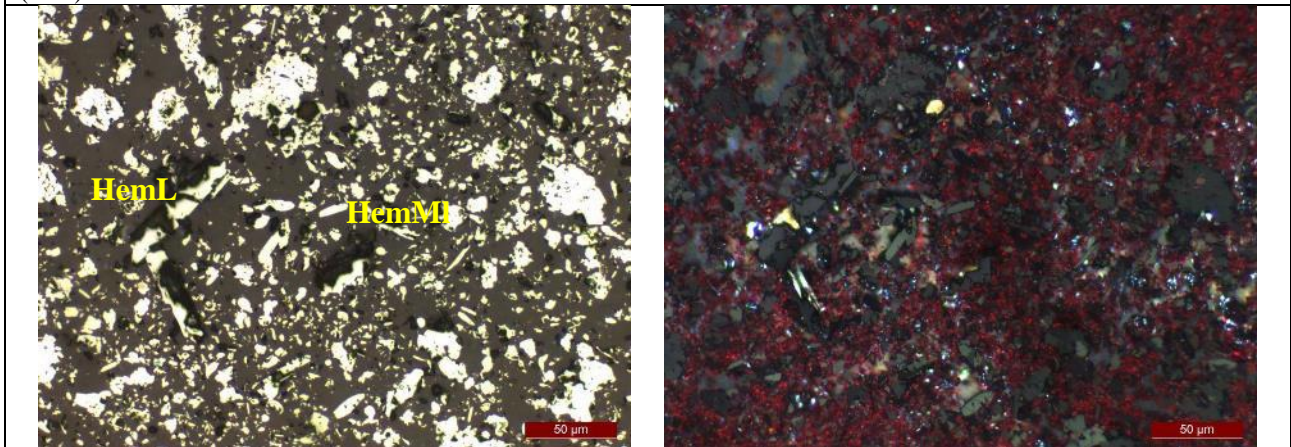


**Fotomicrografia 2:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, e martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) na mistura de grãos da porção leste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

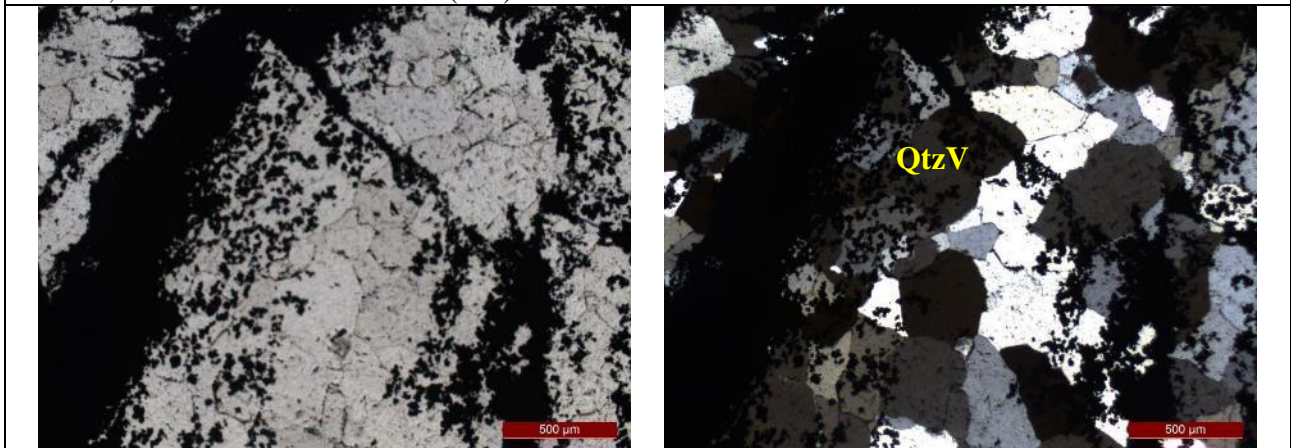




**Fotomicrografia 3:** Martita (Mar) na mistura de grãos da porção leste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

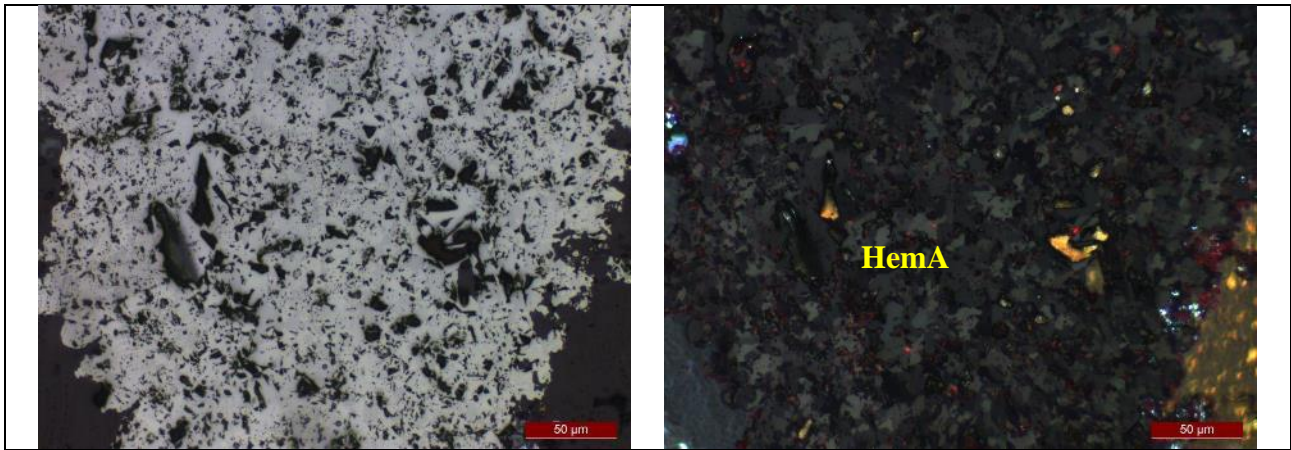


**Fotomicrografia 4:** Hematita lamelar (HemL) e microlamelar (HemMI) na mistura de grãos da porção leste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

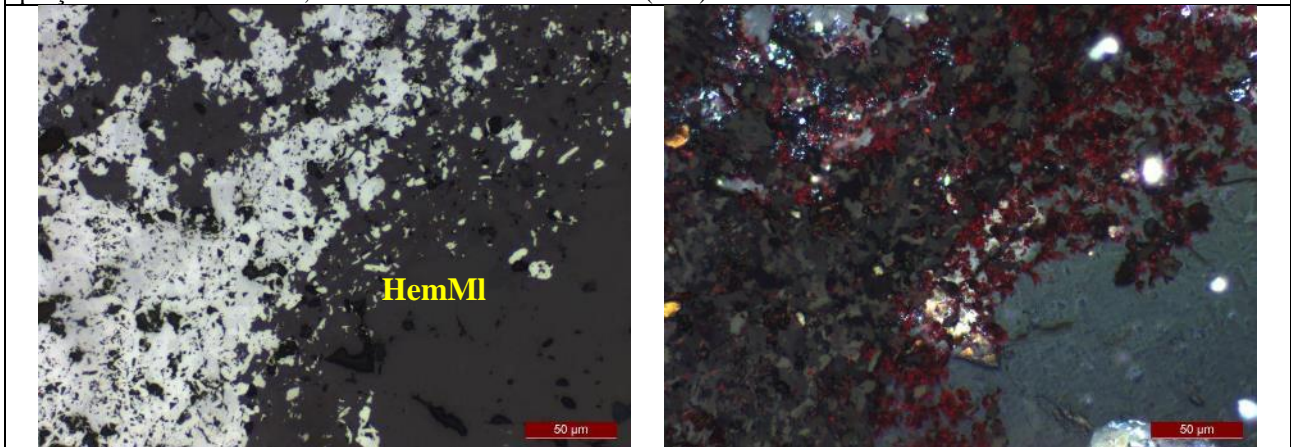


**Fotomicrografia 5:** Aglomerado de quartzo venular (QtzV) na mistura de grãos da porção oeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

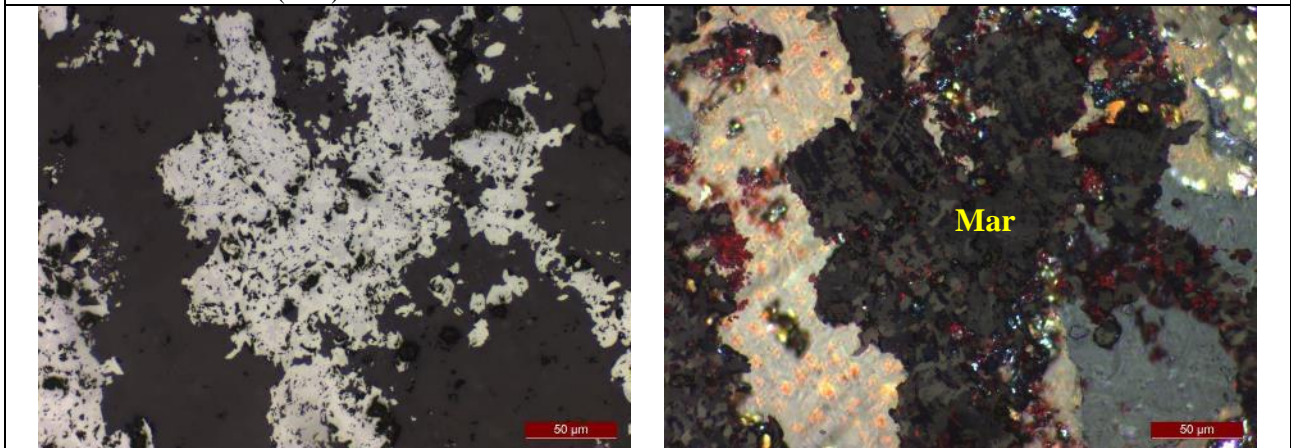




**Fotomicrografia 6:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados na mistura de grãos da porção oeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

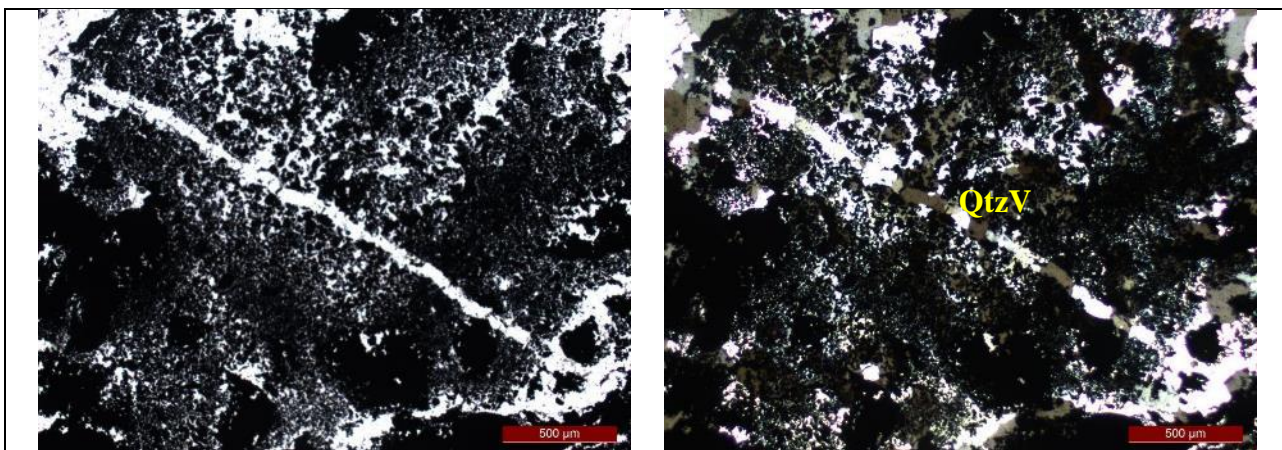


**Fotomicrografia 7:** Hematita microlamellar (HemMI) na mistura de grãos da porção oeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

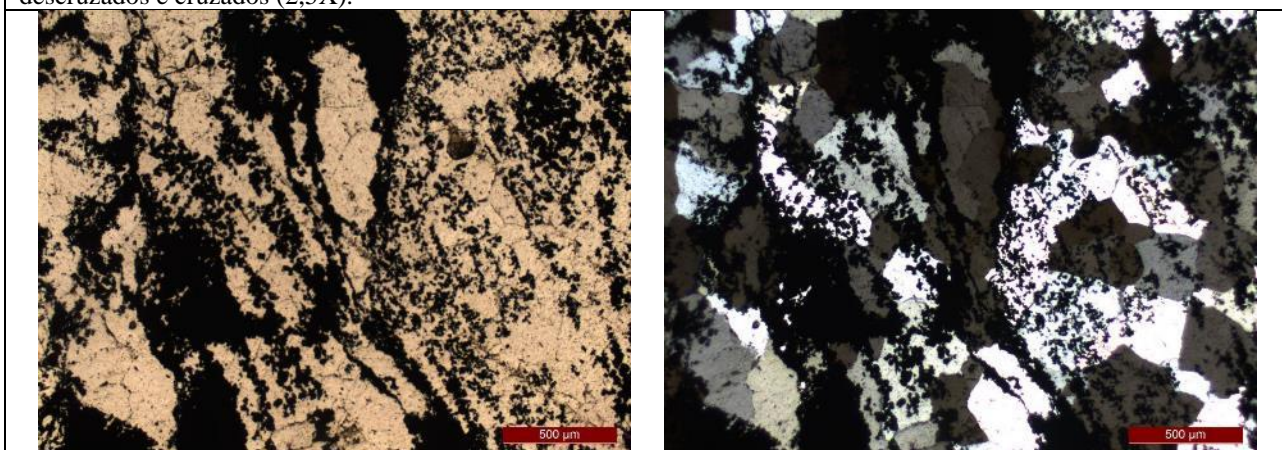


**Fotomicrografia 8:** Martita (Mar) na mistura de grãos da porção oeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



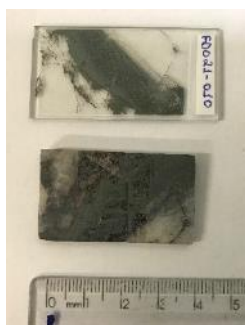


**Fotomicrografia 9:** Vênula de quartzo venular (QtzV) que corta a mistura de grãos. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).



**Fotomicrografia 10:** Vênula de opacos que corta a mistura de grãos. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

**LÂMINA 2016-FD021-010**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo venular (QtzV)	± 40%	Hematita anédrica (HemA)	± 30%
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 10%	Martita (Mar)	± 13%
Grunerita (Gru)	± 0,5%	Hematita microlamelar (HemMI)	± 6%
		Kenomagnetita (Keno)	± 0,5%

**Escala de Wentworth**

Granulação muito fina: $\varnothing < 0,004$ mm
Granulação fina: $0,004 < \varnothing < 0,064$ mm
Granulação média: $0,064 < \varnothing < 2$ mm
<b>Nome da rocha:</b> Minério de ferro de alto teor quartzo venulado.

### Descrição microscópica

Lâmina com bandas milimétricas na porção leste que apresentam aumento progressivo da granulação de quartzo. Microfalhas e vênula de opacos na porção leste. Banda centimétrica na porção central de opacos, banda centimétrica na porção oeste de quartzo venular, e vênulas de opacos. Porosidade baixa a moderada dos grãos, da banda centimétrica central de opacos e das vênulas de opacos.

Banda milimétrica da porção leste de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina, com grãos esparsos de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 1). Grada, da esquerda para a direita, para outra banda milimétrica de quartzo venular euédrico a anédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina; e para outra de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média.

Banda centimétrica da porção central composta por uma mistura de pouca quantidade de cristais esparsos, e em aglomerados, de quartzo recristalizado, anédricos, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação muito fina a média; e de alta quantidade de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina e fina; de grãos esparsos de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 2). Pouca quantidade de grunerita euédrica, bordas irregulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 3)

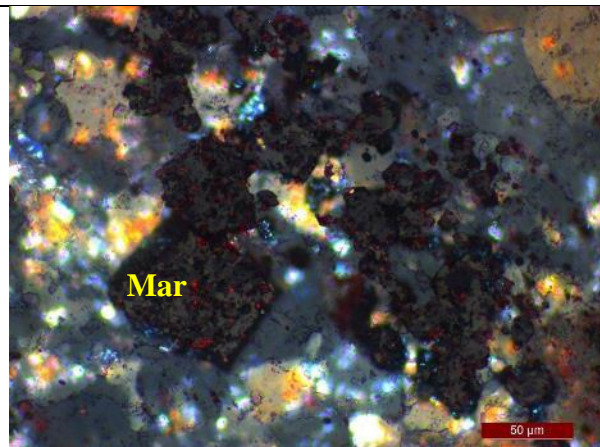
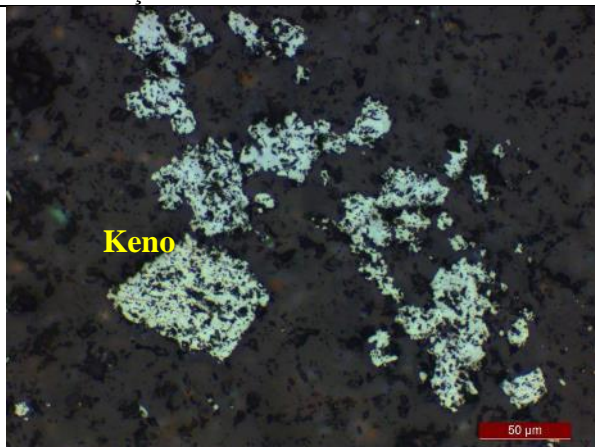
Banda centimétrica da porção oeste de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média. Cristais esparsos, e em aglomerados, de quartzo venular, euédricos a anédricos, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina. Possui também aglomerados de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina; e de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita (Fotomicrografia 4).

Vênulas da porção leste e oeste composta por de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina. Cortam as bandas milimétricas de quartzo recristalizado (Fotomicrografia 5).

Microfalhas da porção leste cortam, deslocam e permitem à geração de aglomerados de quartzo recristalizado; de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina; de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; e de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 6).

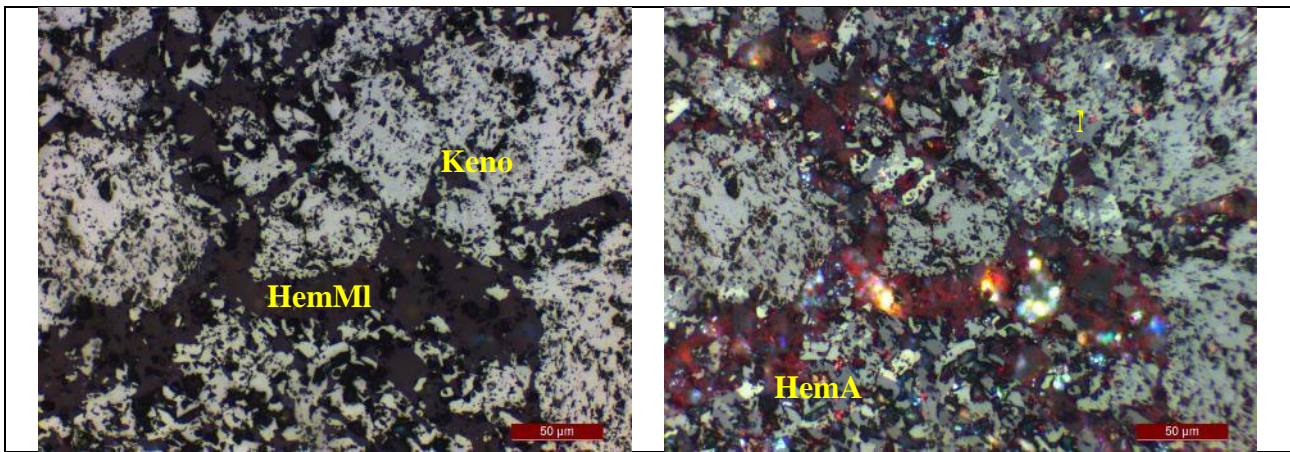
#### Observações:

- Bandas milimétricas da porção leste mostram aumento da granulação de quartzo o que pode estar correlacionado com metamorfismo;
- Microfalhas podem ter criado um caminho para mobilização dos minerais opacos da banda centimétrica da porção central gerando vênulas e aglomerados;
- Banda centimétrica da porção oeste com maioria dos cristais de quartzo parecendo estar recristalizados e com vênulas e aglomerados parecendo ser provenientes da banda centimétrica de opacos da porção central. Aumento da granulação de quartzo está correlacionada com eventos posteriores;
- Hematita microlamelar parece provir de martita e de hematita anédrica;
- Martita parece dar origem a hematita anédrica de granulação muito fina e fina;
- Pouca quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica deficiência em  $Fe^{+2}$  do sistema e alto grau de oxidação da rocha.

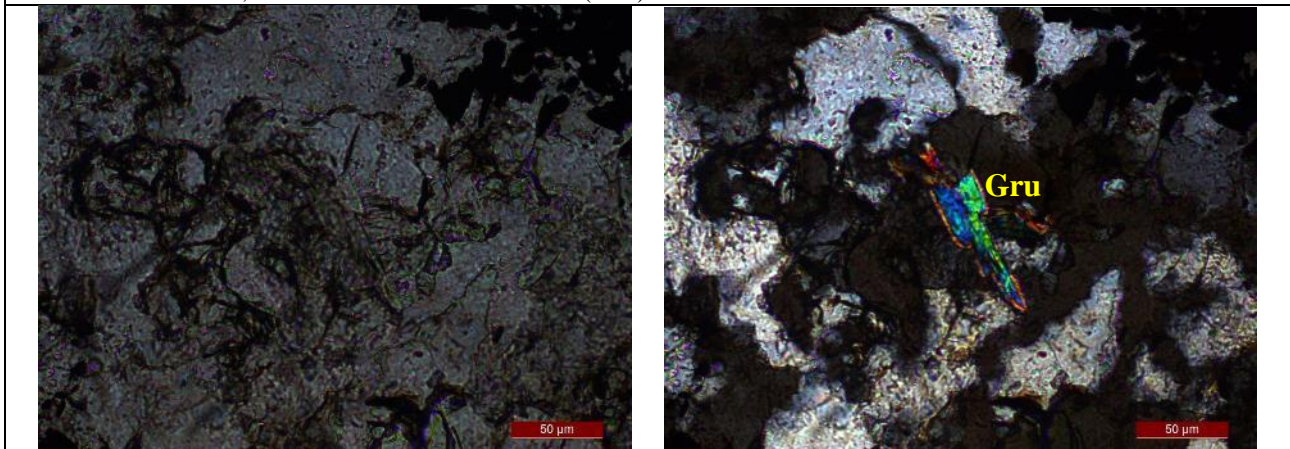


**Fotomicrografia 1:** Grãos esparsos de martita (mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) na banda milimétrica de quartzo recristalizado da porção leste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

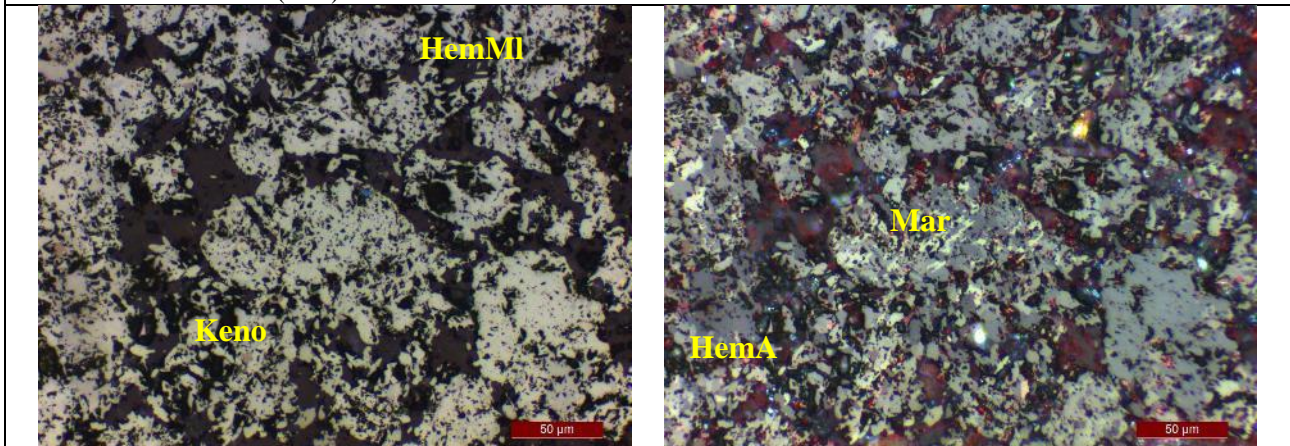




**Fotomicrografia 2:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e hematita microlamelar (HemML) na banda centimétrica de opacos da porção central. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

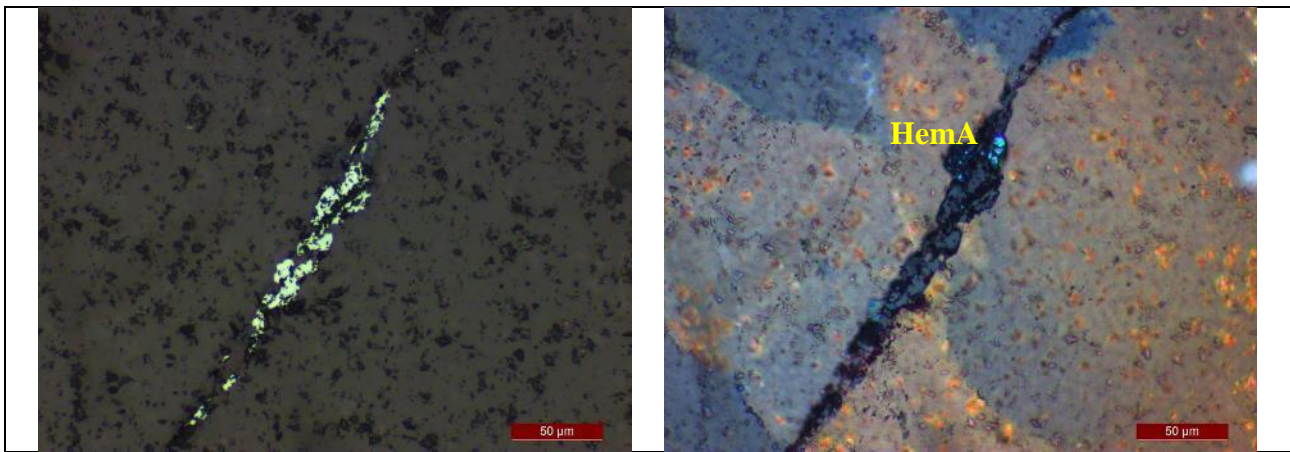


**Fotomicrografia 3:** Grunerita (Gru) na banda centimétrica de opacos da porção central. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

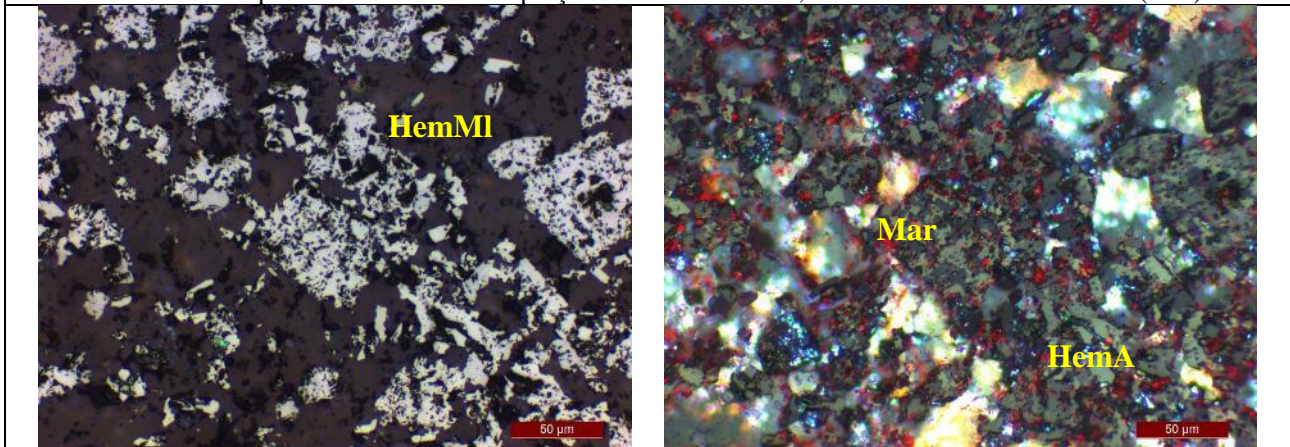


**Fotomicrografia 4:** Pequeno aglomerado de hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e de hematita microlamelar (HemML) na banda centimétrica de Quartzo venular da porção oeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



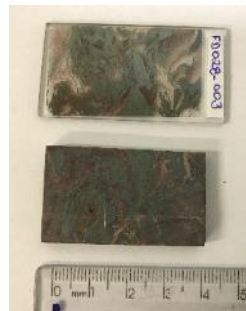


**Fotomicrografia 5:** Vênula de hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, cortando a banda milimétrica de quartzo recristalizado da porção leste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



**Fotomicrografia 6:** Aglomerado de hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, de martita (Mar) e de hematita microlamelar (HemMI) formando devido à microfalha e presente na banda milimétrica de quartzo recristalizado da porção leste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

**LÂMINA 2016-FD028-003**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 25%	Martita (Mar)	± 20%
Quartzo venular (QtzV)	± 20%	Hematita microlamelar (HemMI)	± 16%
Muscovita (Ms)	± 1%	Hematita anédrica (HemA)	± 13%
		Kenomagnetita (Keno)	± 3%
		Hematita lamelar (HemL)	± 2%

**Escala de Wentworth**

Granulação muito fina: $\varnothing < 0,004$ mm
Granulação fina: $0,004 < \varnothing < 0,064$ mm
Granulação média: $0,064 < \varnothing < 2$ mm
<b>Nome da rocha:</b> Itabirito silicoso quartzo venulado com microdobras.



### Descrição microscópica

Lâmina com pseudobandas milimétricas alternadas, intercortadas e microdobradas, de quartzo recristalizado, de venular e opacos. Vênulas de quartzo venular em diversas direções. Finos aglomerados de quartzo venular dentro das pseudobandas milimétricas de opacos. Porosidade baixa a moderada dos grãos e das pseudobandas milimétricas de opacos.

Pseudobandas milimétricas, microdobradas, de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; com grãos esparsos de muscovita, euédricos, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 1); com grãos esparsos, e em aglomerados, de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 2); e de pouca quantidade de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; e de hematita lamelar, euédrica tabular, bordas regulares, de granulação fina (Fotomicrografia 3).

Pseudobandas milimétricas, microdobradas e intercortadas, de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 4).

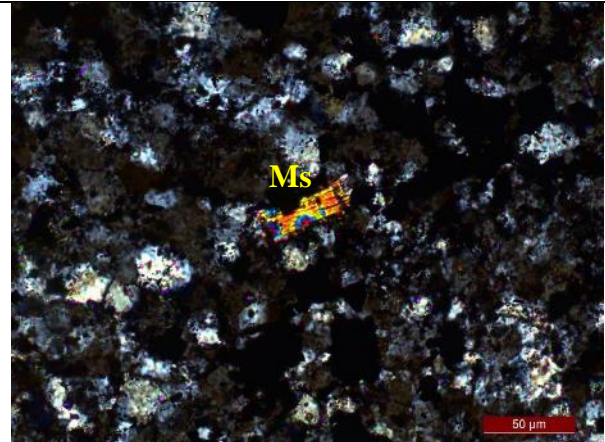
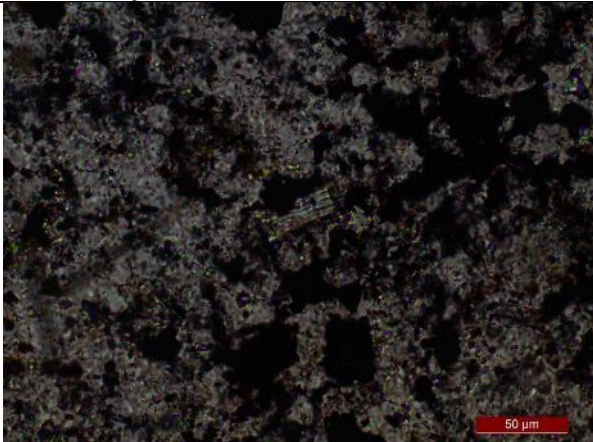
Pseudobandas milimétricas, microdobradas, de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina a média (Fotomicrografia 5).

Vênulas de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê e de granulação fina a média (Fotomicrografia 6). Cortam as pseudobandas milimétricas de opacos

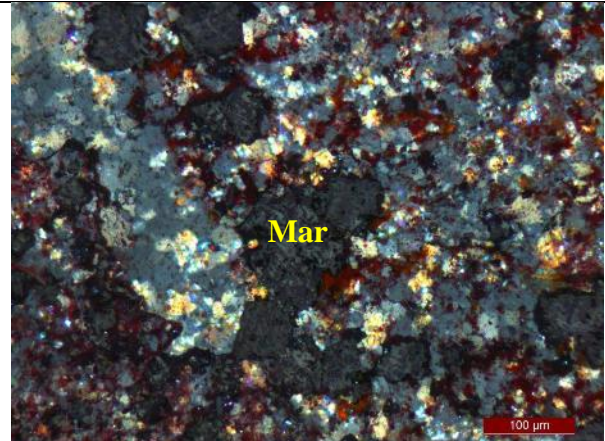
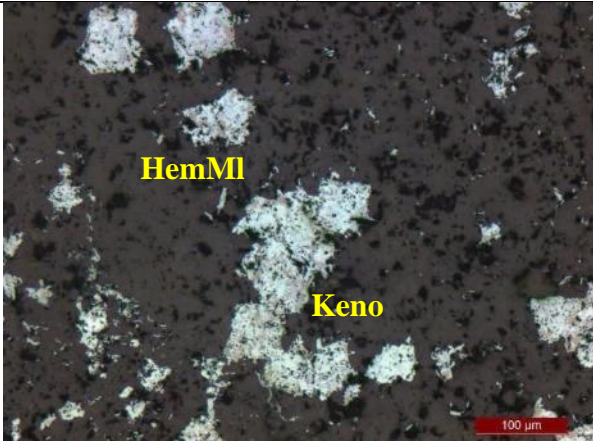
Finos aglomerados de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina a média (Fotomicrografia 7).

#### Observações:

- Quartzo de granulação fina a média parece ser produto de reprecipitação e se concentram em possíveis veios, vênulas e aglomerados posteriores;
- Parece que existiam bandas de quartzo recristalizado e opacos alternados que foram obliteradas por microdobras e transformações posteriores;
- Hematita lamelar e microlamelar parecem se formar a partir de hematita anédrica e de martita;
- Martita parece dar origem a hematita anédrica de granulação muito fina e fina;
- Alta quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica deficiência em  $Fe^{+2}$  do sistema e baixa grau de oxidação da rocha.

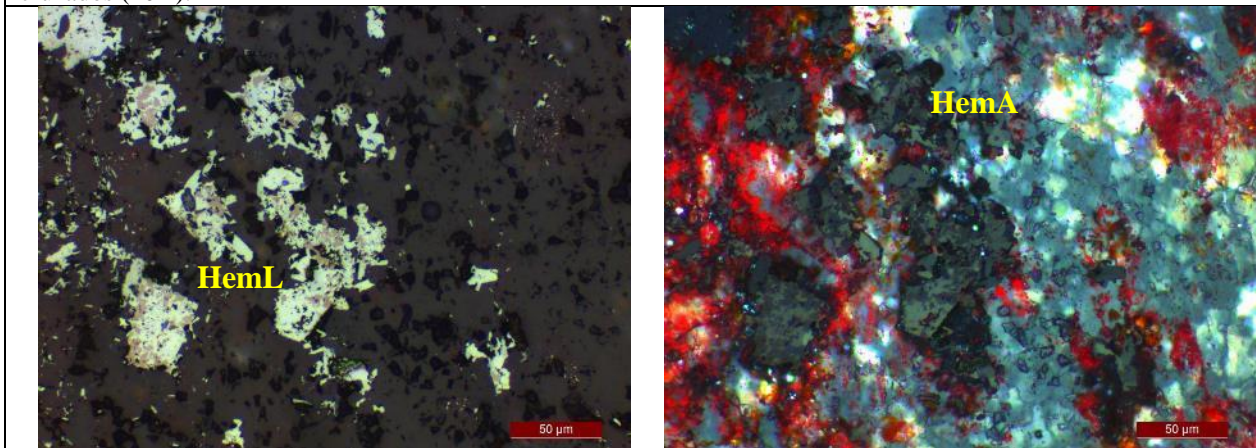


**Fotomicrografia 1:** Muscovita (Ms) na pseudobanda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz transmitida, nicóis des cruzados e cruzados (20X).

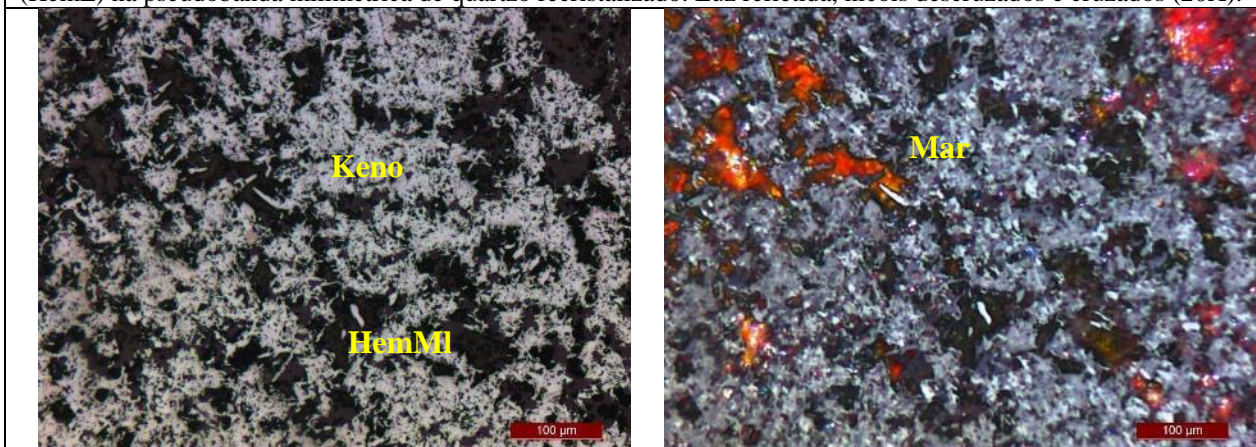




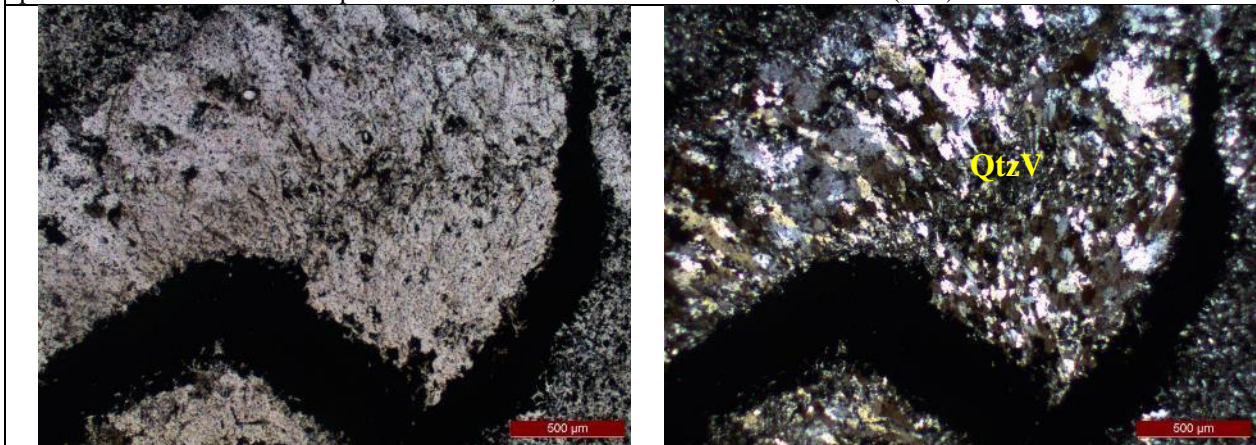
**Fotomicrografia 2:** Grãos esparsos de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), e de hematita microlamelar (HemMI) na pseudobanda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).



**Fotomicrografia 3:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, e hematita lamelar (HemL) na pseudobanda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

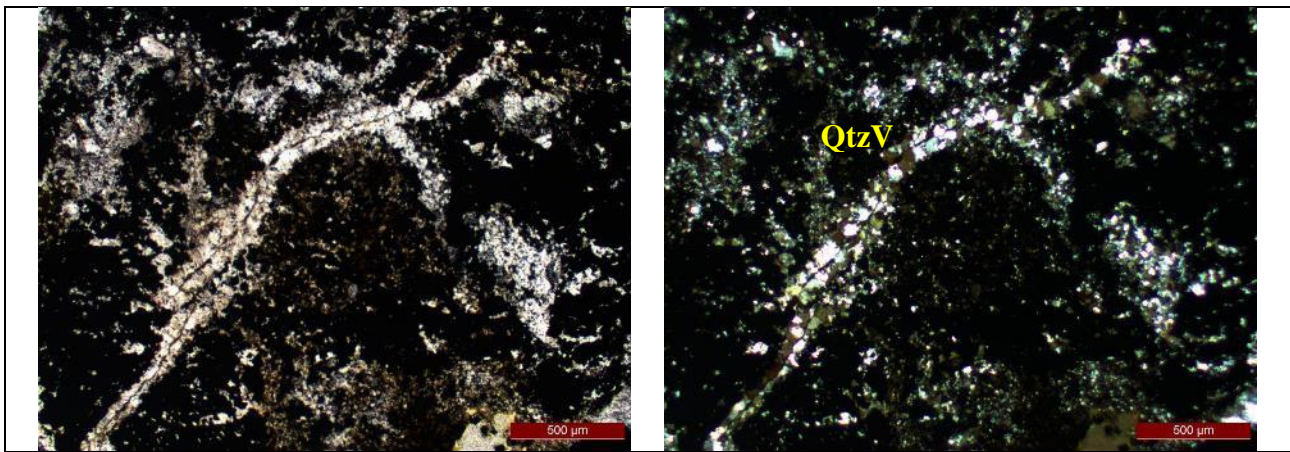


**Fotomicrografia 4:** Martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), e hematita microlamelar (HemMI) na pseudobanda milimétrica de opacos. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

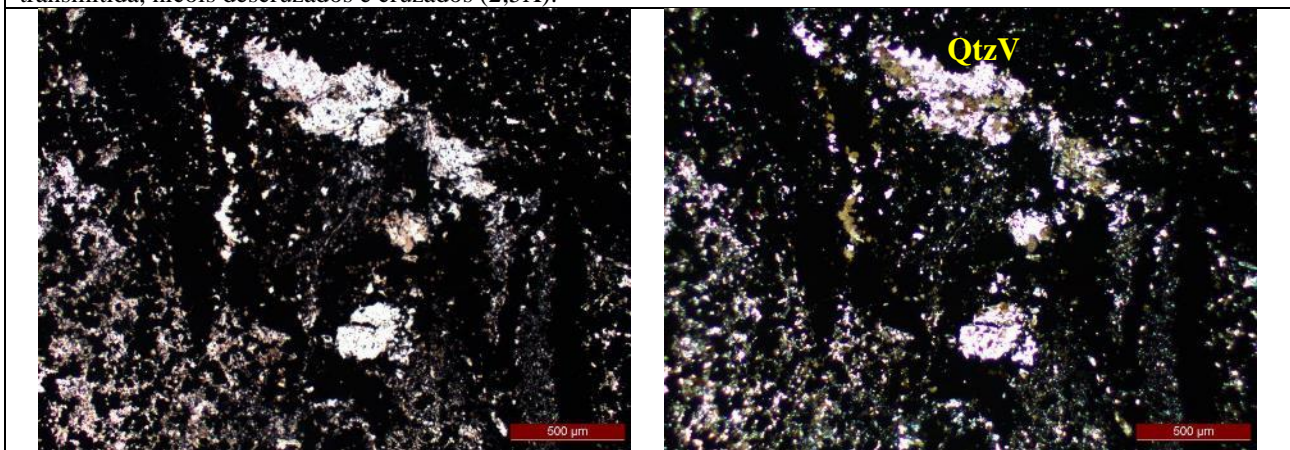


**Fotomicrografia 5:** Pseudobandas milimétricas microdobradas de quartzo venular (QtzV) fumê e de opacos. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).





**Fotomicrografia 6:** Vênula de quartzo venular (QtzV) que corta a pseudobanda milimétrica de opacos. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).



**Fotomicrografia 7:** Aglomerados de quartzo venular (QtzV) dentro da pseudobanda milimétrica de opacos. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

**LÂMINA 2016-FD028-004**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 32%	Martita (Mar)	± 17%
Quartzo venular (QtzV)	± 15%	Hematita microlamelar (HemMI)	± 14%
		Hematita anédrica (HemA)	± 14%
		Hematita lamelar (HemL)	± 6%
		Kenomagnetita (Keno)	± 2%

**Escala de Wentworth**

Granulação muito fina: $\varnothing < 0,004$ mm
Granulação fina: $0,004 < \varnothing < 0,064$ mm
Granulação média: $0,064 < \varnothing < 2$ mm

**Nome da rocha:** Brecha itabirítica com microfalhas.

#### Descrição microscópica

Lâmina com bandas milimétricas alternada de quartzo recristalizado e opacos. Banda centimétrica (1 cm) de opacos na porção centro-oeste, e alta quantidade de aglomerados de quartzo venular na porção leste. Microfalhas em toda a lâmina. Porosidade baixa dos grãos, das bandas milimétricas e da banda centimétrica de opacos.

Bandas milimétricas de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; com grãos esparsos, e em aglomerados, de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina; e de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina (Fotomicrografia 1).

Bandas milimétricas de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina; e de martita euédrica a subédrica, bordas irregulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita (Fotomicrografia 2).

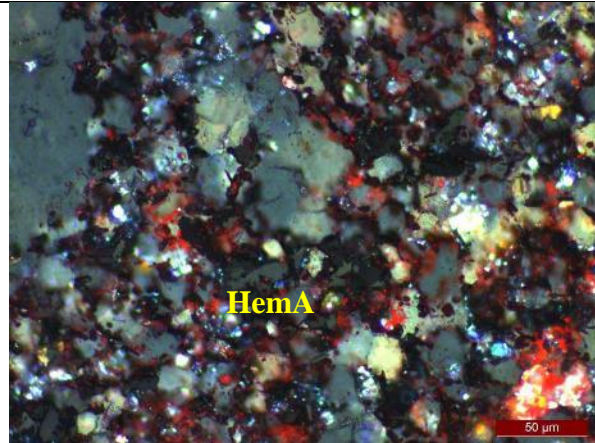
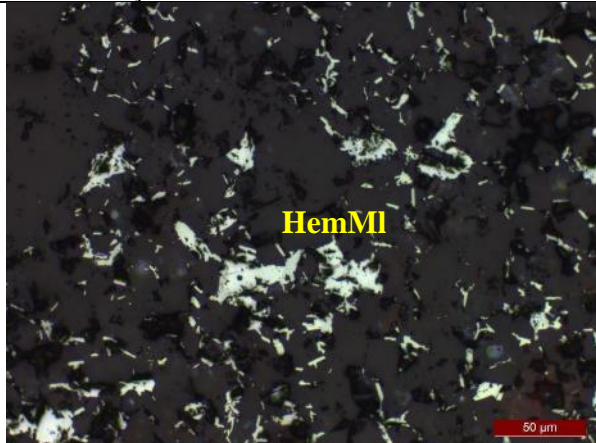
Banda centimétrica da porção centro-oeste de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de hematita lamelar e microlamelar euédricas tabulares, bordas regulares, de granulação fina e muito fina (Fotomicrografia 3). Presença de finos aglomerados e filetes de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média (Fotomicrografia 4).

Aglomerados de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina a média (Fotomicrografia 5), na porção leste.

Microfalhas que cortam e deslocam as bandas milimétricas de quartzo recristalizado e opacos e a banda centimétrica de opacos.

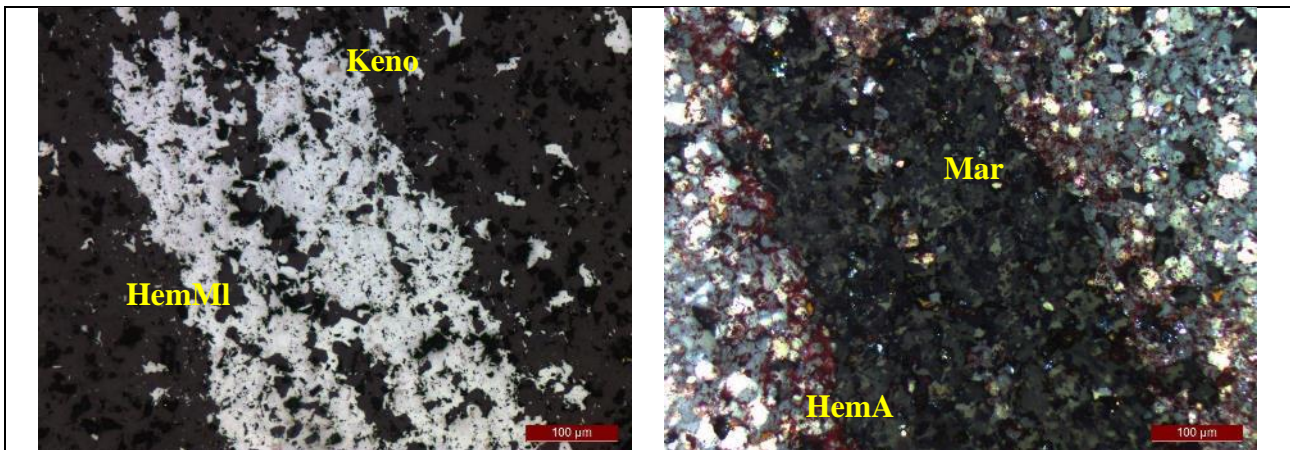
#### Observações:

- Banda centimétrica de opacos parece ser um veio;
- Microfalhas deslocam a maioria das bandas e podem ter servido de caminho para percolações e transformações posteriores como o surgimento de alta quantidade de aglomerados de quartzo venular na porção leste. Também cortam o possível veio de opacos, sendo posterior as demais microestruturas;
- Quartzo de granulação fina a média parece ser produto de reprecipitação se concentrando em possíveis veios, vênulas e aglomerados;
- Alta quantidade de hematita lamelar e microlamelar pode indicar alto metamorfismo;
- Hematita lamelar e microlamelar parecem se formar a partir de hematita anédrica e de martita;
- Martita parece dar origem a hematita anédrica de granulação muito fina e fina;
- Alta quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica deficiência em  $Fe^{+2}$  do sistema e baixo grau de oxidação da rocha.

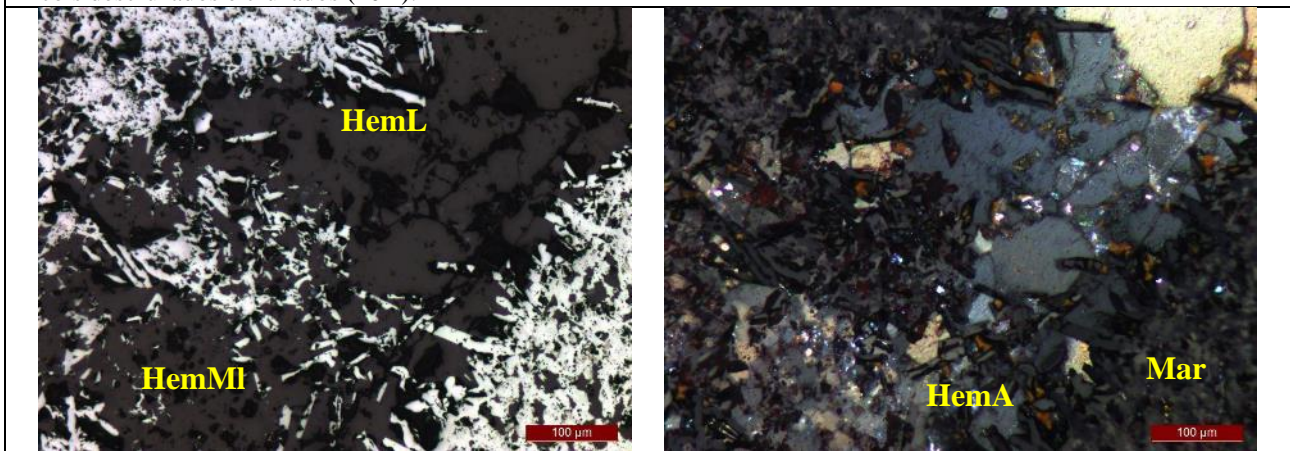


**Fotomicrografia 1:** Grãos esparsos, e em aglomerados, de hematita microlamelar (HemMI) e de hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados na banda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

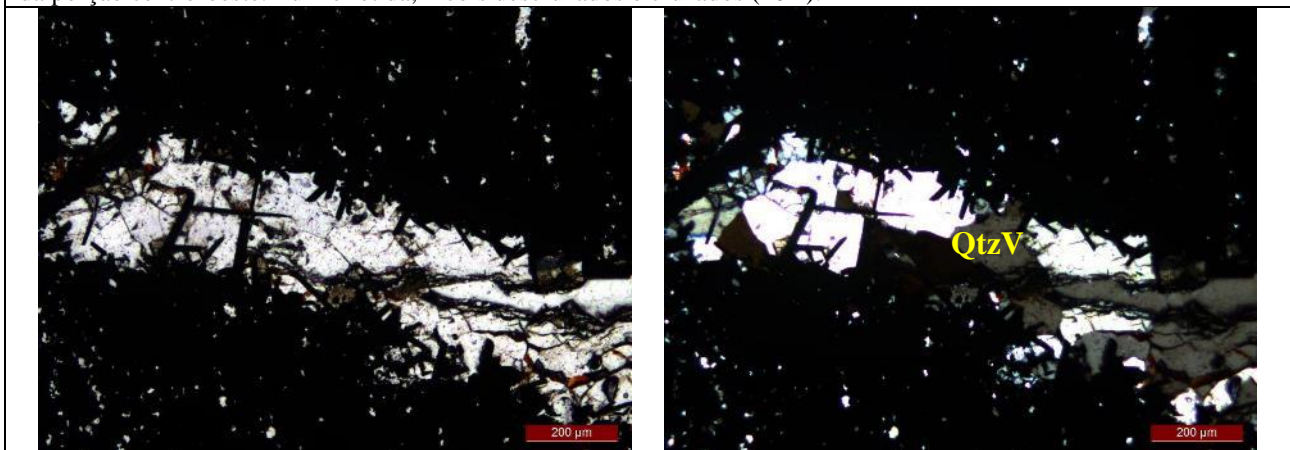




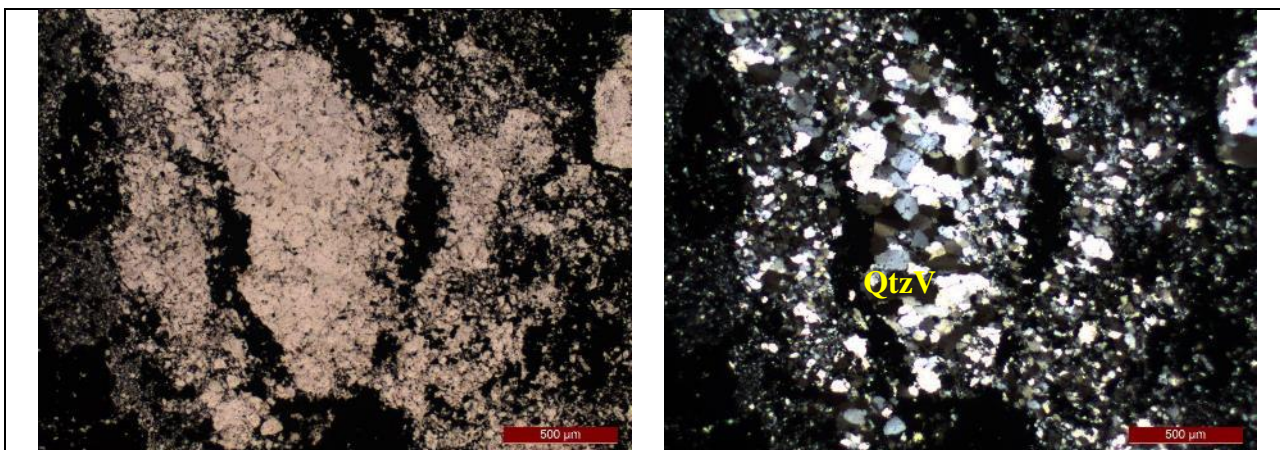
**Fotomicrografia 2:** Hematita anédrica (HemA) com contatos bordas irregulares e interlobados, martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica de opacos. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).



**Fotomicrografia 3:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (keno) e hematita lamelar (HemL) e microlamelar (HemMI) na banda centimétrica de opacos da porção centro-oeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).



**Fotomicrografia 4:** Aglomerado de quartzo venular (QtzV) na banda centimétrica de opacos da porção centro-oeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (5X).



**Fotomicrografia 5:** Aglomerado de quartzo venular (QtzV) na porção leste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

### LÂMINA 2016-FD028-007



#### Estimativa Mineralógica

Transparentes		Opacos	
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 30%	Martita (Mar)	± 30%
Quartzo venular (QtzV)	± 10%	Hematita microlamelar (HemMI)	± 15%
		Hematita anédrica (HemA)	± 10%
		Magnetita do itabirito (MagI)	± 2,5%
		Kenomagnetita (Keno)	± 2,5%

#### Escala de Wentworth

Granulação muito fina:  $\emptyset < 0,004$  mm

Granulação fina:  $0,004 < \emptyset < 0,064$  mm

Granulação média:  $0,064 < \emptyset < 2$  mm

**Nome da rocha:** Itabirito silicoso com vênulas.

#### Descrição microscópica

Porção leste da lâmina com bandas milimétricas alternadas e misturadas de quartzo recristalizado e opacos. Porção central composta por pseudobandas milimétricas alternadas e misturadas de quartzo recristalizado e opacos. Porção oeste sem estrutura definida composta por uma mistura de quartzo recristalizado e de opacos. Aglomerados de quartzo venular e vênulas em toda a lâmina. Porosidade moderada dos grãos, das bandas milimétricas e pseudobandas milimétricas de opacos.

Bandas milimétricas da porção leste de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina. Grãos esparsos de magnetita do itabirito, subédricos, bordas regulares, de granulação fina a média; de aglomerados euédricos e grãos esparsos de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; e de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina (Fotomicrografia 1).

Bandas milimétricas da porção leste de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 2).

Pseudobandas milimétricas, da porção central de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina. Grãos esparsos de magnetita do itabirito, subédricos, bordas regulares, de granulação fina a média; de aglomerados euédricos e grãos esparsos de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos



interlobados, de granulação muito fina a fina; de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 3).

Pseudobandas milimétricas da porção central de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 4).

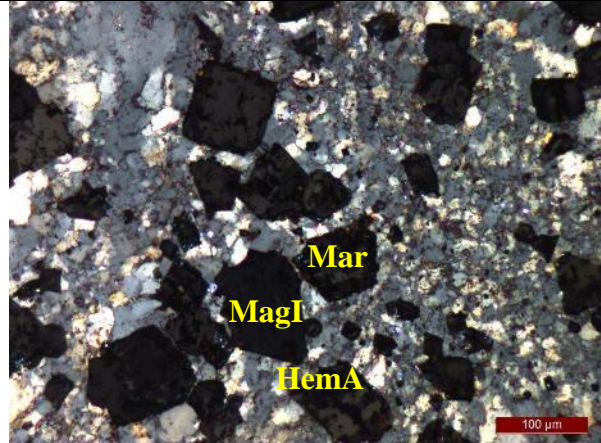
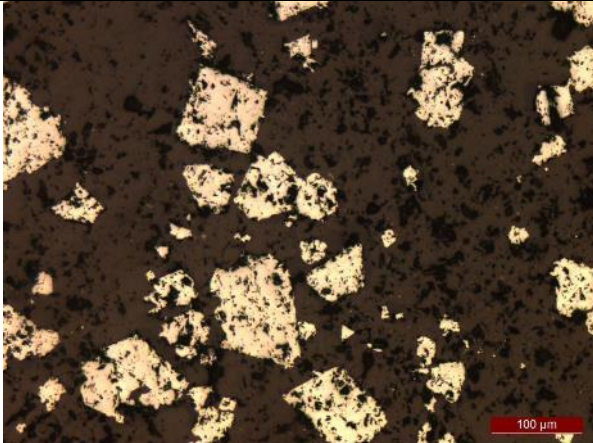
Região sem estrutura definida na porção oeste composta por uma mistura de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; e de grãos esparsos, em aglomerados e em filetes, de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 5).

Aglomerados de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina a média (Fotomicrografia 6).

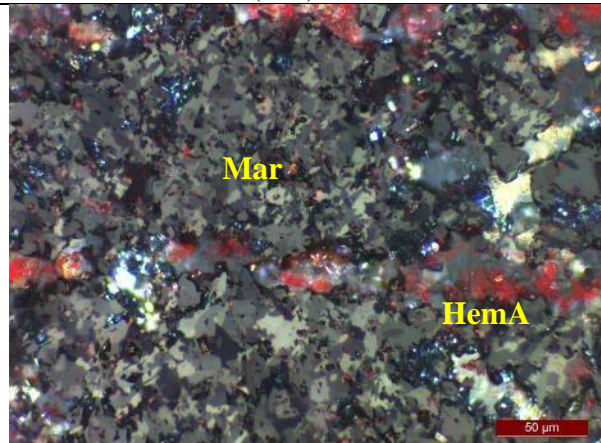
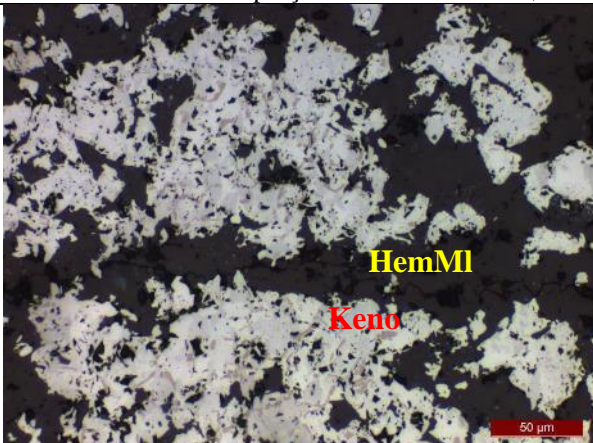
Vênula de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê e de granulação fina a média. Corta a lâmina de sudeste a noroeste (Fotomicrografia 7). Outras duas vênulas de quartzo venular, com as mesmas características da anterior, na porção leste e nordeste, paralelas à primeira.

#### Observações:

- Vênulas de quartzo parecem ter se formado no mesmo período, sendo posteriores as demais microestruturas;
- Magnetita do itabirito parece dar origem a martita e hematita anédrica, sendo que em um primeiro momento formam-se aglomerados euédricos dos mesmos que depois se espalham (Fotomicrografia 8);
- Hematita microlamelar parece se formar a partir de martita e de hematita anédrica (Fotomicrografia 9);
- Alta quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica deficiência em  $Fe^{+2}$  do sistema e baixo grau de oxidação da rocha.

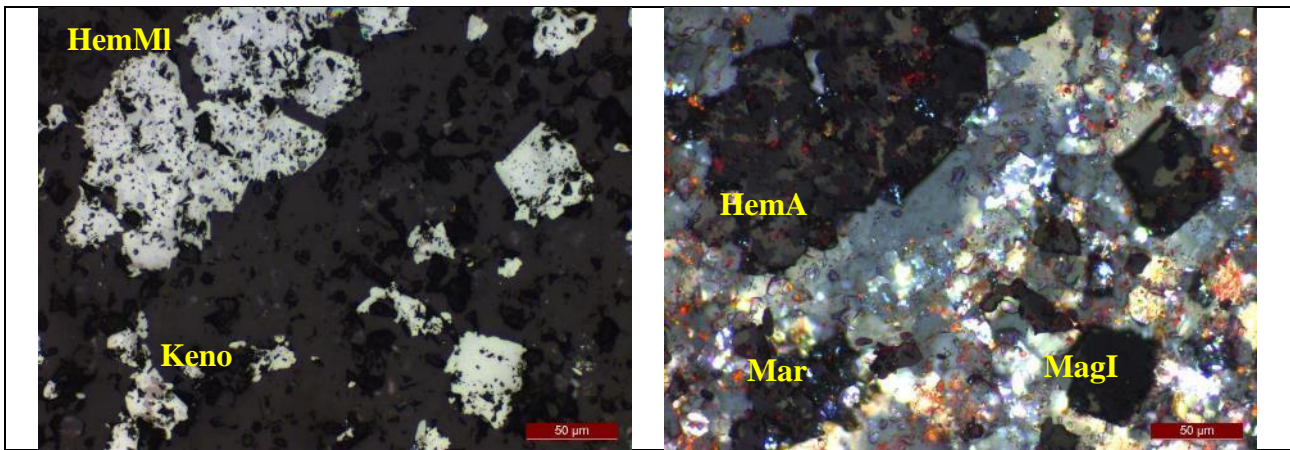


**Fotomicrografia 1:** Grãos esparsos de magnetita do itabirito (MagI), aglomerados euédricos e grãos esparsos de hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, e de martita (Mar) na banda milimétrica de quartzo recristalizado da porção leste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

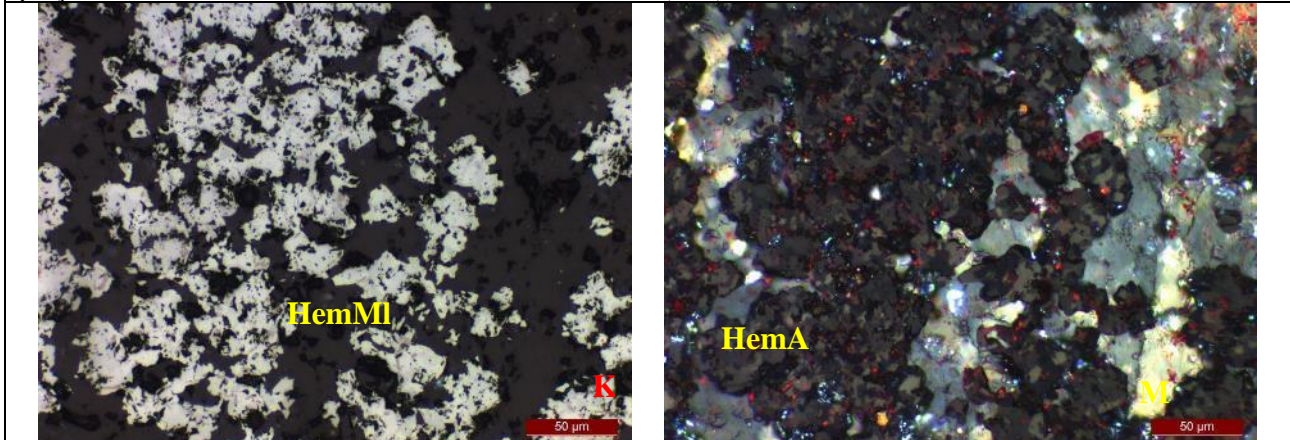


**Fotomicrografia 2:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica de opacos da porção leste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

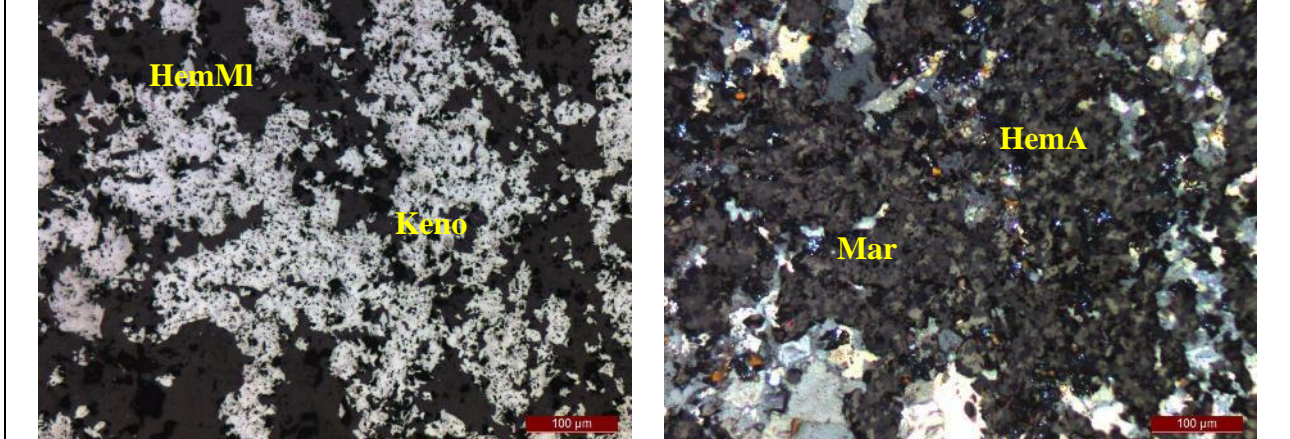




**Fotomicrografia 3:** Grãos esparsos de magnetita do itabirito (MagI), aglomerados euédricos e grãos esparsos de hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e de hematita microlamelar (HemMI) na pseudobanda milimétrica de quartzo recrystalizado da porção central. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

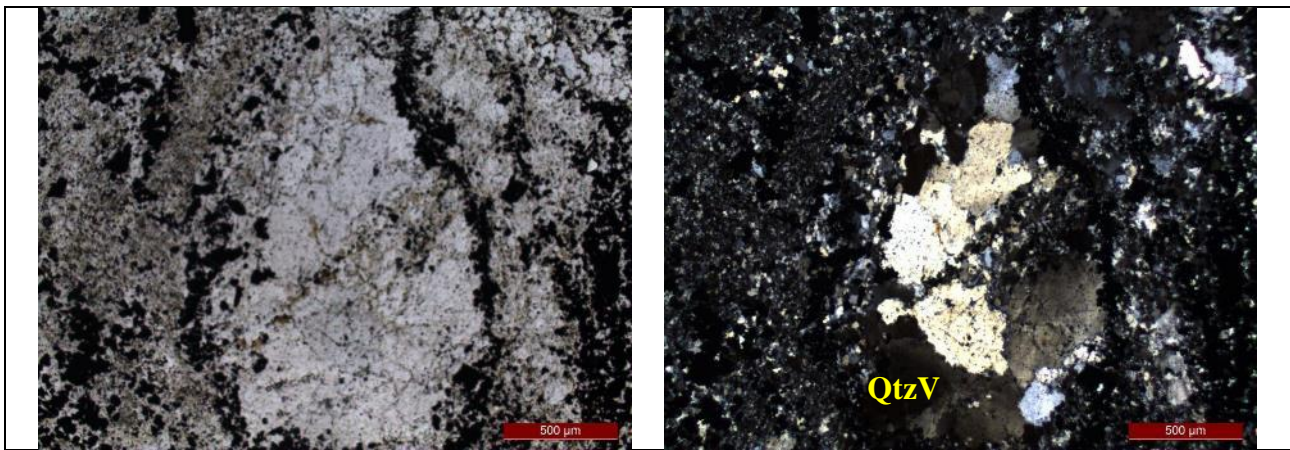


**Fotomicrografia 4:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e hematita microlamelar (HemMI) na pseudobanda milimétrica de opacos da porção central. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

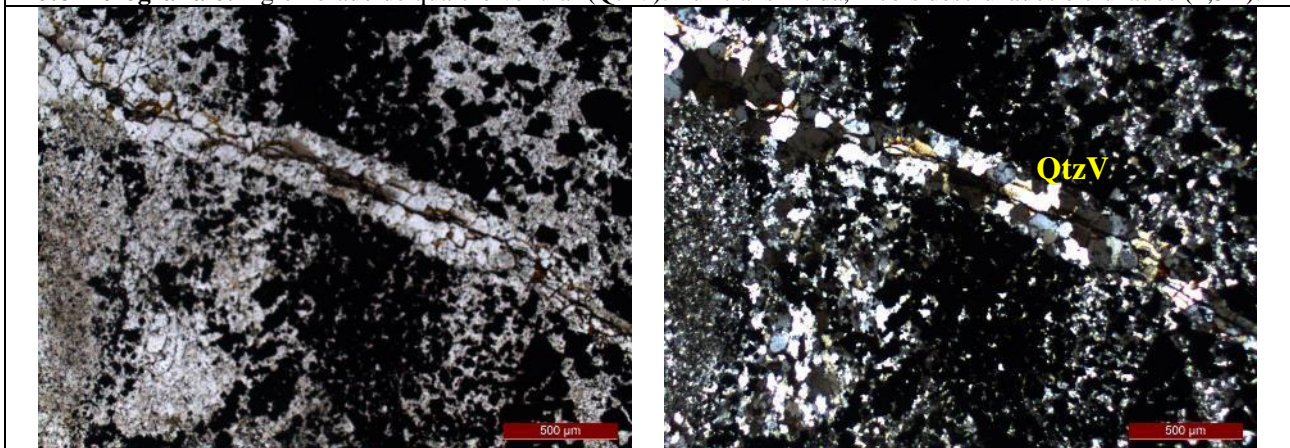


**Fotomicrografia 5:** Grãos esparsos, em aglomerados e filetes, de hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e de hematita microlamelar (HemMI) na região sem estrutura definida da porção oeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

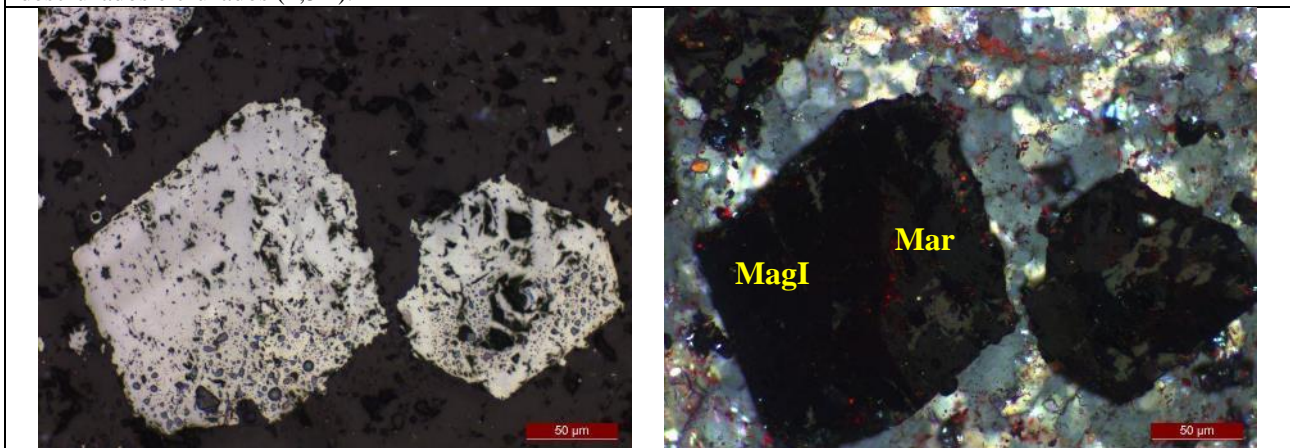




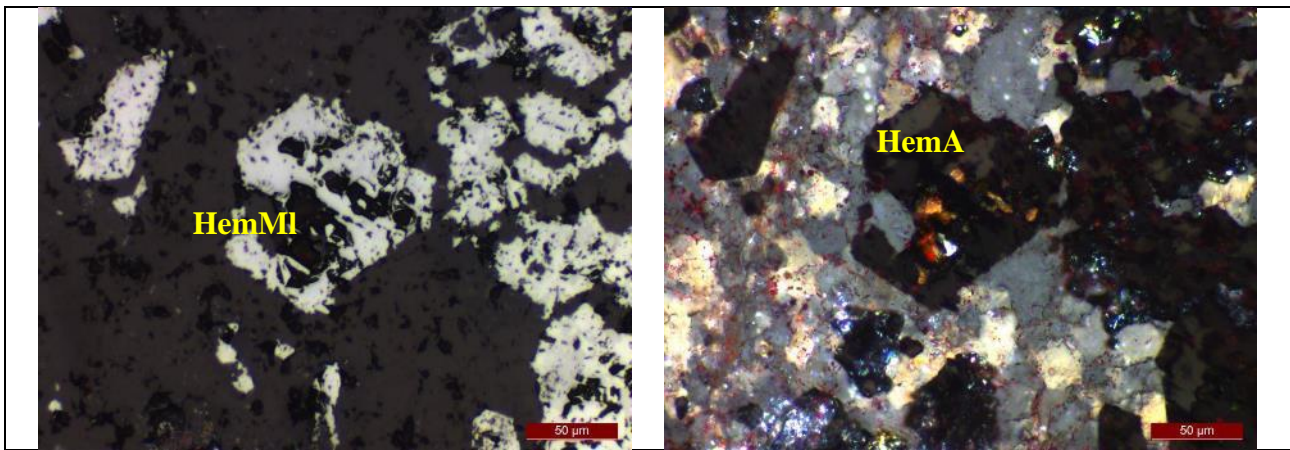
**Fotomicrografia 6:** Aglomerado de quartzo venular (QtzV). Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).



**Fotomicrografia 7:** Vênula de quartzo venular (QtzV) que corta a lâmina de sudeste a noroeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).



**Fotomicrografia 8:** Martita (Mar) se formando de magnetita do itabirito (MagI). Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



**Fotomicrografia 9:** Hematita microlamelar (HemMI) se formando de hematita anédrica (HemA). Luz refletida, nicóis des cruzados e cruzados (20X).

**LÂMINA 2016-FD029-001**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 43%	Martita (Mar)	± 34%
Muscovita (Ms)	± 0,5%	Hematita anédrica (HemA)	± 15%
		Hematita microlamelar (HemMI)	± 4%
		Kenomagnetita (Keno)	± 3,5%

**Escala de Wentworth**

- Granulação muito fina:  $\varnothing < 0,004$  mm
- Granulação fina:  $0,004 < \varnothing < 0,064$  mm
- Granulação média:  $0,064 < \varnothing < 2$  mm

**Nome da rocha:** Itabirito silicoso com vênula.

**Descrição microscópica**

Lâmina com bandas milimétricas alternadas de quartzo recristalizado e opacos. Vênulas de quartzo recristalizado. Porosidade moderados grãos e das bandas milimétricas de opacos.

Bandas milimétricas de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; com pouca quantidade de grãos esparsos de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina (Fotomicrografia 1); de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina (Fotomicrografia 1); e de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 2).

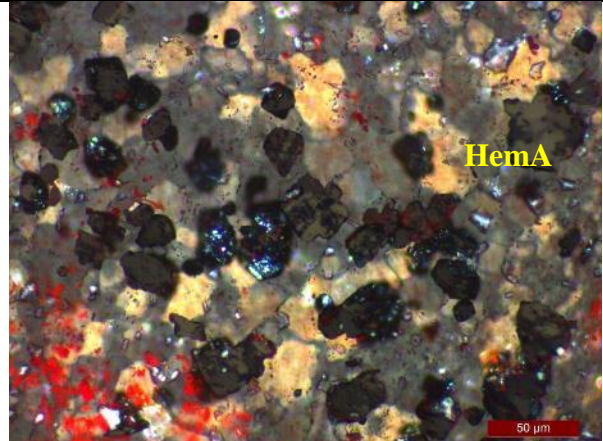
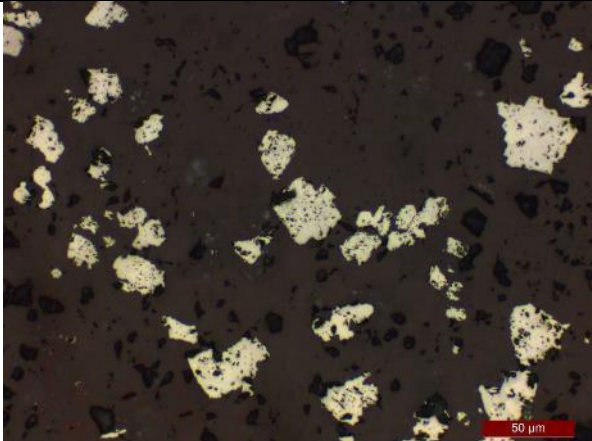
Bandas milimétricas de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina (Fotomicrografia 3); de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita (Fotomicrografia 3); e de pouca quantidade de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina.

Vênula de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; com pouca quantidade de muscovita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 4). Corta ambas as bandas milimétricas (Fotomicrografia 5).

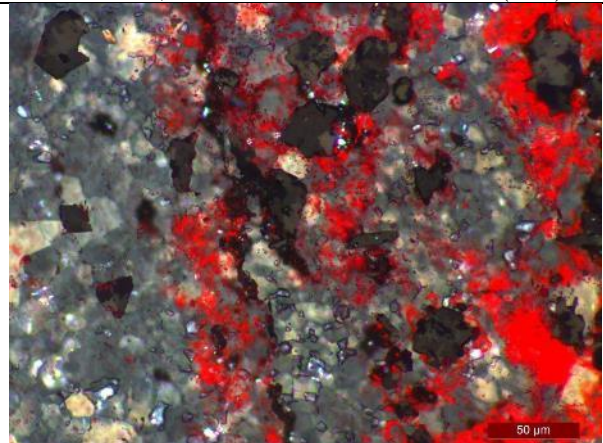
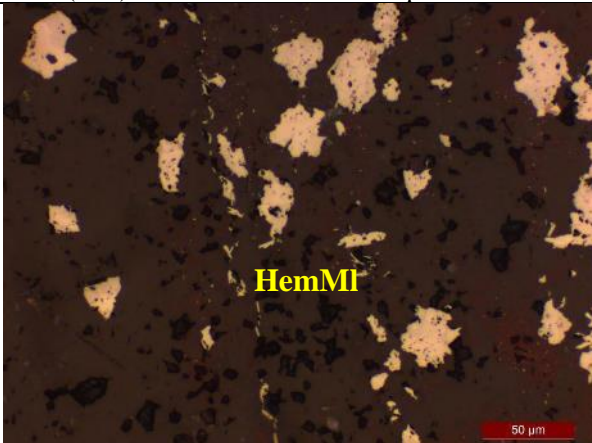


Observações:

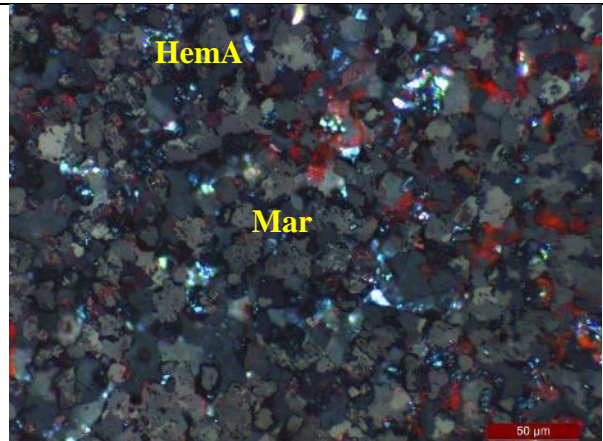
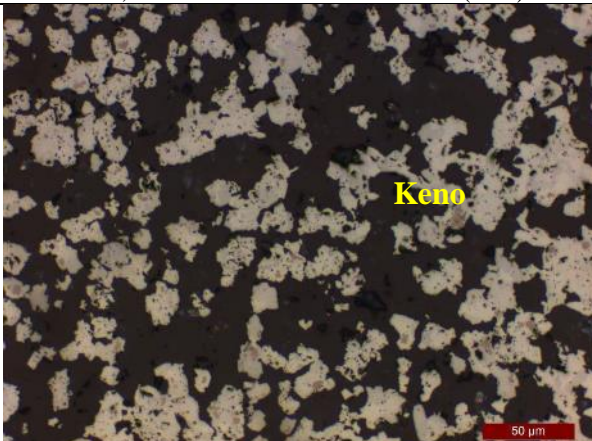
- Hematita microlamelar parece se formar a partir de hematita anédrica e de martita;
- Martita parece dar origem a hematita anédrica de granulação muito fina a fina;
- Alta quantidade de kenomagnetita com relicto no interior de martita indica deficiência em  $Fe^{+2}$  do sistema e baixo grau de oxidação da rocha.



**Fotomicrografia 1:** Grãos esparsos de hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, e de martita (Mar) na banda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

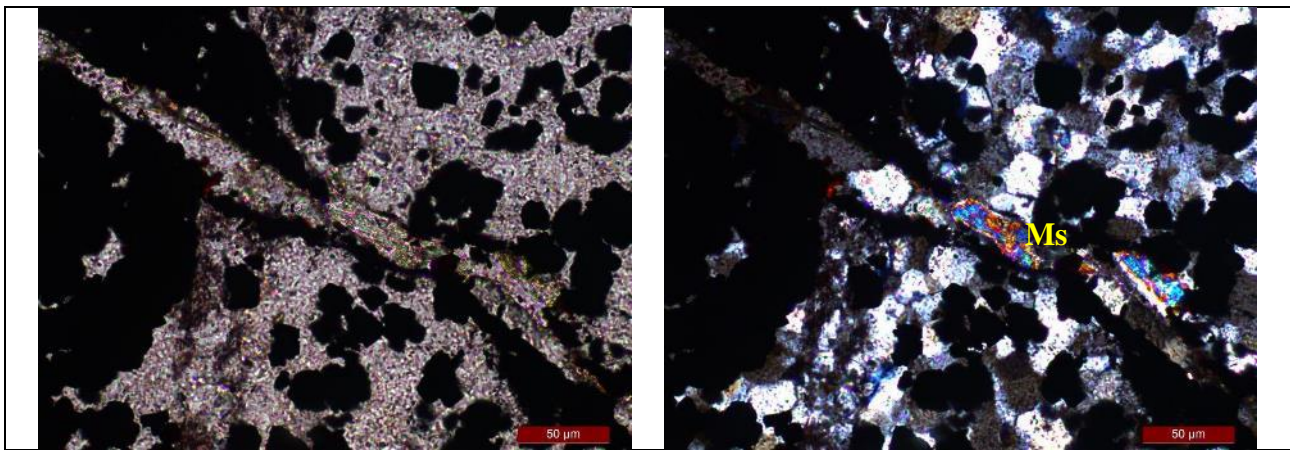


**Fotomicrografia 2:** Grãos esparsos de hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

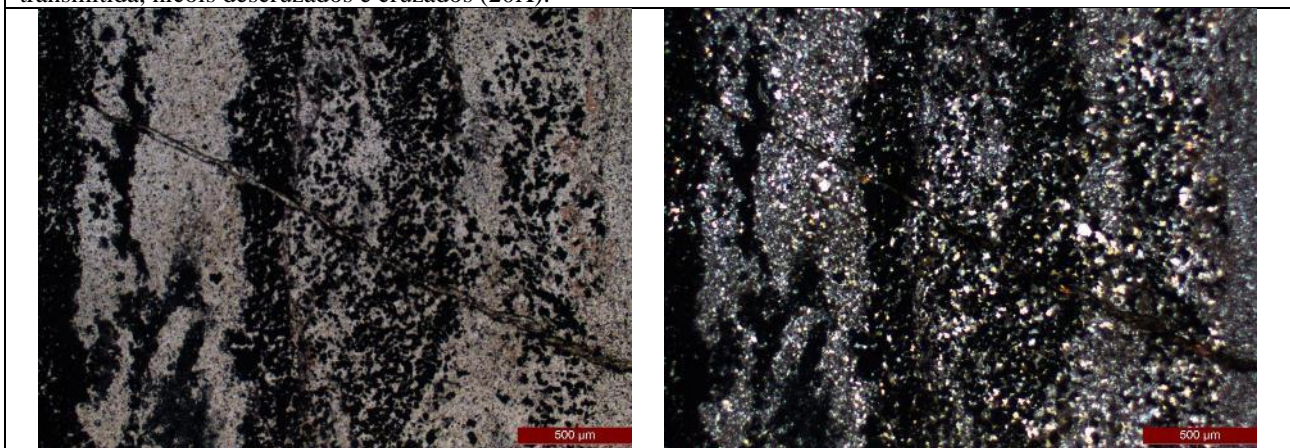


**Fotomicrografia 3:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, e martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) na banda milimétrica de opacos. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



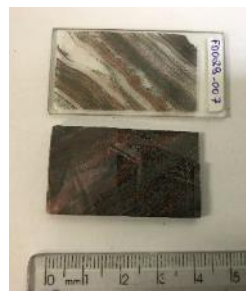


**Fotomicrografia 4:** Muscovita na vênula de quartzo recristalizado na banda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



**Fotomicrografia 5:** Vênula de quartzo recristalizado que corta as bandas milimétricas. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

**LÂMINA 2016-FD029-007**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 25%	Hematita anédrica (HemA)	± 26%
Quartzo venular (QtzV)	± 20%	Martita (Mar)	± 23%
Grunerita (Gru)	± 0,5%	Hematita microlamelar (HemMI)	± 4%
Clorita (Chl)	± 0,5%	Kenomagnetita (Keno)	± 1%

**Escala de Wentworth**

Granulação muito fina:  $\varnothing < 0,004$  mm

Granulação fina:  $0,004 < \varnothing < 0,064$  mm

Granulação média:  $0,064 < \varnothing < 2$  mm

**Nome da rocha:** Itabirito silicoso quartzo venulado com mineral verde.

**Descrição microscópica**



Lâmina com bandas milimétricas alternadas de quartzo recristalizado, de venular e opacos. Vênulas de quartzo venular. Porosidade moderada dos grãos e das bandas milimétricas de opacos.

Bandas milimétricas de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina.

Banda milimétrica da porção central de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média (Fotomicrografia 1).

Bandas milimétricas da porção oeste de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina, que grada para bandas de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média. Nestas bandas milimétricas encontra-se, em aglomerados, clorita subédrica a anédrica, bordas irregulares, de granulação fina (Fotomicrografia 2), e grãos esparsos, por vezes envoltos pela clorita, de grunerita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina (Fotomicrografia 3).

Em todas as bandas milimétricas de quartzo recristalizado e de venular há grãos esparsos, e em aglomerados, de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; e de pouca quantidade de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 4).

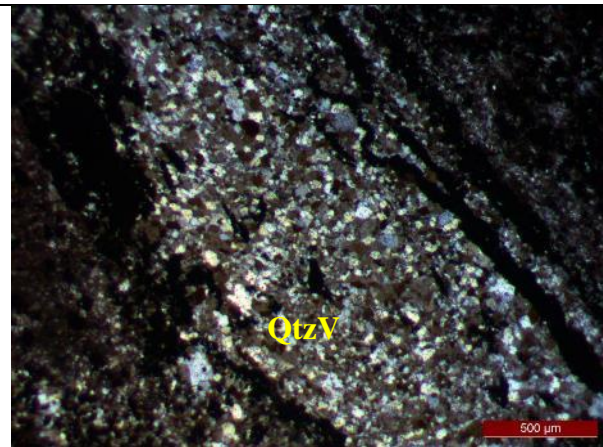
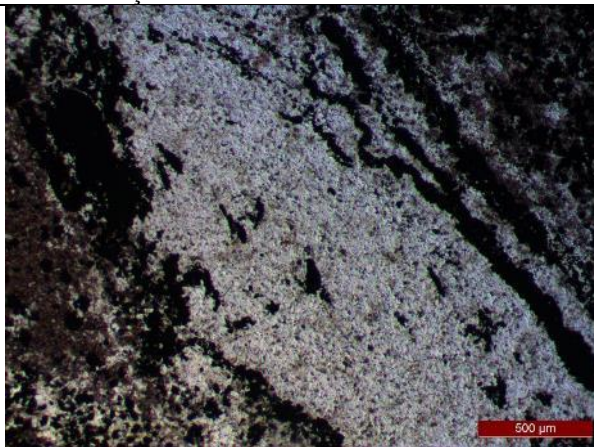
Bandas milimétricas de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de pouca quantidade de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 5).

Cristais de quartzo venular, esparsos e em aglomerados, euédricos a anédricos, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina a média.

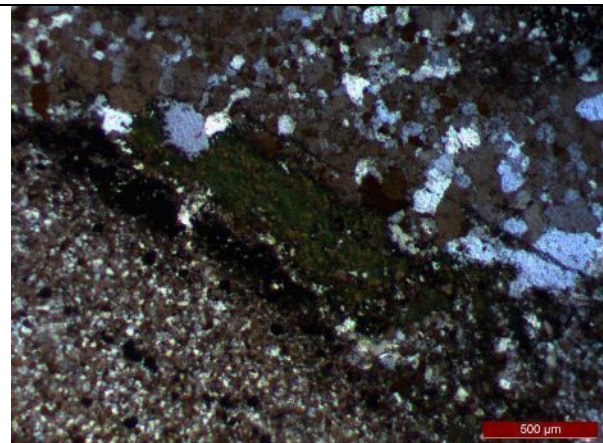
Vênulas de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê e de granulação média. Cortam as bandas milimétricas de opacos (Fotomicrografia 6) e se encontram inseridas nas bandas milimétricas de quartzo recristalizado.

#### Observações:

- Vênulas de quartzo venular que cortam as bandas milimétricas de opacos parecem provir de outros locais. Vênulas de quartzo venular dentro das bandas milimétricas do mesmo podem ser fruto de modificações posteriores;
- Na parte oeste há certa gradação de quartzo nas bandas milimétricas o que pode sugerir textura brechada, de veio ou recristalização. Clorita se encontra nestas bandas milimétricas e está passando por alteração;
- Hematita microlamelar parece se formar a partir de hematita anédrica e de martita;
- Martita parece dar origem a hematita anédrica de granulação muito fina e fina;
- Pouca quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica deficiência em  $Fe^{+2}$  do sistema e alto grau de oxidação da rocha.

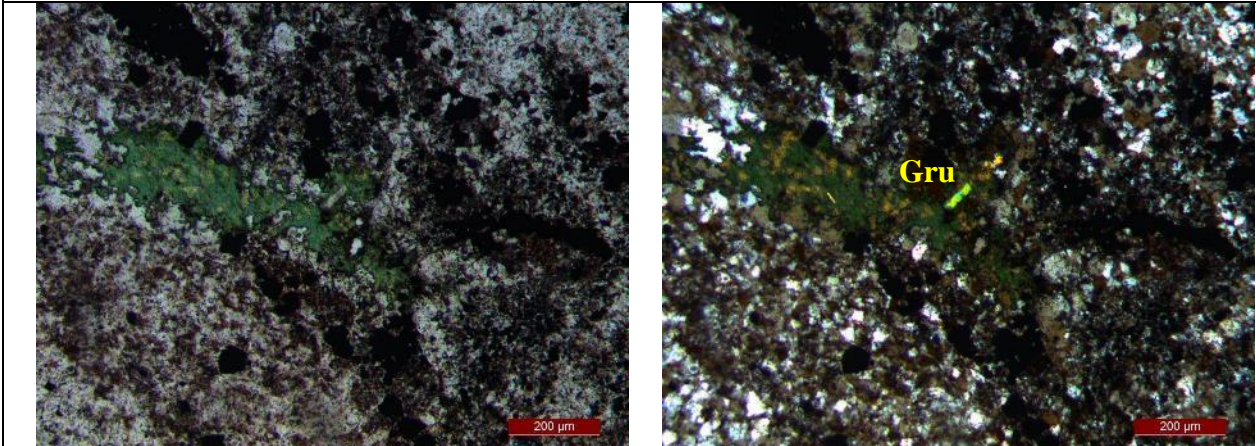


**Fotomicrografia 1:** Banda milimétrica de quartzo venular (QtzV) fumê com granulação média na porção central. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

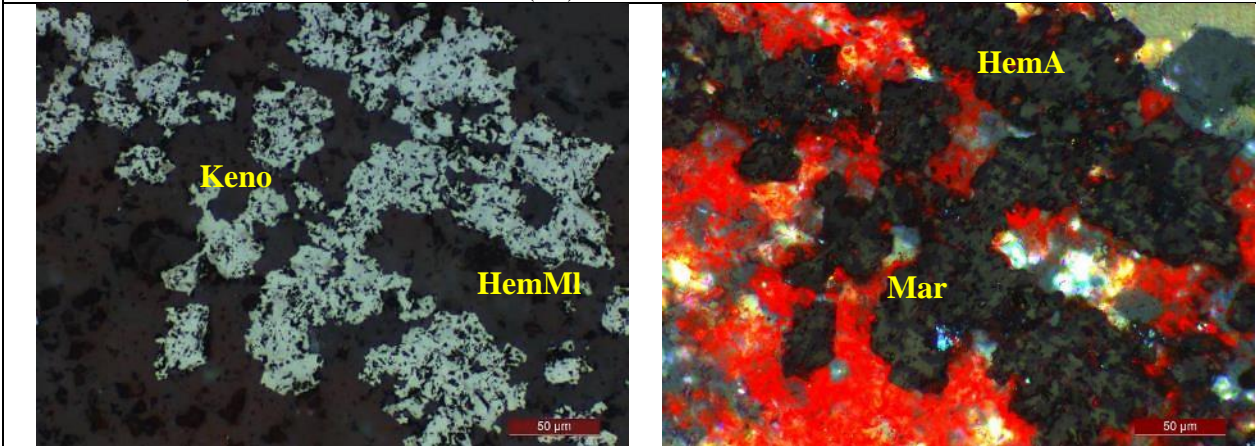




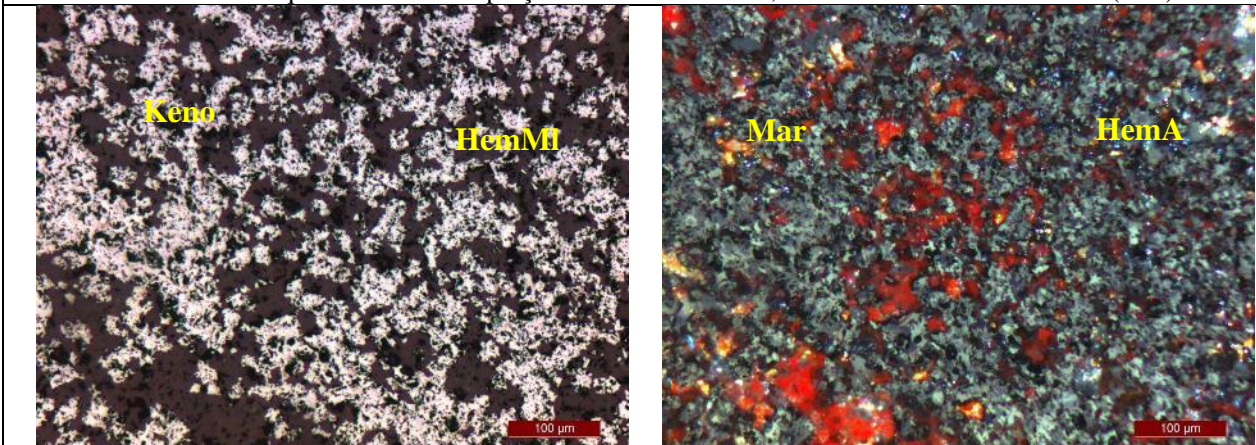
**Fotomicrografia 2:** Grãos em aglomerados de clorita (Chl) na banda milimétrica de quartzo venular da porção oeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).



**Fotomicrografia 3:** Grunerita (Gru) envolta por clorita (Chl) na banda milimétrica de quartzo venular da porção oeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (5X).

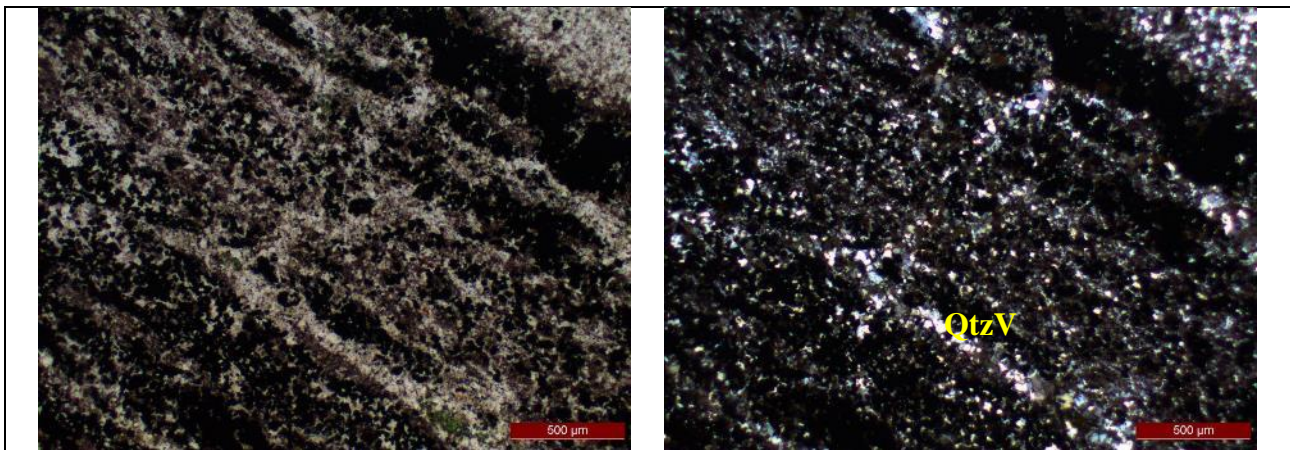


**Fotomicrografia 4:** Grãos esparsos, e em aglomerados, de hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), e de hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica de quartzo venular da porção oeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



**Fotomicrografia 5:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), e hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica de opacos. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).





**Fotomicrografia 6:** Vênulas de quartzo venular (QtzV) que cortam as bandas milimétricas de opacos. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

**LÂMINA 2016-FD029-009**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo venular (QtzV)	± 22%	Martita (Mar)	± 32%
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 13%	Hematita anédrica (HemA)	± 17%
		Kenomagnetita (Keno)	± 12%
		Hematita microlamelar (HemMI)	± 4%

**Escala de Wentworth**

- Granulação muito fina:  $\varnothing < 0,004$  mm
- Granulação fina:  $0,004 < \varnothing < 0,064$  mm
- Granulação média:  $0,064 < \varnothing < 2$  mm

**Nome da rocha:** Minério de ferro de alto teor quartzo venulado.

**Descrição microscópica**

Lâmina com bandas milimétricas alternadas da porção central e nordeste de quartzo venular e opacos. Banda centimétrica (1,5 cm) da porção sudoeste de opacos. Vênula de quartzo recristalizado. Aglomerados de quartzo na porção central e nordeste. Porosidade baixa dos grãos e das bandas milimétricas e centimétrica de opacos. Bandas milimétricas de quartzo venular euédrico a anédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina; com pouca quantidade de grãos esparsos, e em filetes, de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 1). Bandas milimétricas da porção central de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média (Fotomicrografia 2). Bandas milimétricas de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de pouca quantidade de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina; e de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 3). Banda centimétrica (1,5 cm) da porção sudoeste de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; e de pouca quantidade de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 4).

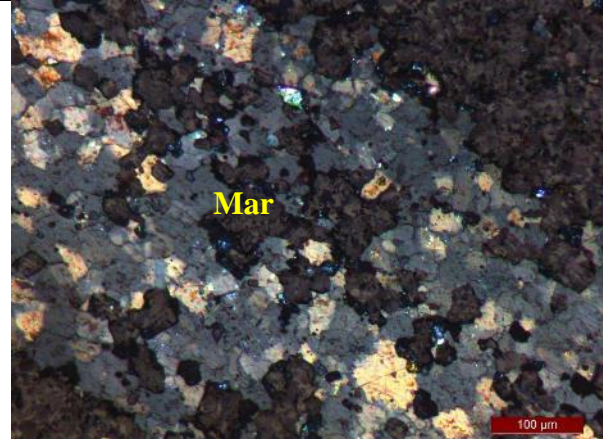
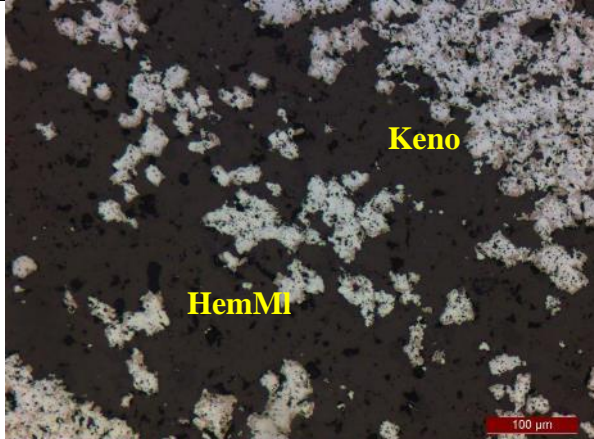


Vênula de quartzo recristalizado euédrico a anédrico, bordas irregulares, fumê e de granulação muito fina. Corta a banda centimétrica de opacos da porção sudoeste.

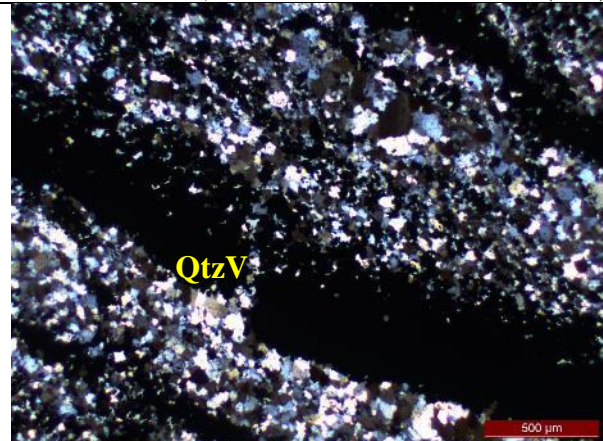
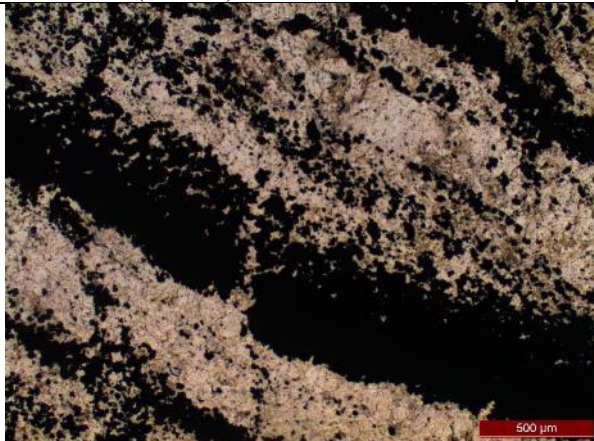
Aglomerados da porção central e nordeste de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média (Fotomicrografia 5).

Observações:

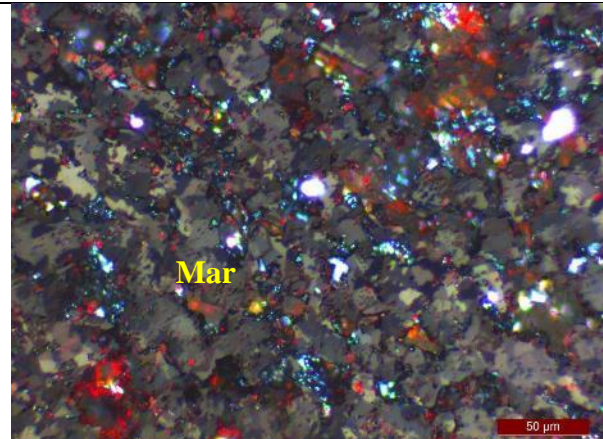
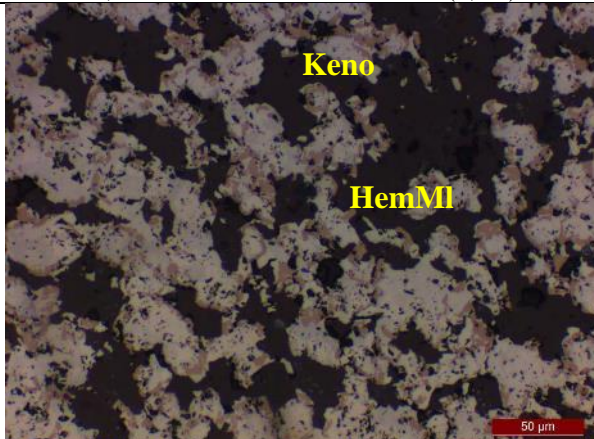
- Pouca quantidade de quartzo recristalizado de granulação muito fina pode indicar alto grau de alteração da rocha;
- Banda milimétrica de quartzo venular de granulação média encontrada na porção central e concordante com as demais pode ser uma vênula;
- Hematita microlamelar parece se formar a partir de martita;
- Alta quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica deficiência em  $Fe^{+2}$  do sistema e baixo grau de oxidação da rocha.



**Fotomicrografia 1:** Grãos esparsos, e em filetes, de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), e de hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica de quartzo venular. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

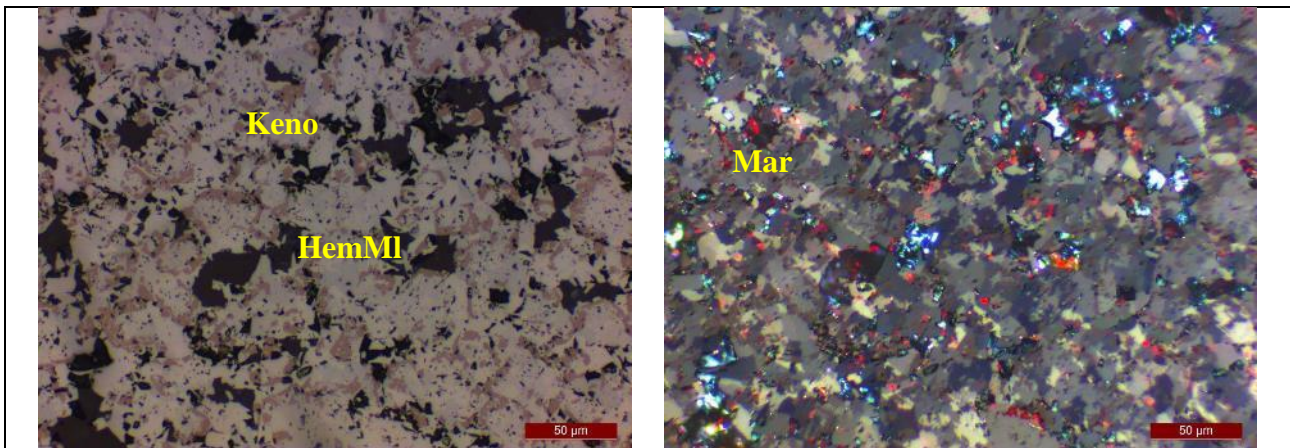


**Fotomicrografia 2:** Banda milimétrica na porção central de quartzo venular (QtzV) de granulação média. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

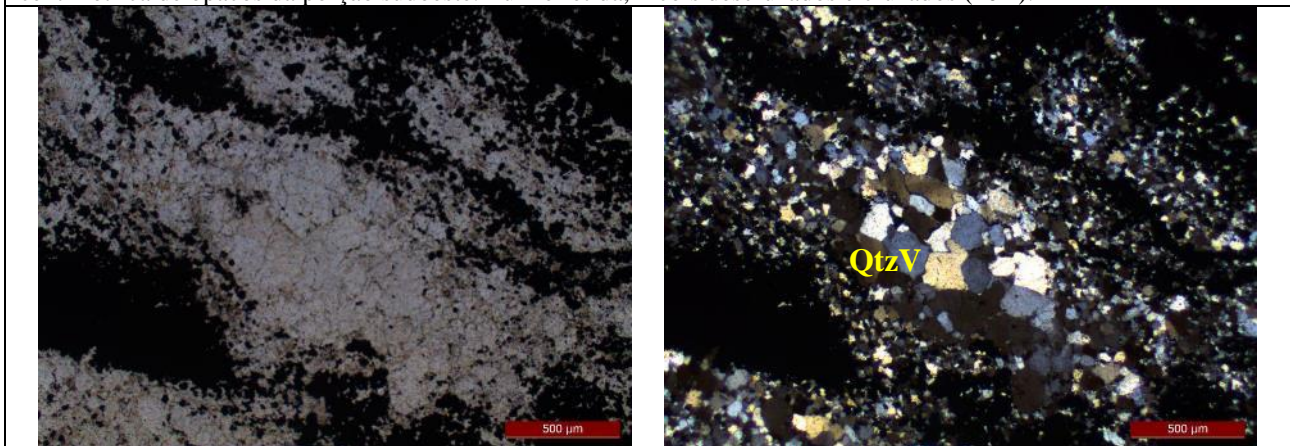


**Fotomicrografia 3:** Martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica de opacos. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



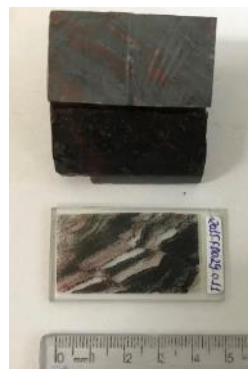


**Fotomicrografia 4:** Martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e hematita microlamelar (HemMI) na banda centimétrica de opacos da porção sudoeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



**Fotomicrografia 5:** Aglomerado de quartzo venular (QtzV) na porção central. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

**LÂMINA 2016-FD029-011**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 25%	Hematita anédrica (HemA)	± 24%
Quartzo venular (QtzV)	± 15,5%	Martita (Mar)	± 24%
Muscovita (Ms)	± 0,5%	Hematita microlamelar (HemMI)	± 10%
		Kenomagnetita (Keno)	± 2%

**Escala de Wentworth**

Granulação muito fina: $\varnothing < 0,004$ mm
Granulação fina: $0,004 < \varnothing < 0,064$ mm
Granulação média: $0,064 < \varnothing < 2$ mm
<b>Nome da rocha:</b> Brecha itabirítica com microfalhas.

### Descrição microscópica

Lâmina com pseudobandas milimétricas alternadas na porção central de quartzo recristalizado, de venular e opacos. Porção noroeste e sudeste sem estrutura definida composta por mistura de quartzo recristalizado e opacos. Microfalhas em todas as porções da lâmina. Porosidade moderada dos grãos e das pseudobandas milimétricas de opacos.

Pseudobandas milimétricas da porção central de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina. Aglomerados e grãos esparsos de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; de pouca quantidade de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; e de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 1).

Pseudobanda milimétrica da porção central de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina a média (Fotomicrografia 2)

Pseudobandas milimétricas da porção central com alta quantidade de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; de pouca quantidade de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; e de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 3).

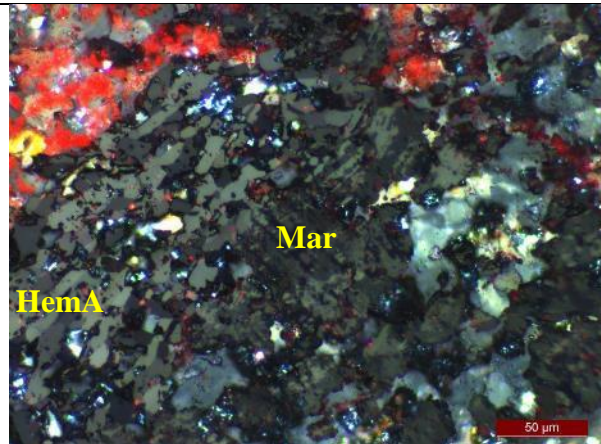
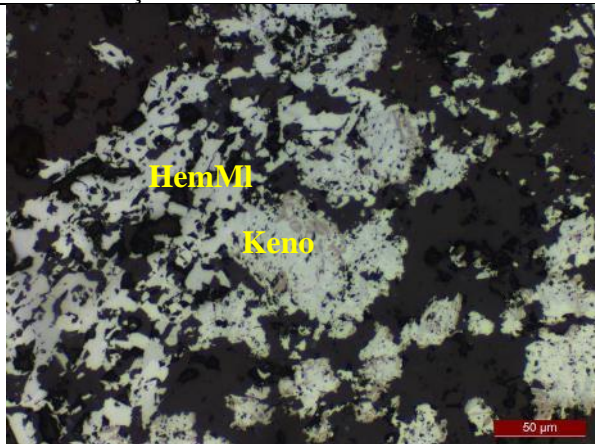
Porção sudeste sem estrutura definida composta por mistura de pouca quantidade de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; de alguns grãos de muscovita, euédricos a anédricos, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 4); de alta quantidade de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de pouca quantidade de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 5).

Porção noroeste sem estrutura definida composta por mistura de quartzo recristalizado, anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; e de pouca quantidade de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 6).

Microfalhas que cortam e deslocam as pseudobandas milimétricas e as regiões sem estrutura definida.

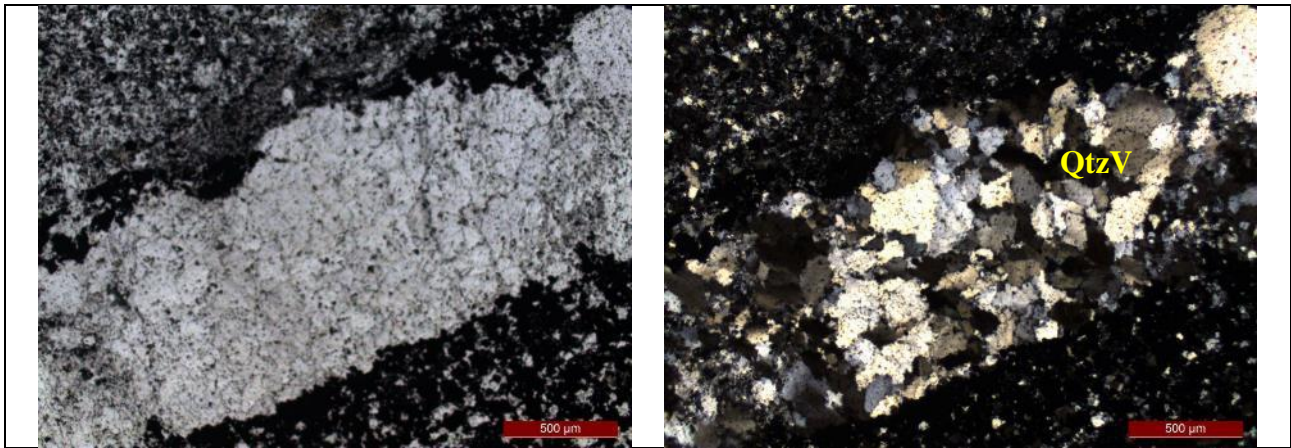
#### Observações:

- Regiões sem estrutura definida pode indicar alto grau de alteração da rocha;
- Microfalhas cortam e deslocam todas as porções, sendo posteriores e podendo abrir caminho para mistura de grãos e percolações;
- Hematita microlamelar parece se formar a partir de hematita anédrica e de martita;
- Martita parece dar origem a hematita anédrica de granulação muito fina e fina;
- Pouca quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica deficiência em  $Fe^{+2}$  do sistema e alto grau de oxidação da rocha.

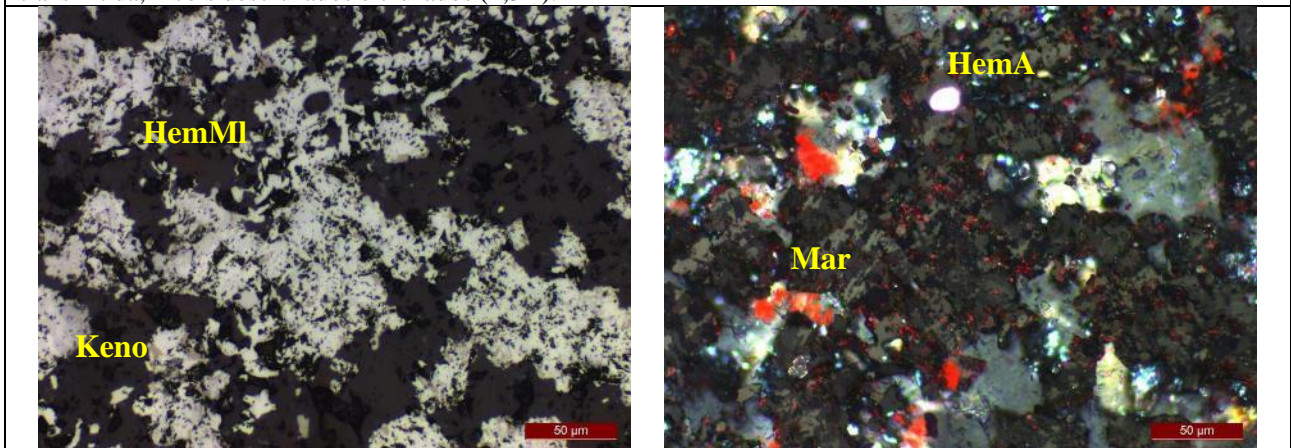


**Fotomicrografia 1:** Grãos esparsos, e em aglomerados, de hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e de hematita microlamelar (HemMI) na pseudobanda milimétrica de quartzo recristalizado da porção central. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

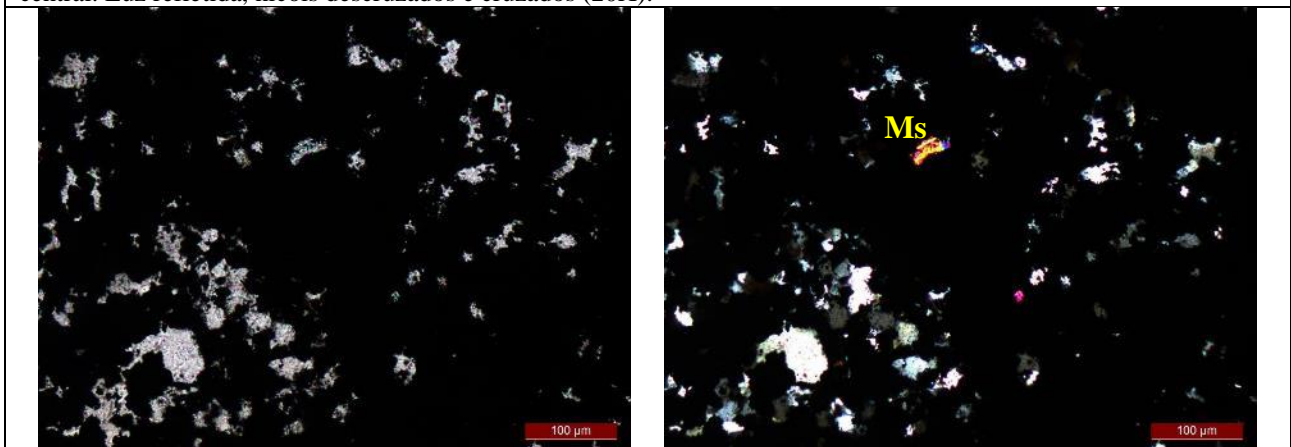




**Fotomicrografia 2:** Pseudobanda de quartzo venular (QtzV) fumê de alta granulação na porção central. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

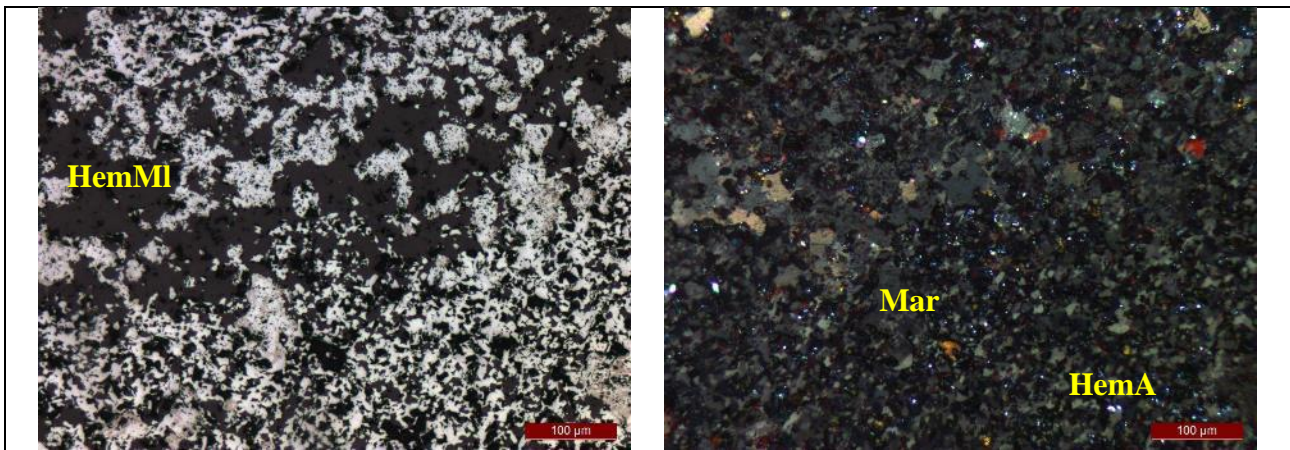


**Fotomicrografia 3:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e hematita microlamelar (HemMI) na pseudobanda milimétrica de opacos da porção central. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

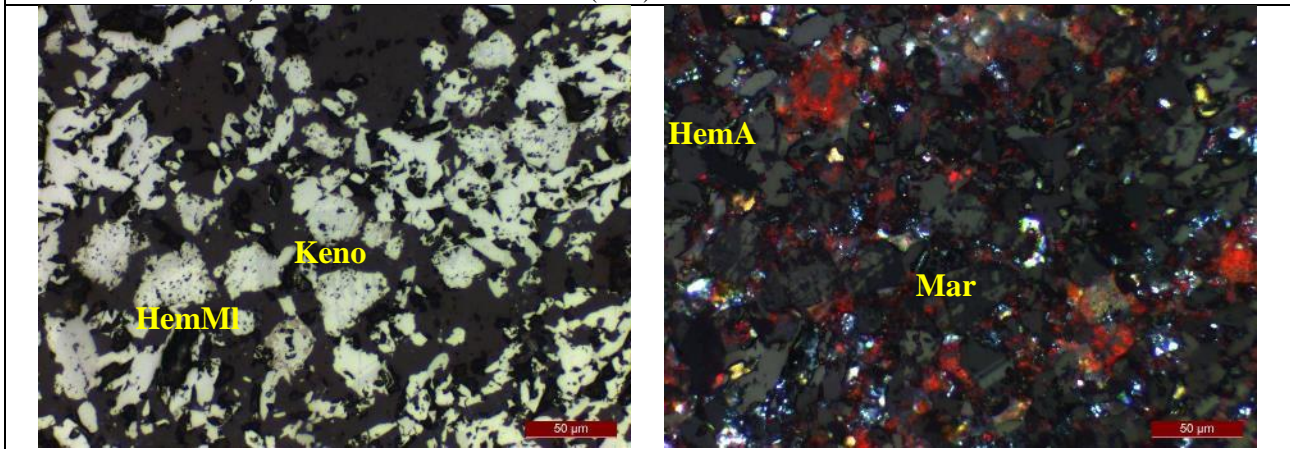


**Fotomicrografia 4:** Muscovita na região sem estrutura definida da porção sudeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (10X).





**Fotomicrografia 5:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), e hematita microlamelar (HemMI) na região sem estrutura definida da porção sudeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).



**Fotomicrografia 6:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e hematita microlamelar (HemMI) na região sem estrutura definida da porção noroeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

**LÂMINA 2017-FD048-001**



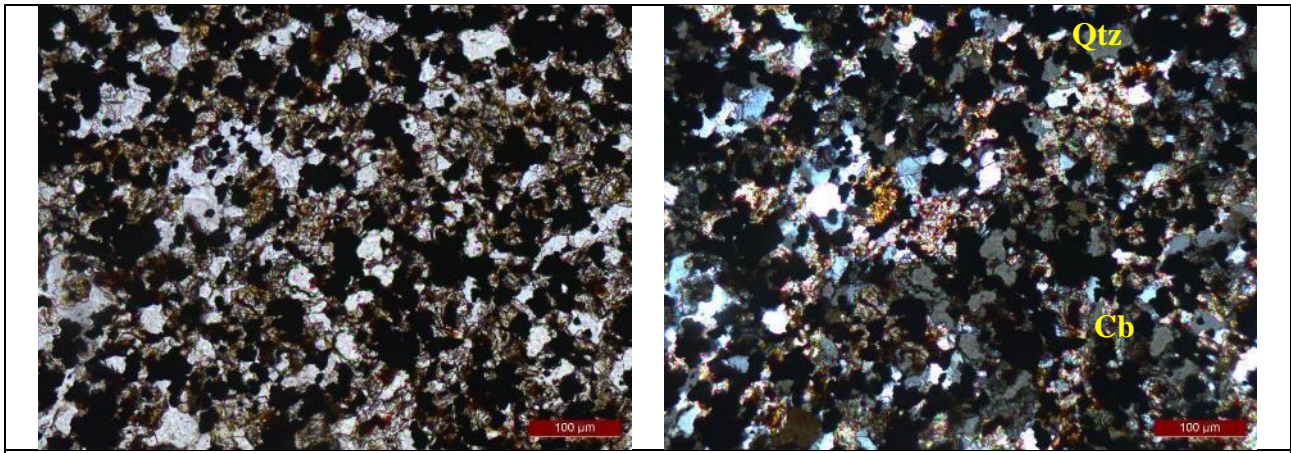
**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 30%	Magnetita hidrotermal (MagII)	± 13%
Carbonato granulação fina (Cb)	± 20%	Martita (Mar)	± 9,5%
Grunerita (Gru)	± 7%	Hematita anédrica (HemA)	± 9%
Muscovita (Ms)	± 0,5%	Kenomagnetita (Keno)	± 6%
		Hematita lamelar (HemL)	± 5%

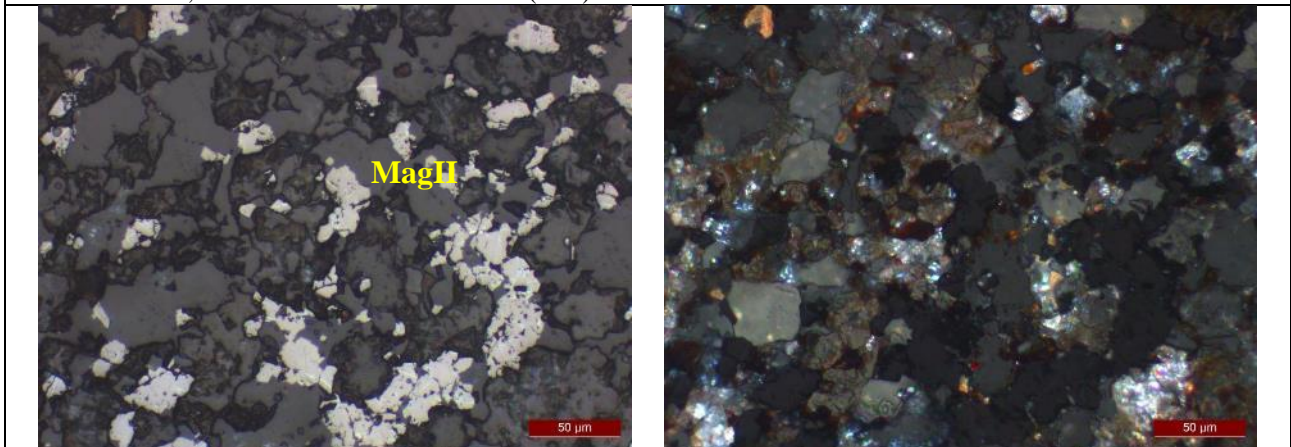
**Escala de Wentworth**



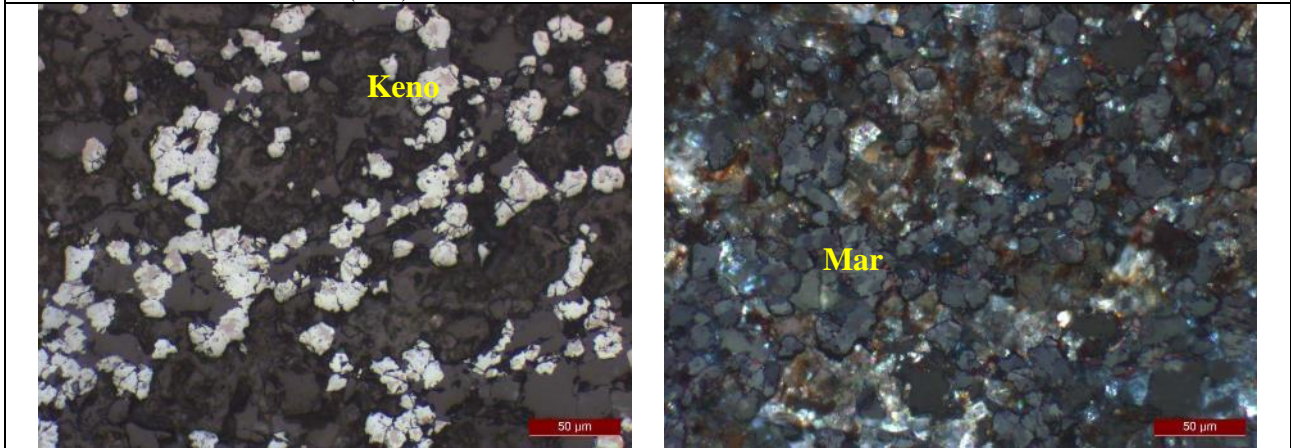
Granulação muito fina: $\varnothing < 0,004$ mm
Granulação fina: $0,004 < \varnothing < 0,064$ mm
Granulação média: $0,064 < \varnothing < 2$ mm
<b>Nome da rocha:</b> Brecha com sulfetos com microdobras e vênulas.
<b>Descrição microscópica</b>
<p>Lâmina sem estrutura definida composta por mistura de quartzo recristalizado, carbonato de granulação fina, anfíbólio e opacos. Porção noroeste e sudeste com pseudobandas milimétricas alternadas e microdobradas de quartzo recristalizado, carbonato de granulação fina, anfíbólio e opacos. Vênulas de quartzo recristalizado e de carbonato de granulação fina na porção noroeste e sudeste. Porosidade baixa a moderada dos grãos e das pseudobandas milimétricas de opacos.</p> <p>Lâmina sem estrutura definida composta por mistura de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; de carbonato de granulação fina anédrico, bordas irregulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 1); de grãos esparsos, em aglomerados e em filetes, de magnetita hidrotermal, subédricos a anédricos, bordas regulares, de granulação muito fina a média (Fotomicrografia 2); de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita (Fotomicrografia 3); e de pouca quantidade de grãos esparsos de grunerita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação muito fina.</p> <p>Pseudobandas milimétricas da porção noroeste de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina; com grãos esparsos de magnetita hidrotermal, subédricos a anédricos, bordas regulares, de granulação fina; e de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina (Fotomicrografia 4).</p> <p>Pseudobanda milimétrica microdobrada da porção sudeste de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; com grãos esparsos de grunerita, euédricos, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 5). Grada, para esquerda, para outra pseudobanda milimétrica microdobrada de quartzo recristalizado anédrico bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina e com certa orientação; com alta quantidade de grunerita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação muito fina a fina e com certa orientação (Fotomicrografia 6); com grãos esparsos de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; e de martita, euédricos, bordas regulares, de granulação muito fina a fina e com relictos de kenomagnetita (Fotomicrografia 7).</p> <p>Pseudobandas milimétricas microdobradas da porção noroeste e sudeste de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de magnetita hidrotermal subédrica a anédrica, bordas regulares, de granulação muito fina a fina; de hematita lamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação fina; de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagentita (Fotomicrografia 8, 9 e 10)</p> <p>Vênulas da porção noroeste e sudeste de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina; de carbonato de granulação fina anédrico, bordas irregulares, de granulação muito fina; de grãos esparsos de muscovita, euédricos, bordas regulares, de granulação muito fina; e de grãos esparsos de grunerita, euédricos a subédricos, bordas regulares e de granulação muito fina. Cortam as pseudobandas milimétricas e a região sem estrutura definida (Fotomicrografia 11).</p> <p><u>Observações:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Alta quantidade de carbonato de granulação fina pode indicar baixo grau de alteração da rocha ou hidrotermalismo incipiente;</li> <li>- Lâmina sem estrutura definida pode indicar alto grau de alteração da rocha;</li> <li>- Grãos orientados na porção sudeste da lâmina indicam maior deformação, assim como microdobras;</li> <li>- Grunerita com quartzo recristalizado na pseudobanda milimétrica indica metamorfismo;</li> <li>- Magnetita hidrotermal subédrica a anédrico e com granulação muito fina a fina pode estar relacionada com a rocha original;</li> <li>- Vênulas posteriores aos demais eventos porque cortam as microestruturas existentes;</li> <li>- Magnetita possui coloração roseada o que pode indicar deficiente em <math>Fe^{+2}</math>;</li> <li>- Hematita anédrica e martita parecem se formar a partir de magnetita hidrotermal;</li> <li>- Hematita lamelar parece se formar a partir de hematita anédrica e de martita;</li> <li>- Alta quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica deficiência em <math>Fe^{+2}</math> do sistema e baixo grau de oxidação da rocha.</li> </ul>



**Fotomicrografia 1:** Carbonato de granulação fina (Cb) e quartzo recristalizado (Qtz) na região sem estrutura definida. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

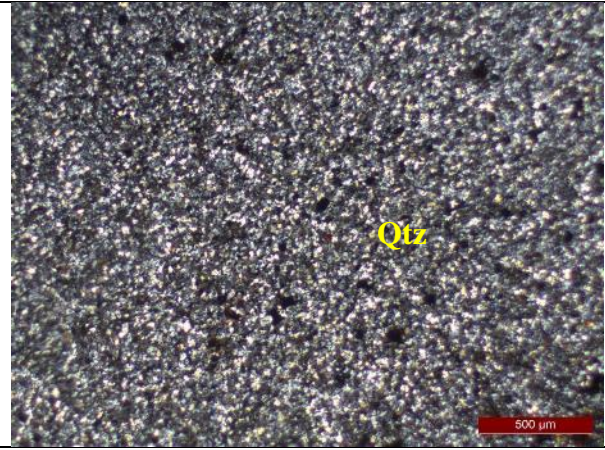
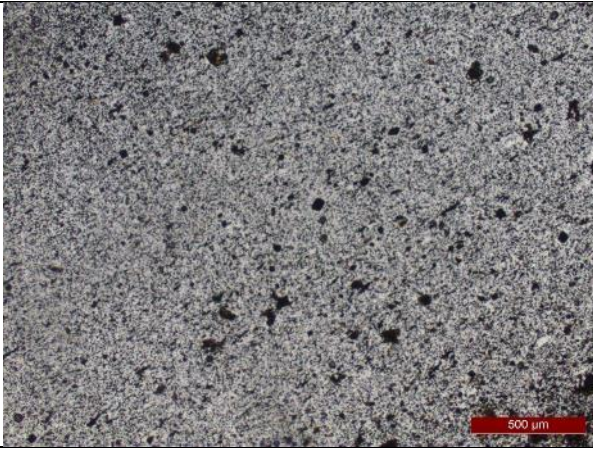


**Fotomicrografia 2:** Grãos esparsos de magnetita hidrotermal (MagII) na região sem estrutura definida. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

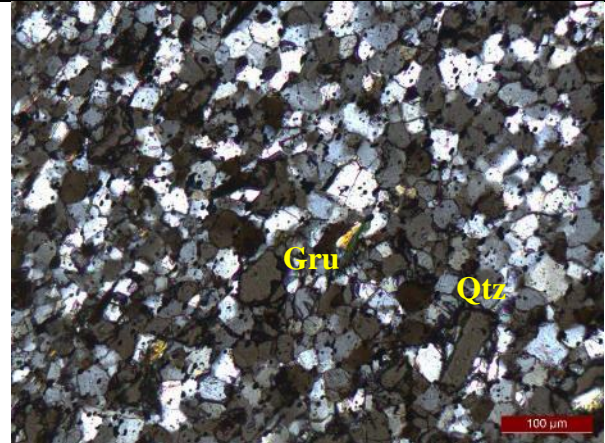
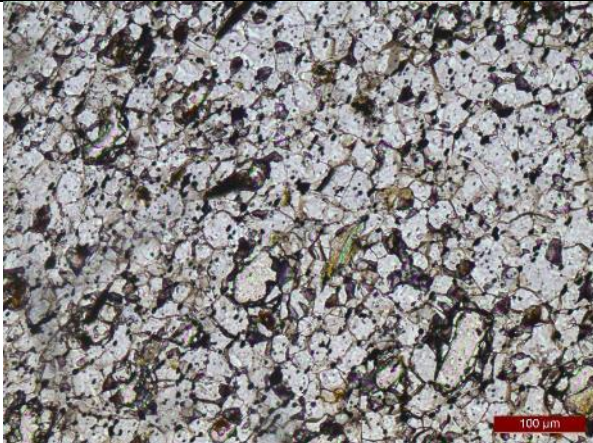


**Fotomicrografia 3:** Grãos esparsos de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) na região sem estrutura definida. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

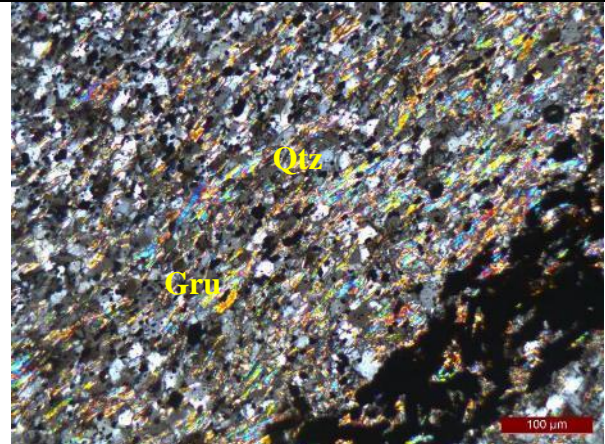
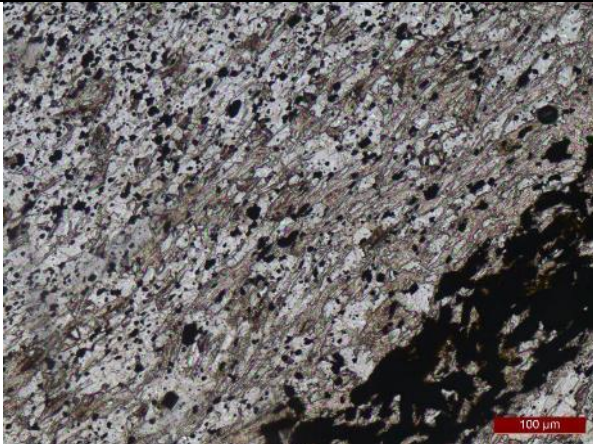




**Fotomicrografia 4:** Quartzo recristalizado (Qtz) na pseudobanda milimétrica da porção noroeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

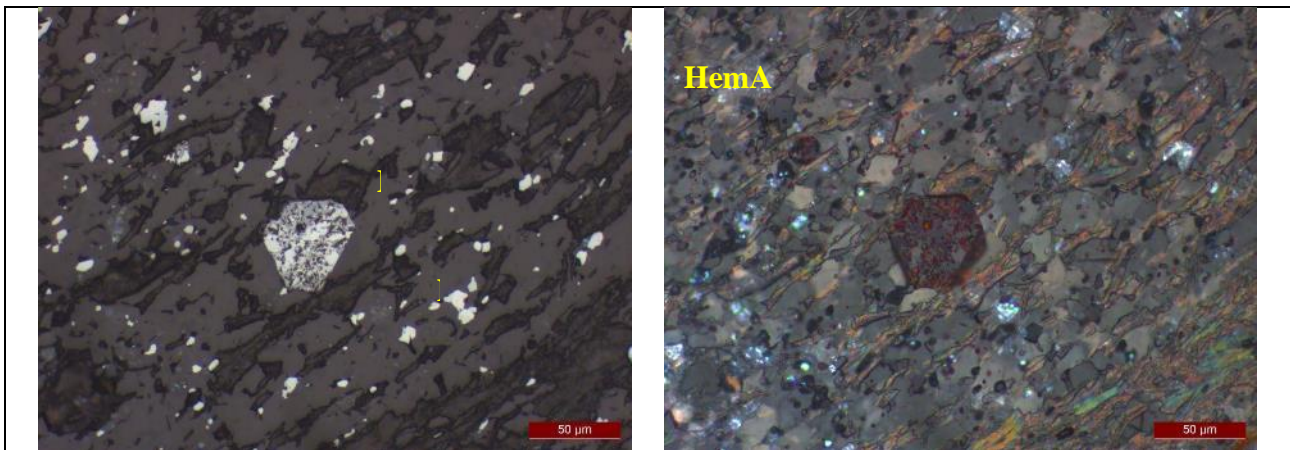


**Fotomicrografia 5:** Quartzo recristalizado (Qtz) e grãos esparsos de grunerita (Gru) na pseudobanda milimétrica microdobrada da porção sudeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

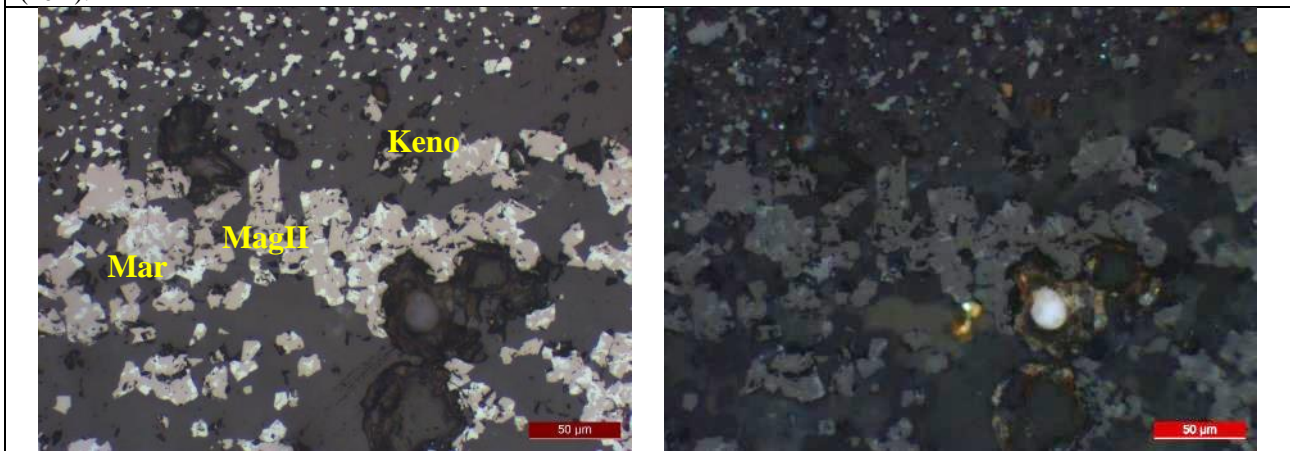


**Fotomicrografia 6:** Quartzo recristalizado (Qtz) e grãos esparsos de grunerita (Gru), ambos com certa orientação, na pseudobanda milimétrica microdobrada da porção sudeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

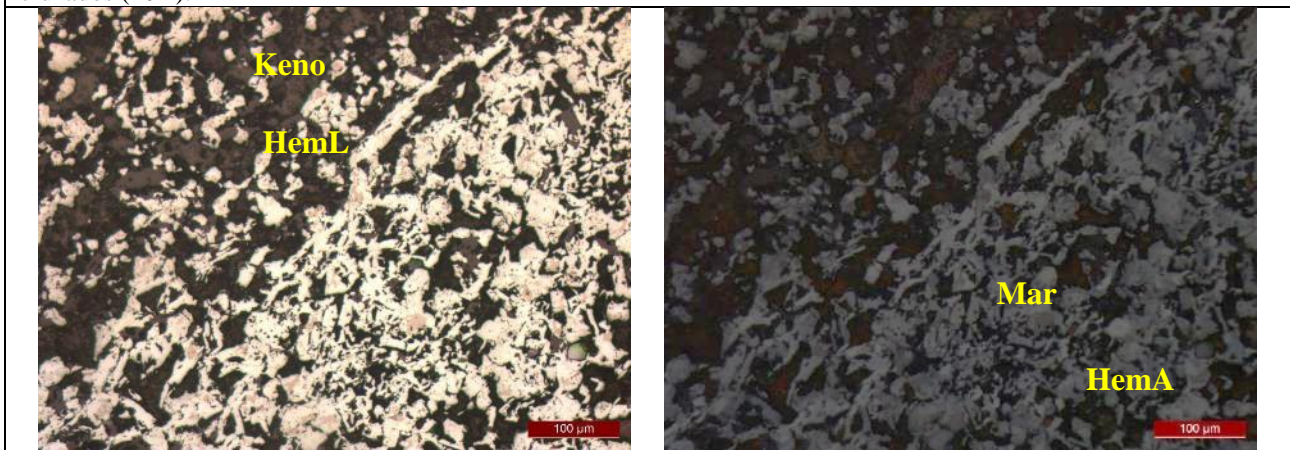




**Fotomicrografia 7:** Grãos esparsos de hematita anédrica (HemA) e de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) na pseudobanda milimétrica microdobrada da porção sudeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

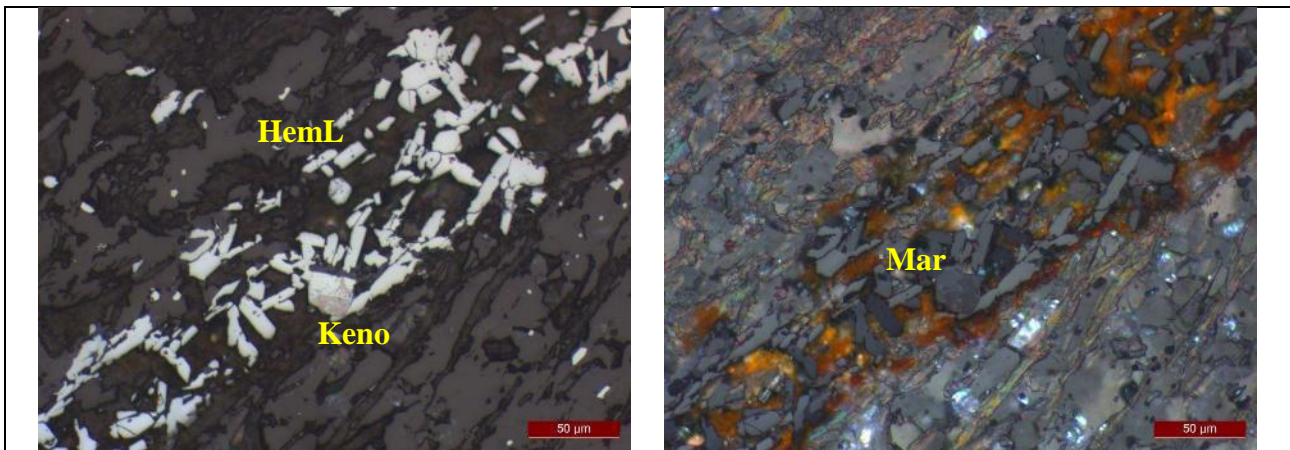


**Fotomicrografia 8:** Magnetita hidrotermal (MagII) e de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) na pseudobanda milimétrica microdobrada de opacos da porção noroeste e sudeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

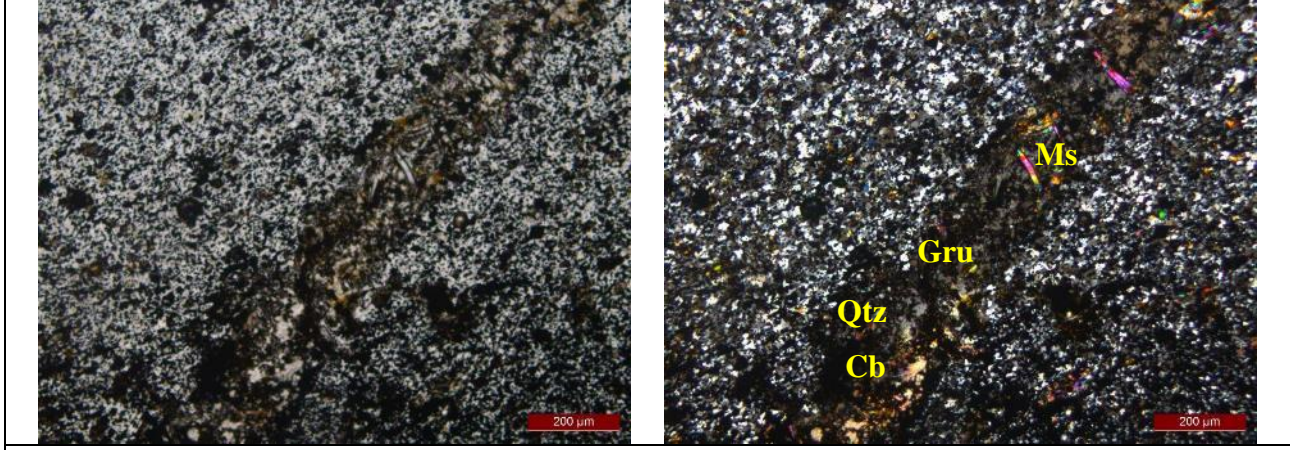


**Fotomicrografia 9:** Martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, e hematita lamelar (HemL) na pseudobanda milimétrica microdobrada de opacos da porção noroeste e sudeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

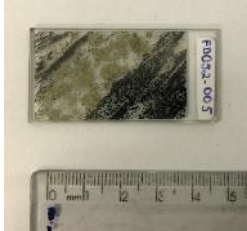




**Fotomicrografia 10:** Martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), e hematita lamelar (HemL) na pseudobanda milimétrica microdobrada de opacos da porção noroeste e sudeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



**Fotomicrografia 11:** Vênula de quartzo recristalizado (Qtz), de carbonato de granulação fina (Cb), e de grãos esparsos de muscovita (Ms) e grunerita (Gru) cortando pseudobandas milimétricas da porção noroeste e região sem estrutura definida. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (5X).

LÂMINA 2016-FD052-005			
			
Estimativa Mineralógica			
Transparentes		Opacos	
Carbonato granulação média (CbM)	± 20%	Pirita (Py)	± 17%
Quartzo venular (QtzV)	± 15%	Magnetita hidrotermal (MagII)	± 22%
Carbonato granulação fina (Cb)	± 10%	Hematita anédrica (HemA)	± 6%
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 5%	Hematita microlamelar (HemMI)	± 2%
Turmalina (Tur)	± 1%	Calcopirita (Cpy)	± 2%
Escala de Wentworth			
Granulação muito fina: $\varnothing < 0,004$ mm			
Granulação fina: $0,004 < \varnothing < 0,064$ mm			
Granulação média: $0,064 < \varnothing < 2$ mm			
<b>Nome da rocha:</b> Brecha com sulfetos.			

### Descrição microscópica

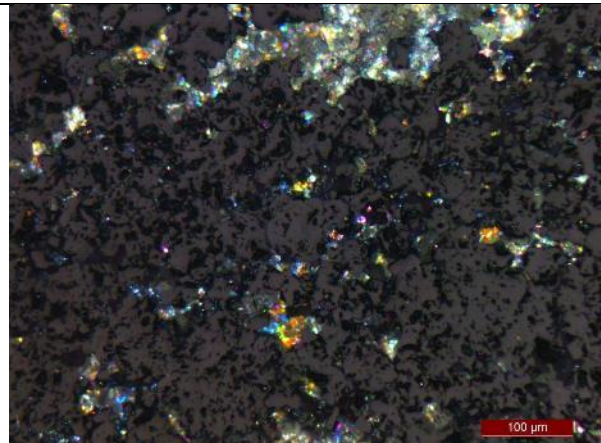
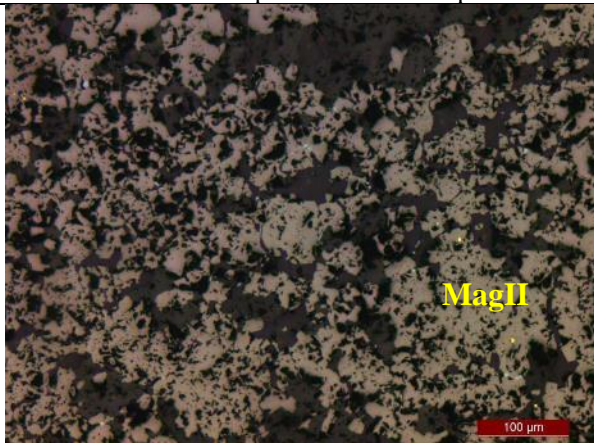
Lâmina com pseudobandas milimétricas alternadas e pouco misturadas na porção sudeste e noroeste de carbonato de granulação fina, de quartzo recristalizado e de opacos. Pseudobanda centimétrica na porção central de carbonato de granulação média, de quartzo venular e de opacos (principalmente sulfetos). Porosidade moderada a alta dos grãos e das pseudobandas milimétricas com opacos.

Pseudobandas milimétricas da porção sudeste e noroeste compostas por alta quantidade de magnetita hidrotermal e associada a pirita, subédricas, bordas regulares, de granulação fina (Fotomicrografia 1); de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 2); e por quantidade moderada de grãos esparsos, e em aglomerados, de pirita, subédricos a anédricos, bordas regulares, de granulação fina a média, com hematita anédrica em suas bordas (Fotomicrografia 3). Quantidade moderada de carbonato de granulação média anédrico, bordas regulares/irregulares, de granulação fina (Fotomicrografia 4); e pouca quantidade de cristais esparsos, e em aglomerados, de quartzo venular, euédricos a anédricos, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina. Alguns grãos esparsos de turmalina, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina (Fotomicrografia 5).

Pseudobanda centimétrica da porção central composta por carbonato granulação média anédrico, bordas regulares/irregulares, de granulação fina a média; por quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina a média; por grãos esparsos, e em aglomerados, de pirita, subédricos a anédricos, bordas regulares, de granulação média e com bordas de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina, de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina, e de magnetita hidrotermal e associada a pirita, subédricas, bordas regulares, de granulação fina (Fotomicrografias 6 e 7). Pouca quantidade de calcopirita anédrica, bordas regulares, de granulação fina a média, sendo encontrada próxima a pirita (Fotomicrografia 8); e de turmalina euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina.

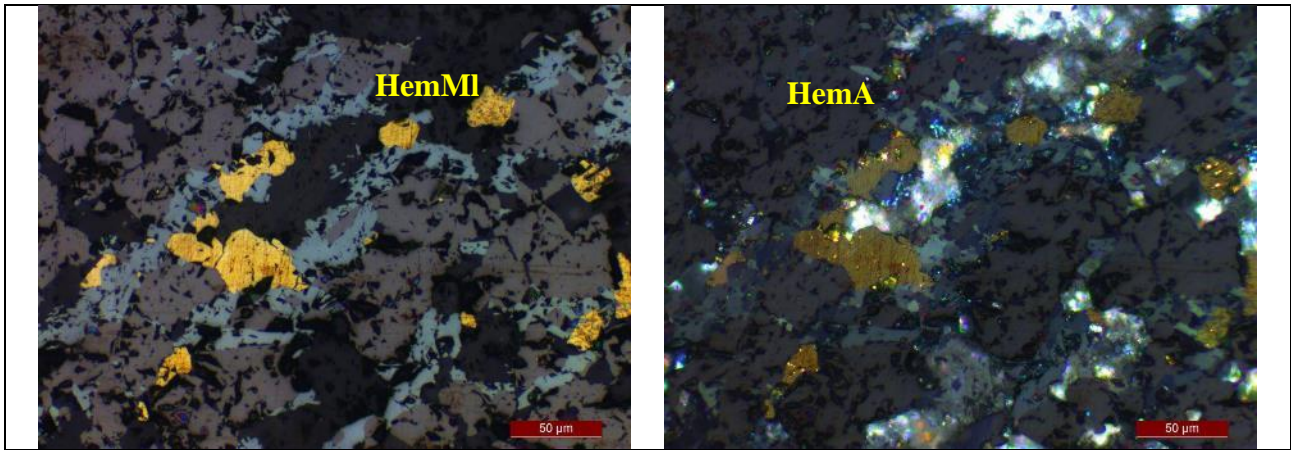
#### Observações:

- Pouca quantidade de quartzo recristalizado e de venular e alta quantidade de carbonato de granulação fina e de granulação média pode indicar existência de carbonato de granulação fina da rocha original e hidrotermalismo posterior;
- Sulfetos (pirita e calcopirita de granulação média) parecem ser produto de percolação de fluidos, sendo associados a magnetita hidrotermal e hematita anédrica (Fotomicrografia 9). Isso parece sugerir formação de pirita e hematita anédrica a partir de magnetita hidrotermal;
- Pirita e calcopirita parecem interagir de alguma forma, sendo possível que calcopirita se forme a partir da disponibilidade de Cu;
- Pseudobanda centimétrica da porção central parece ter sido conduzido para percolação de fluidos e formação de sulfetos;
- Alta quantidade de magnetita hidrotermal e associada a pirita subédrica e de granulação fina pode estar relacionada com hidrotermalismo;
- Ambos os tipos de magnetita hidrotermal possuem coloração roseada o que pode indicar deficiente em  $Fe^{+2}$ ;
- Magnetita hidrotermal associada à pirita parece dar origem a hematita anédrica, pirita e calcopirita;
- Hematita microlamelar parece se formar a partir de hematita anédrica.

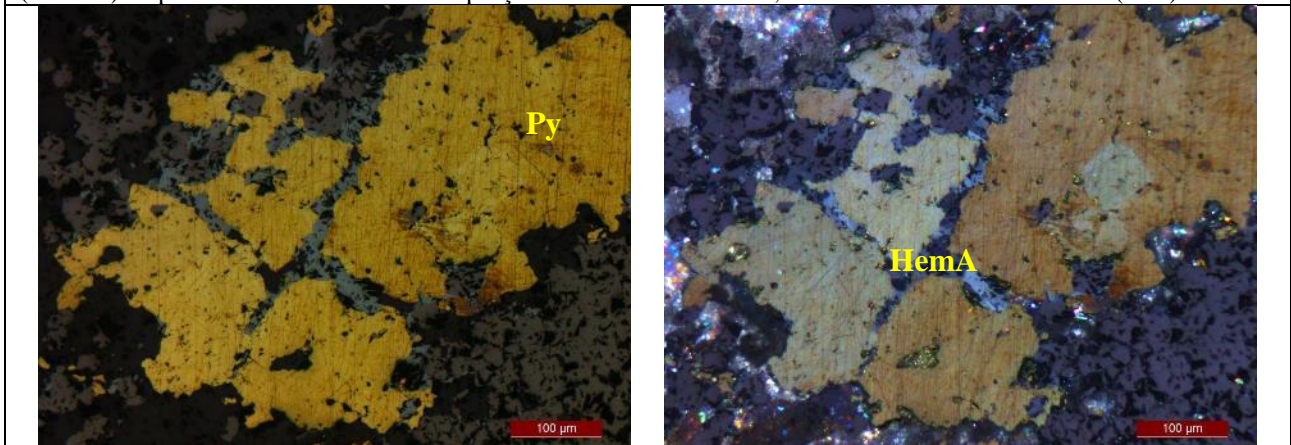


**Fotomicrografia 1:** Magnetita hidrotermal (MagII) na pseudobanda milimétrica da porção sudeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

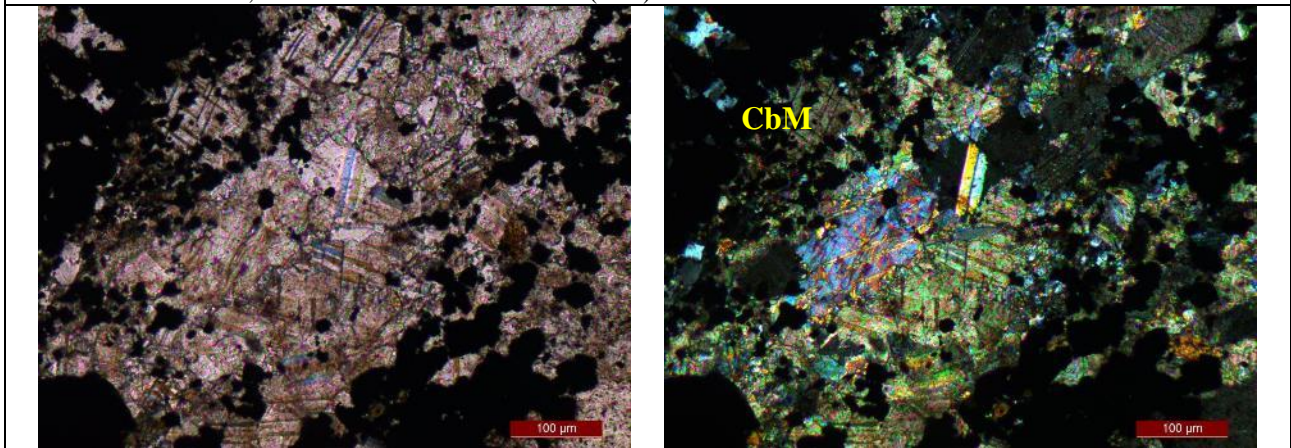




**Fotomicrografia 2:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, e microlamelar (HemMl) na pseudobanda milimétrica da porção sudeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

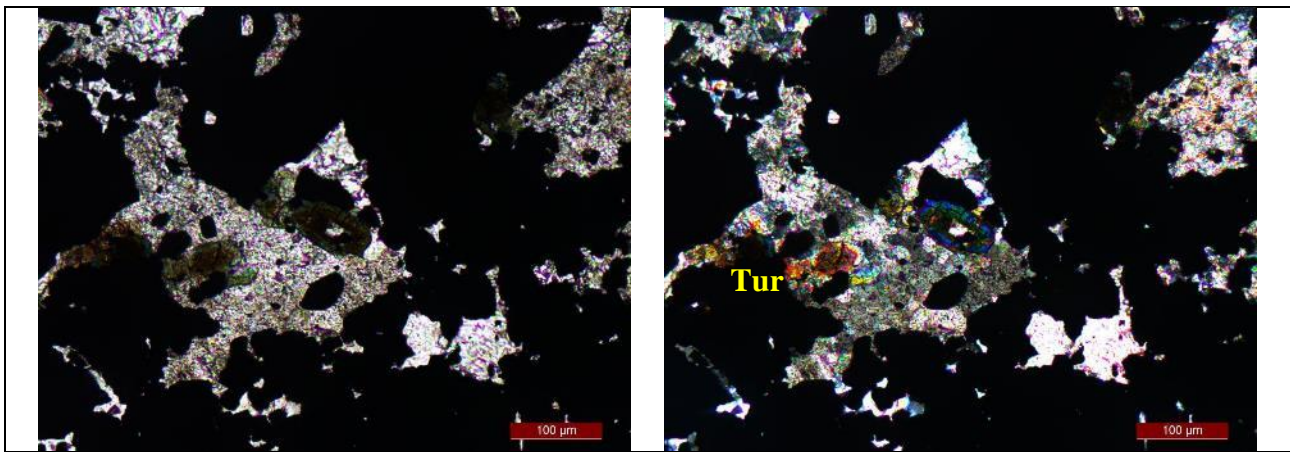


**Fotomicrografia 3:** Pirita (Py) com hematita anédrica (HemA) em suas bordas na pseudobanda milimétrica da porção sudeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

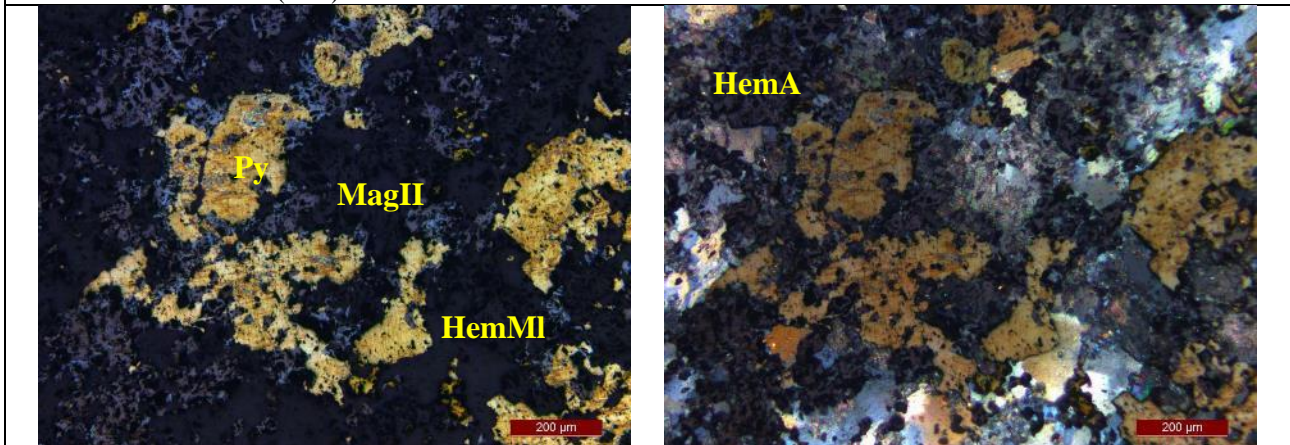


**Fotomicrografia 4:** Carbonato de granulação média (CbM) na pseudobanda milimétrica da porção sudeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

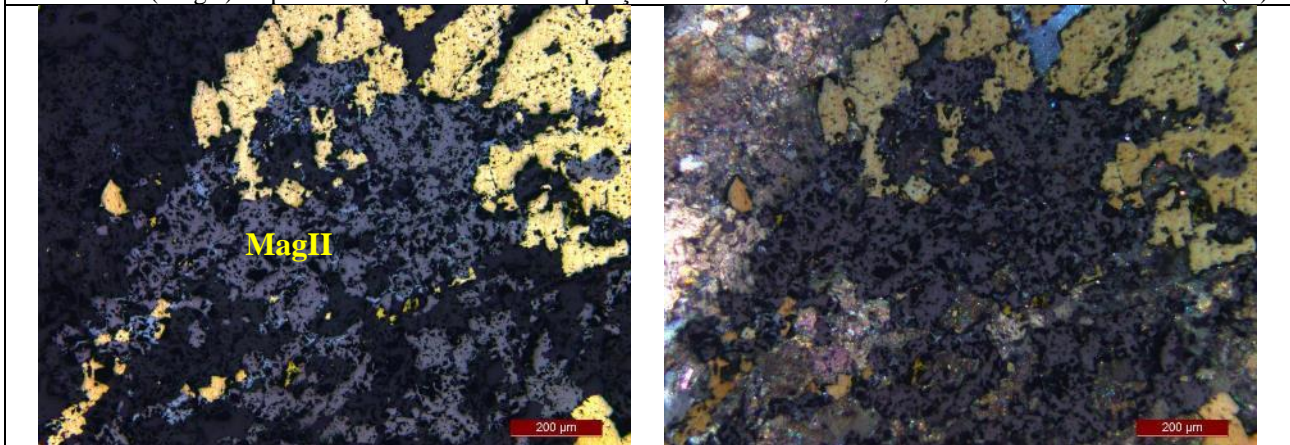




**Fotomicrografia 5:** Turmalina (Tur) na pseudobanda milimétrica da porção sudeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

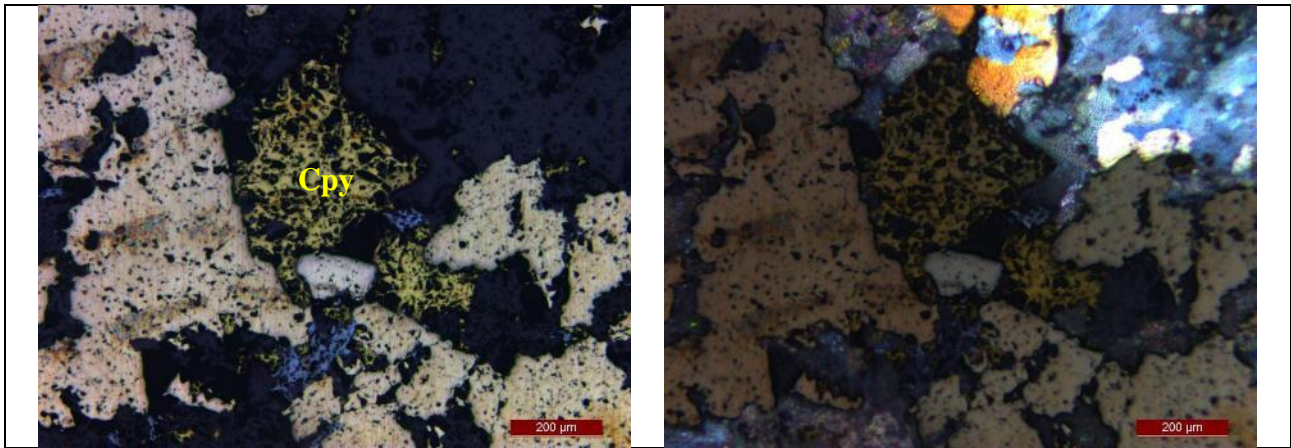


**Fotomicrografia 6:** Pirita (Py) com bordas de hematita anédrica (HemA), hematita microlamelar (HemMI) e magnetita hidrotermal (MagII) na pseudobanda centimétrica da porção central. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (5X).

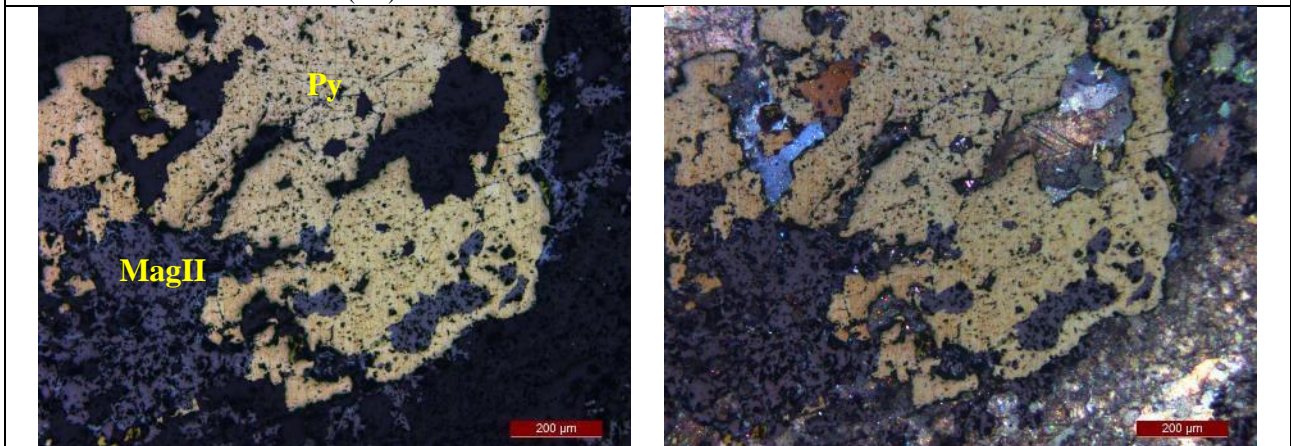


**Fotomicrografia 7:** Grãos, em aglomerados, de magnetita hidrotermal (MagII) na pseudobanda da porção central. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (5X).



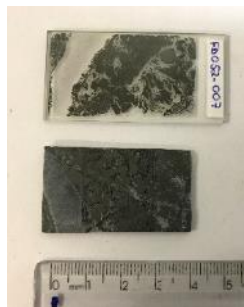


**Fotomicrografia 8:** Calcopirita (Cpy) próxima a pirita na pseudobanda centimétrica da porção central. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (5X).



**Fotomicrografia 9:** Pirita (Py) que parece englobar magnetita hidrotermal (MagII) na pseudobanda centimétrica da porção central. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (5X).

**LÂMINA 2016-FD052-007**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Carbonato granulação fina (Cb)	± 25%	Magnetita hidrotermal (MagII)	± 38,5%
Quartzo venular (QtzV)	± 20%	Hematita anédrica (HemA)	± 0,5%
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 10%	Pirita (Py)	± 0,5%
Carbonato granulação média (CbM)	± 5%		
Grunerita (Gru)	± 0,5%		

**Escala de Wentworth**

Granulação muito fina: $\emptyset < 0,004$ mm
Granulação fina: $0,004 < \emptyset < 0,064$ mm
Granulação média: $0,064 < \emptyset < 2$ mm
<b>Nome da rocha:</b> Brecha com sulfetos.

### Descrição microscópica

Lâmina com pseudobanda centimétrica (1 cm) na porção noroeste de quartzo recristalizado e de venular, de carbonato de granulação fina e de granulação média. Pseudobanda centimétrica (1 cm) na porção central de carbonato de granulação fina, de quartzo venular e de opacos. Vênulas de quartzo recristalizado. Outras áreas parecem estar brechadas. Porosidade moderada dos grãos e da pseudobanda centimétrica de opacos.

Pseudobanda centimétrica (1 cm) da porção noroeste composta por quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; por carbonato de granulação fina anédrico, bordas irregulares, de granulação muito fina a fina, misturados com quartzo; por grãos esparsos de magnetita hidrotermal, subédricos, bordas regulares, de granulação fina; e por grãos esparsos de hematita anédrica com bordas irregulares, de granulação muito fina a fina. Grada, para a esquerda e para a direita, para quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina; e para carbonato de granulação média anédrico, bordas regulares/irregulares, de granulação fina. Há aumento da quantidade de carbonato (Fotomicrografia 1).

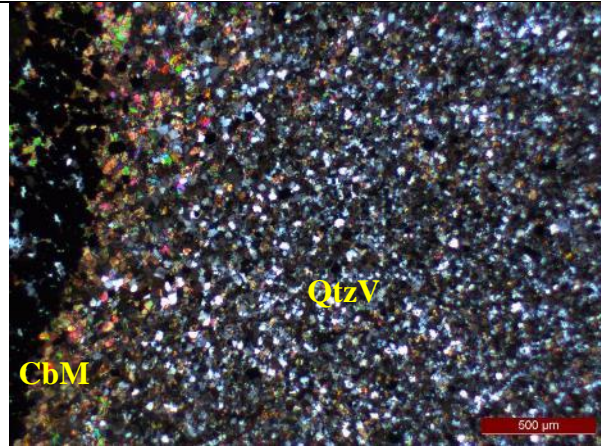
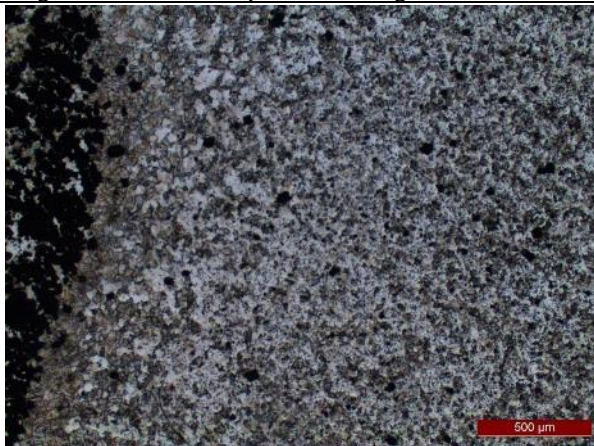
Pseudobanda centimétrica (1 cm) da porção central composta por mistura de carbonato de granulação fina anédrico, bordas irregulares, de granulação muito fina a fina; de pouca quantidade de cristais esparsos, e em aglomerados, de quartzo venular, euédricos a anédricos, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina (Fotomicrografia 2); e de magnetita hidrotermal, subédricos a anédricos, bordas regulares, de granulação muito fina a fina (Fotomicrografia 3). Alguns grãos de magnetita hidrotermal subédricos, bordas regulares, de granulação média e porosidade alta (Fotomicrografia 4); e alguns grãos de grunerita, euédricos, bordas regulares, de granulação fina (Fotomicrografia 5). Grada, para a direita e para a esquerda, para zonas com textura brechada.

Zonas com textura brechada compostas por grãos, pseudobandas milimétricas e aglomerados, de magnetita hidrotermal, subédricos a anédricos, bordas regulares, de granulação muito fina a fina (Fotomicrografia 6); por grãos de magnetita hidrotermal, subédricos, bordas regulares, de granulação média e porosidade alta (Fotomicrografia 7). Presença de carbonato de granulação fina e de granulação média, anédricos, bordas regulares/irregulares, de granulação muito fina a média; misturados com quartzo venular euédrico a anédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina a média; e pouca quantidade de grãos esparsos de pirita, subédricos, bordas regulares, de granulação fina, próximos a magnetita hidrotermal (Fotomicrografia 8).

Vênulas de carbonato de granulação fina e de quartzo recristalizado, subédricos a anédricos, bordas irregulares, fumê e de granulação muito fina. Cortam a magnetita hidrotermal de granulação média e porosidade elevada (Fotomicrografia 9).

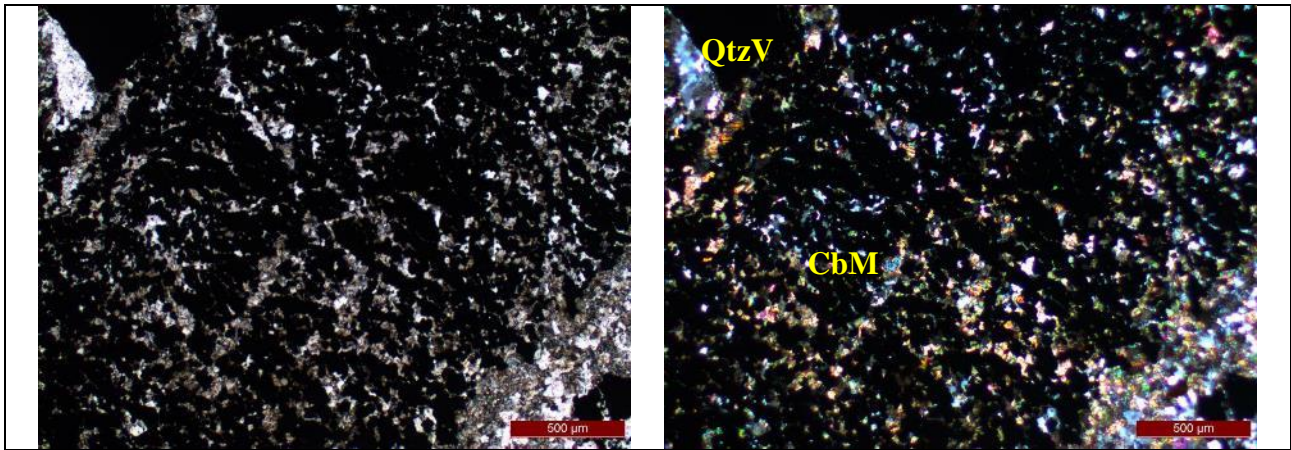
#### Observações:

- Lâmina com textura brechada devido à presença de magnetita hidrotermal de granulação média;
- Alta quantidade de carbonato de granulação fina pode indicar derivação da rocha original;
- Alta quantidade de magnetita hidrotermal subédrica a anédrico de granulação fina pode estar relacionada com a rocha original;
- Magnetita hidrotermal de granulação média e porosidade alta relacionada com hidrotermalismo;
- Magnetita hidrotermal possui coloração roseada o que pode indicar deficiente em  $Fe^{+2}$ ;
- Magnetita hidrotermal parece dar origem a hematita anédrica.

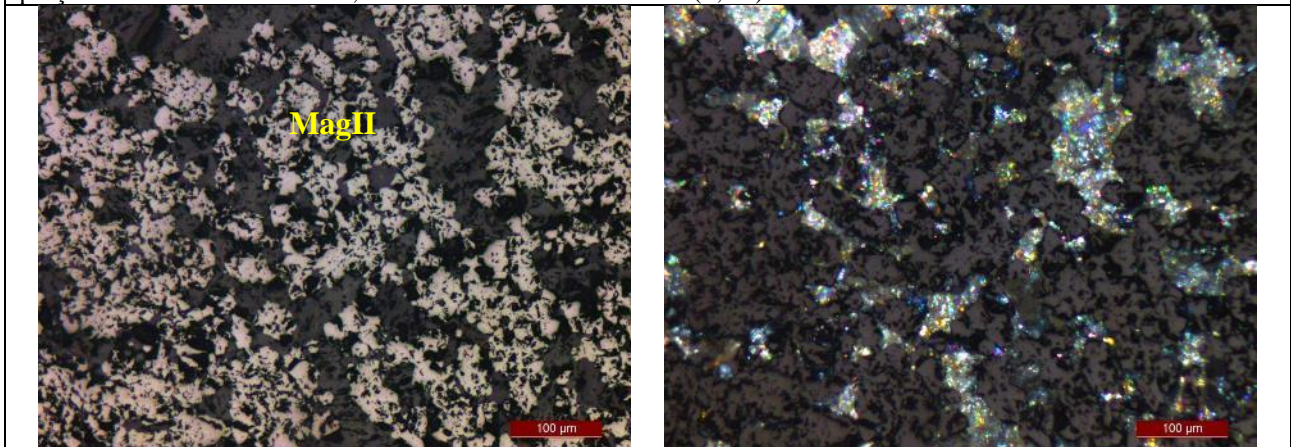


**Fotomicrografia 1:** Gradação na pseudobanda centimétrica da porção noroeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

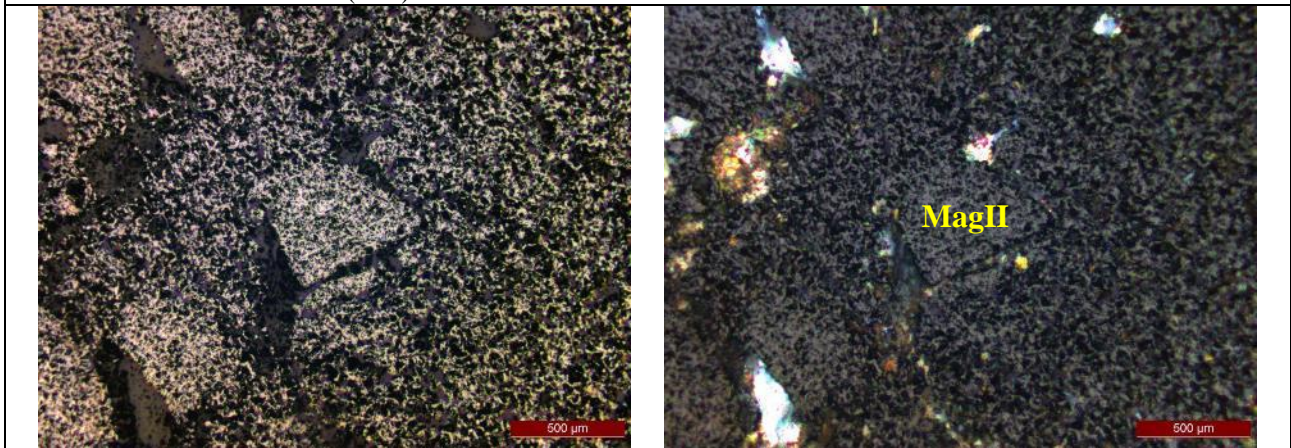




**Fotomicrografia 2:** Carbonato de granulação média (CbM) e quartzo venular (QtzV) na pseudobanda centimétrica da porção central. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

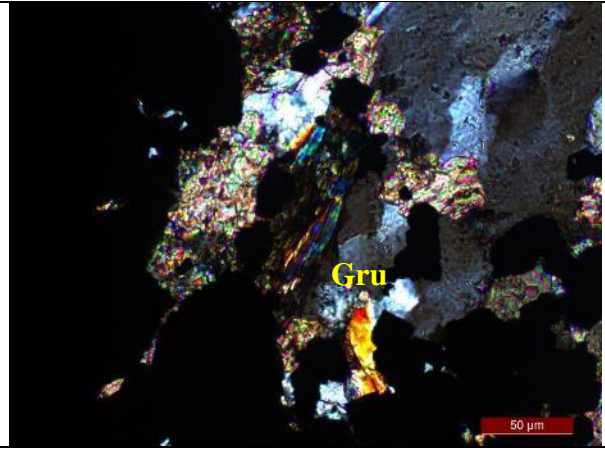
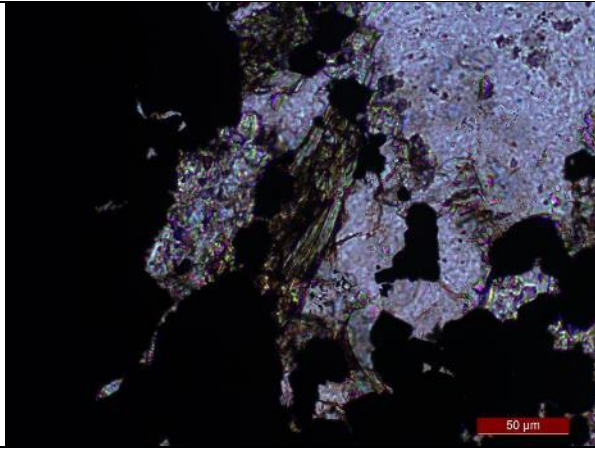


**Fotomicrografia 3:** Magnetita hidrotermal (MagII) na pseudobanda centimétrica na porção central. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

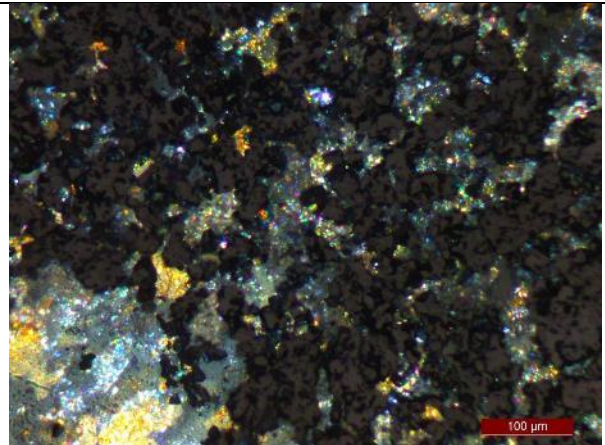
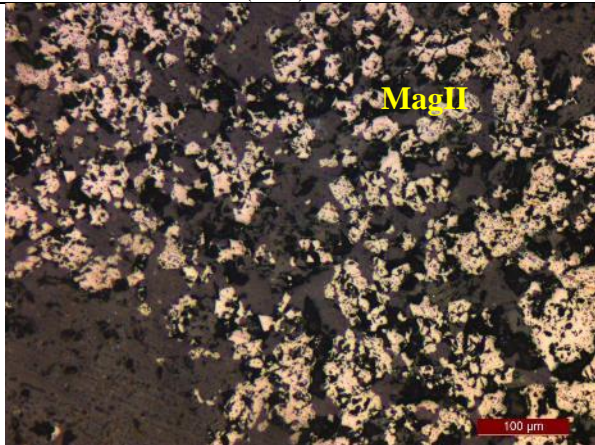


**Fotomicrografia 4:** Magnetita hidrotermal (MagII) de granulação média e porosidade elevada na pseudobanda centimétrica da porção central. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

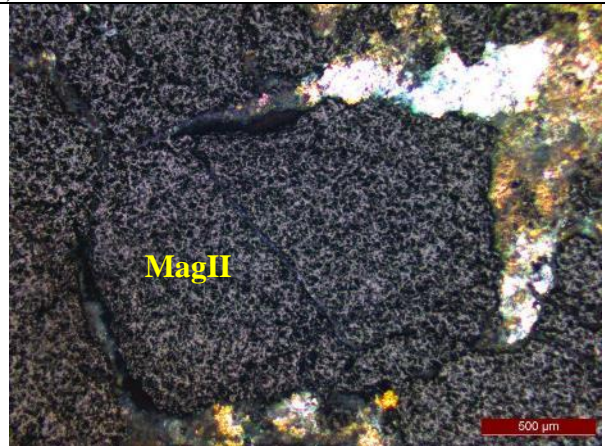
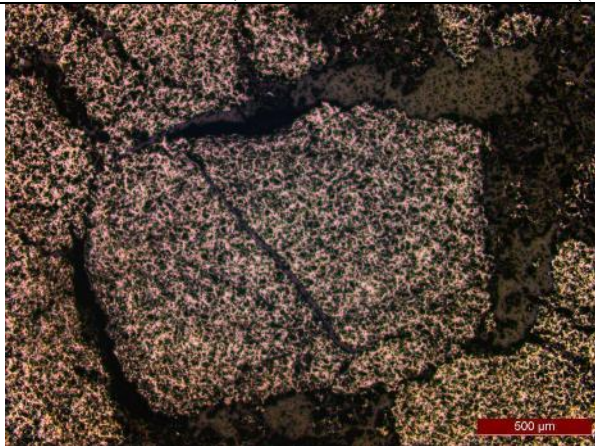




**Fotomicrografia 5:** Grunerita (Gru) na pseudobanda centimétrica da porção central. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

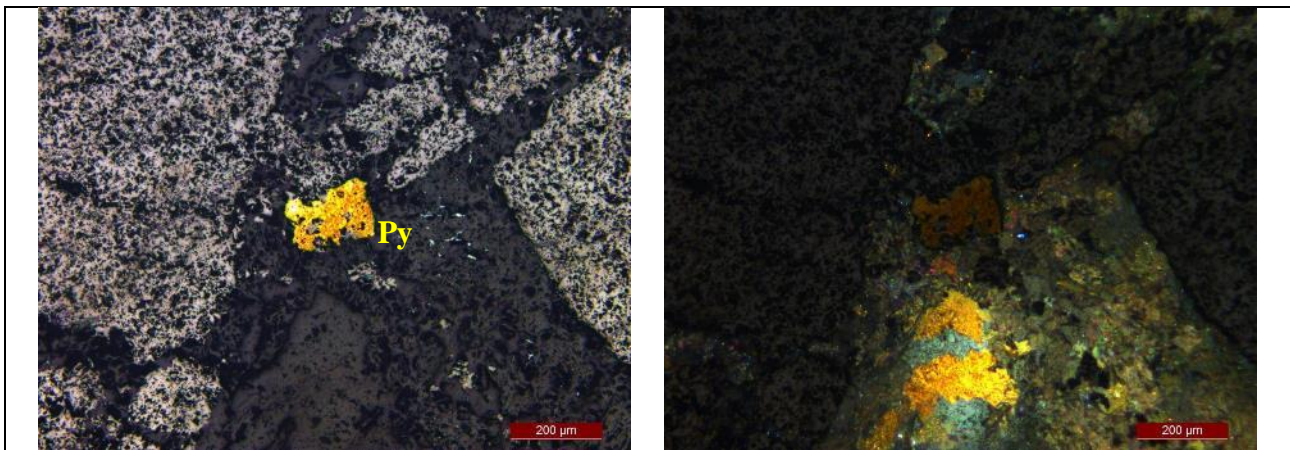


**Fotomicrografia 6:** Magnetita hidrotermal (MagII) em agregados e na forma de pseudobandas milimétricas na zona brechada. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

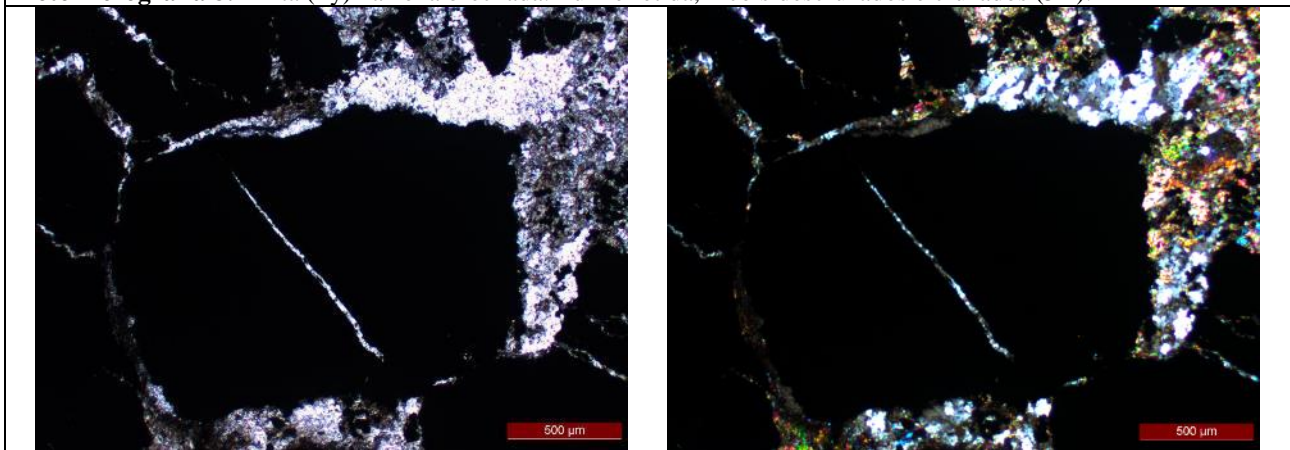


**Fotomicrografia 7:** Magnetita hidrotermal (MagII) de granulação média e porosidade elevada na zona brechada. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).





**Fotomicrografia 8:** Pirita (Py) na zona brechada. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (5X).



**Fotomicrografia 9:** Vênula de quartzo recristalizado e de carbonato de granulação fina que corta a magnetita de granulação média e porosidade elevada na zona brechada. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

**LÂMINA 2016-FD055-001**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 45%	Martita (Mar)	± 30%
Quartzo venular (QtzV)	± 5%	Hematita microlamelar (HemMI)	± 17%
Muscovita (Ms)	± 1%	Kenomagnetita (Keno)	± 2%

**Escala de Wentworth**

- Granulação muito fina:  $\varnothing < 0,004$  mm
- Granulação fina:  $0,004 < \varnothing < 0,064$  mm
- Granulação média:  $0,064 < \varnothing < 2$  mm

**Nome da rocha:** Itabirito silicoso.

**Descrição microscópica**

Lâmina com bandas milimétricas alternadas na porção leste e oeste de quartzo recristalizado e opacos. Banda centimétrica (1 cm) na porção central de quartzo recristalizado. Porosidade baixa dos grãos e das bandas milimétricas de opacos.

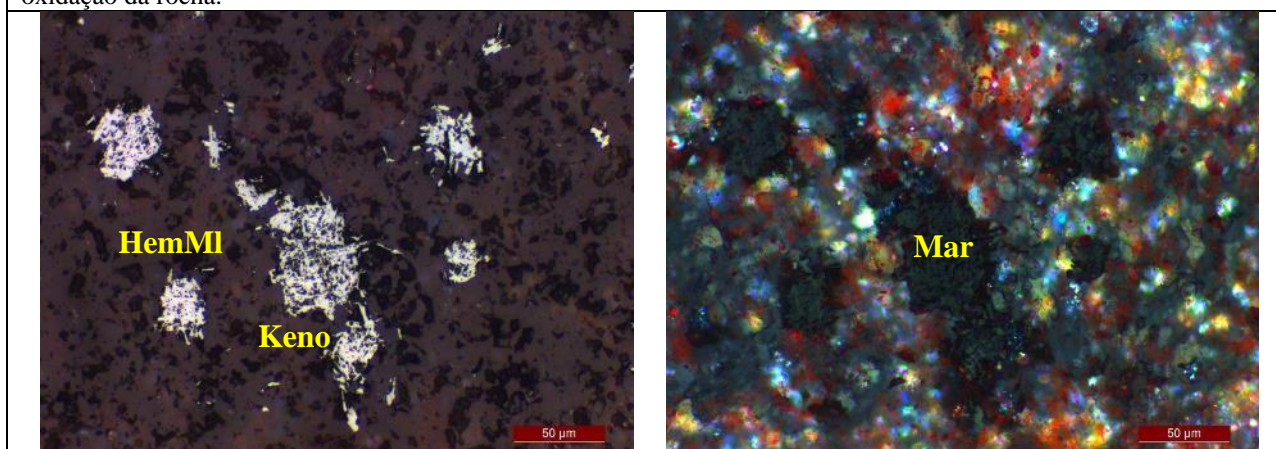
Bandas milimétricas de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; com grãos esparsos de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 1).

Bandas milimétricas de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação muito fina a fina e com relictos de kenomagnetita; e de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 2). Há filetes e aglomerados de quartzo venular euédrico a anédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina. Grãos esparsos de muscovita, euédricos, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 3).

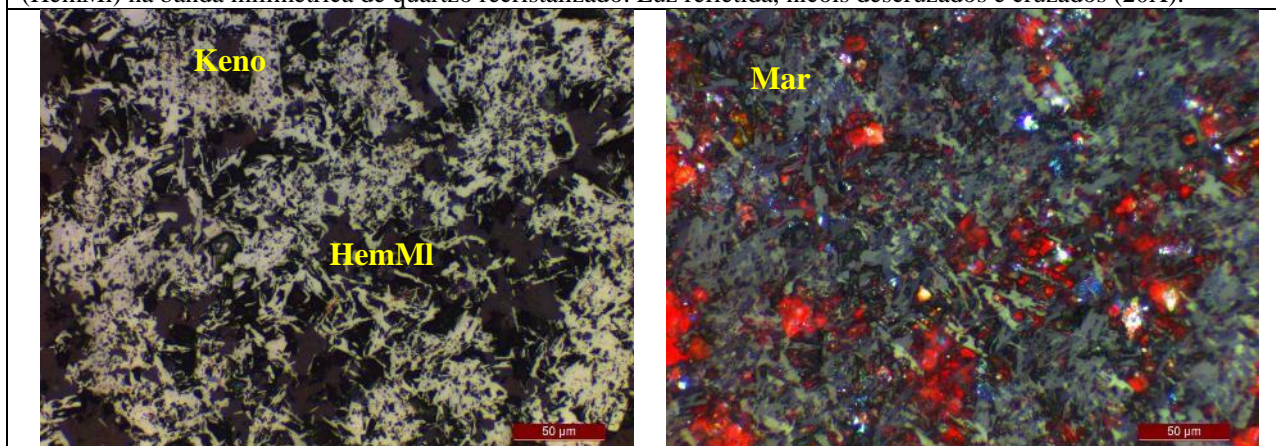
Banda centimétrica (1 cm) da porção central composta por quartzo recristalizado anédrico, bordas regulares, fumê, de granulação muito fina a fina; e de pouca quantidade de grãos esparsos de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita. Na parte leste há quartzo venular euédrico a anédrico, bordas regulares/irregulares, aspecto fumê, de granulação fina (Fotomicrografia 4).

Observações:

- Lâmina com pouca alteração estrutural;
- Recristalização de quartzo;
- Hematita microlamelar parece se formar a partir de martita;
- Pouca quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica em  $Fe^{+2}$  do sistema e alto grau de oxidação da rocha.

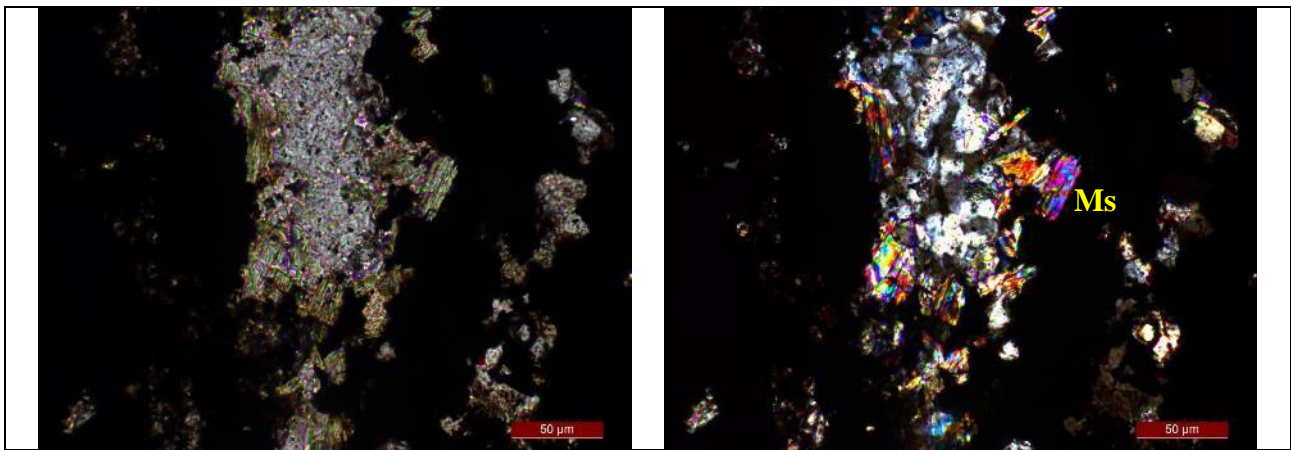


**Fotomicrografia 1:** Grãos esparsos de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e de hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

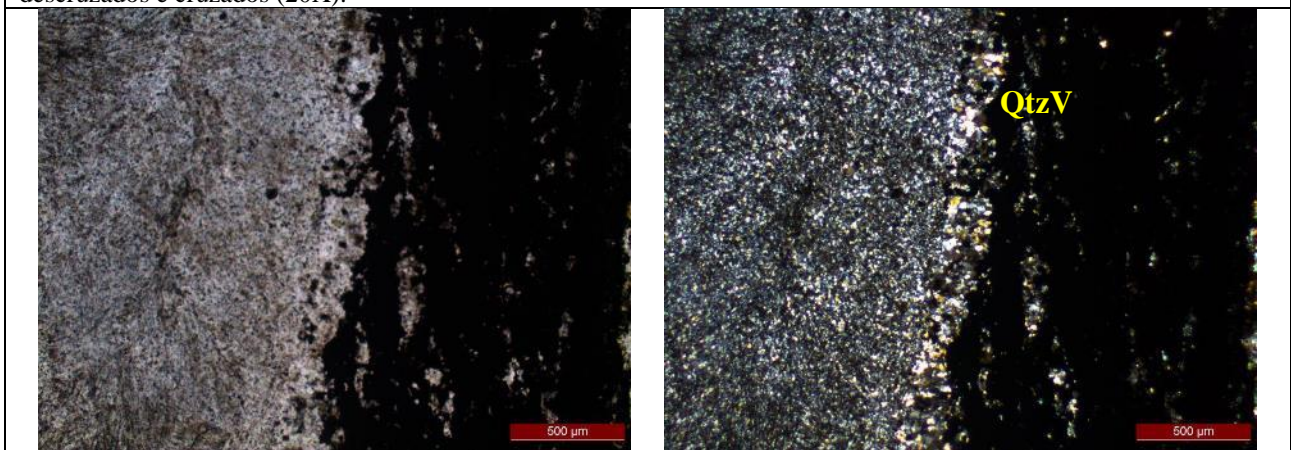


**Fotomicrografia 2:** Martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno) e hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica de opacos. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).





**Fotomicrografia 3:** Grãos esparsos de muscovita (Ms) na banda milimétrica de opacos. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



**Fotomicrografia 4:** Quartzo venular (QtzV) na parte leste da banda centimétrica de quartzo recristalizado da porção central Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

**LÂMINA 2016-FD055-003**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 40%	Hematita microlamelar (HemMI)	± 25%
Quartzo venular (QtzV)	± 10%	Martita (Mar)	± 15,5%
		Hematita anédrica (HemA)	± 9%
		Kenomagnetita (Keno)	± 0,5%

**Escala de Wentworth**

Granulação muito fina: $\emptyset < 0,004$ mm
Granulação fina: $0,004 < \emptyset < 0,064$ mm
Granulação média: $0,064 < \emptyset < 2$ mm
<b>Nome da rocha:</b> Itabirito silicoso quartzo venulado com microfalhas.



### Descrição microscópica

Lâmina com bandas milimétricas alternadas de quartzo recristalizado e opacos. Banda centimétrica (1 cm) na porção centro-oeste de opacos. Microfalhas e vênulas de quartzo venular que configuram textura brechada. Porosidade baixa a moderada dos grãos, das bandas milimétricas e da banda centimétrica de opacos.

Bandas milimétricas de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; com grãos esparsos, em filetes e em aglomerados, de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina, (Fotomicrografia 1). Aglomerados de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média (Fotomicrografia 2).

Bandas milimétricas de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de alta quantidade de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina; e de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita (Fotomicrografia 3).

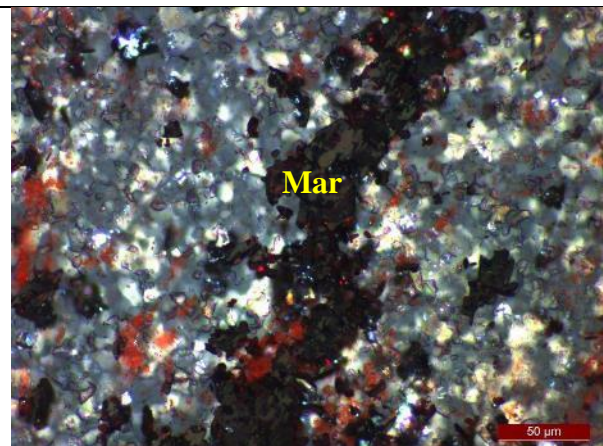
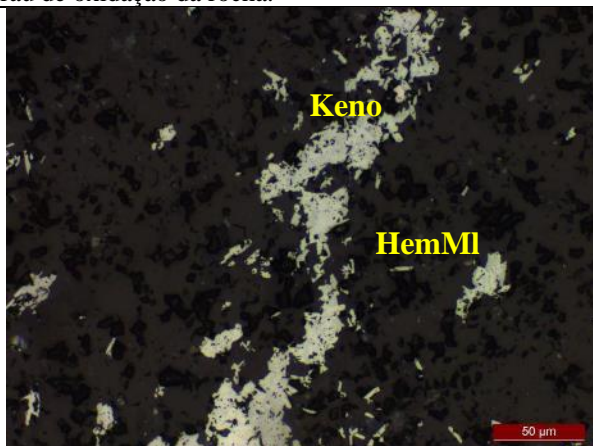
Banda centimétrica (1 cm) da porção centro-oeste de alta quantidade de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina; de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de pouca quantidade de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina (Fotomicrografia 4).

Vênulas de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina a média e com textura radial. Cortam as bandas milimétricas e a banda centimétrica e, por vezes, são paralelas a elas (Fotomicrografia 5).

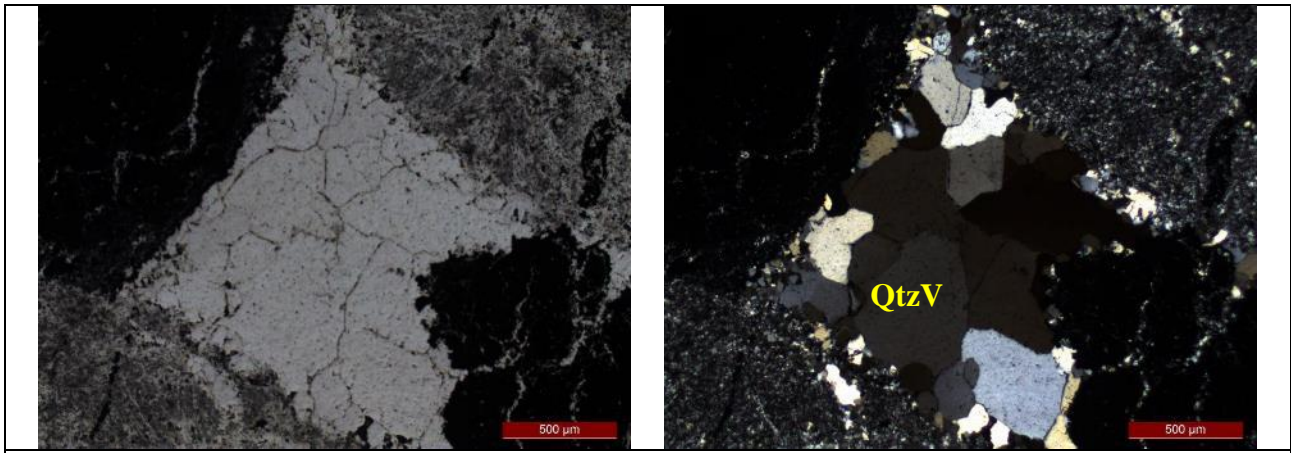
Microfalhas cortam e deslocam as bandas milimétricas e a banda centimétrica (Fotomicrografia 6).

#### Observações:

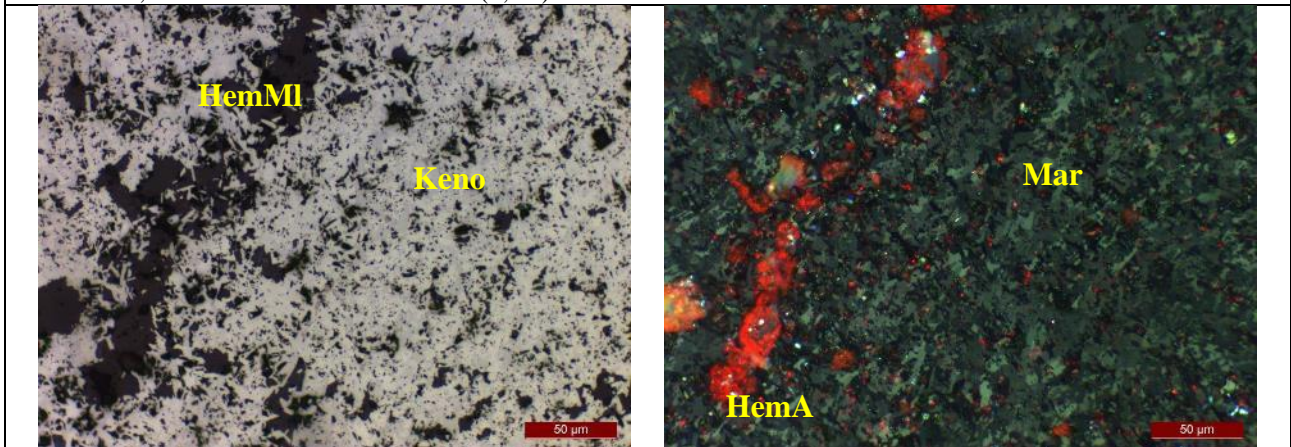
- Vênulas de quartzo venular parecem aproveitar os deslocamentos e espaços gerados pelas microfalhas ou até mesmo as terem gerado. Algumas são concordantes com as bandas existentes. Certa quantidade de opacos provindos das bandas milimétricas e centimétrica se deslocam devido aos espaços gerados;
- Lâmina e amostra apresentam textura brechada sendo as vênulas posteriores as microfalhas;
- Alta quantidade de hematita microlamelar pode indicar maior deformação da rocha;
- Martita parece dar origem a hematita anédrica de granulação muito fina e fina;
- Hematita microlamelar parece se formar a partir de hematita anédrica e de martita;
- Pouca quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica deficiência em  $Fe^{+2}$  do sistema e alto grau de oxidação da rocha.



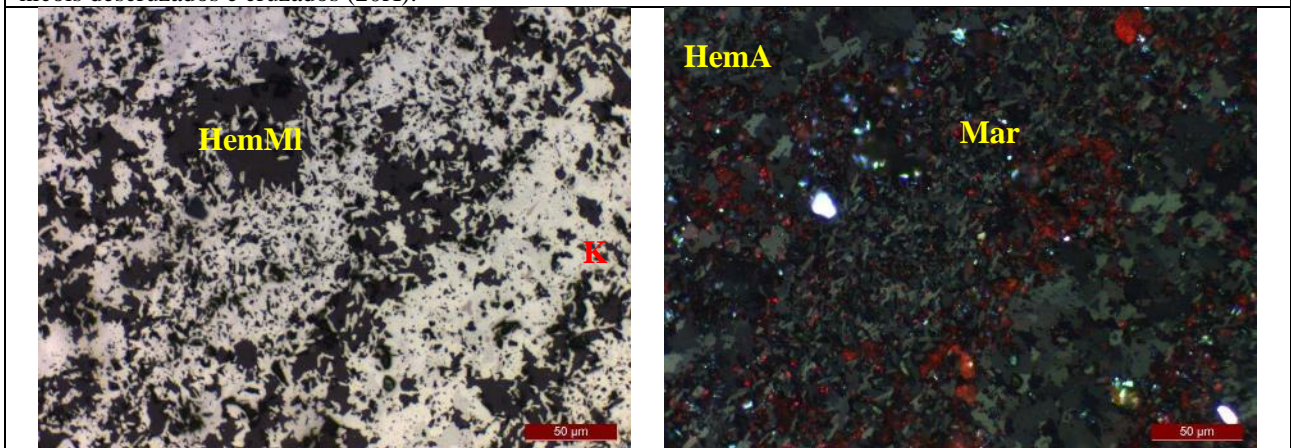
**Fotomicrografia 1:** Grãos esparsos, em aglomerados e filetes, de martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), e de hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).



**Fotomicrografia 2:** Aglomerado de quartzo venular (QtzV) na banda milimétrica de quartzo recristalizado. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

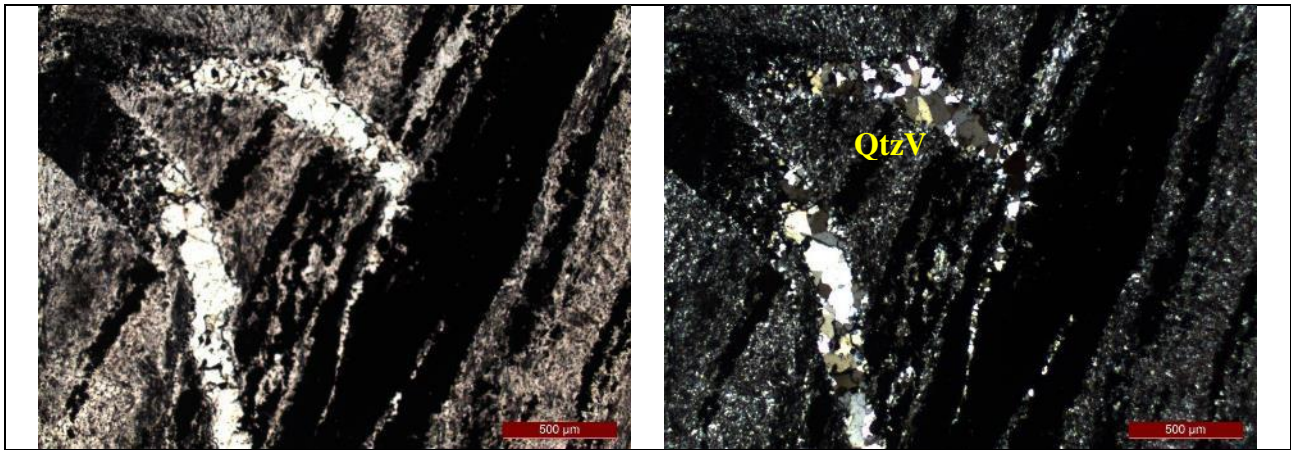


**Fotomicrografia 3:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), e hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica de opacos. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

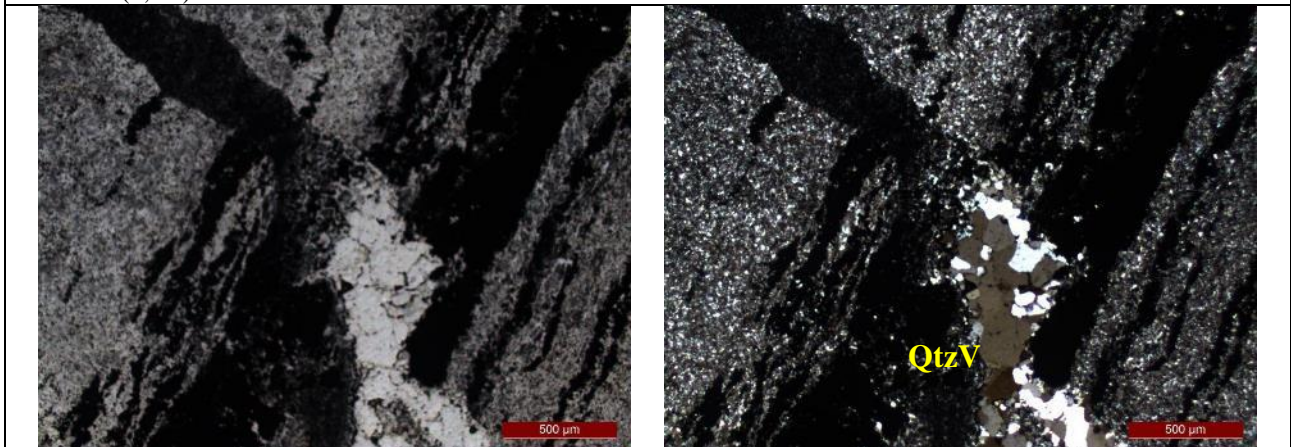


**Fotomicrografia 4:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), e hematita microlamelar (HemML) na banda centimétrica de opacos da porção centro-oeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).





**Fotomicrografia 5:** Vênulas de quartzo venular (QtzV) com textura radial. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).



**Fotomicrografia 6:** Microfalha que corta e desloca bandas milimétricas. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

**LÂMINA 2016-FD055-004**



**Estimativa Mineralógica**

Transparentes		Opacos	
Quartzo recristalizado (Qtz)	± 34%	Hematita microlamelar (HemMI)	± 24%
Quartzo venular (QtzV)	± 10%	Martita (Mar)	± 20%
		Hematita anédrica (HemA)	± 11%
		Kenomagnetita (Keno)	± 1%

**Escala de Wentworth**

Granulação muito fina: $\emptyset < 0,004$ mm
Granulação fina: $0,004 < \emptyset < 0,064$ mm
Granulação média: $0,064 < \emptyset < 2$ mm
<b>Nome da rocha:</b> Brecha itabirítica com microdobras.



### Descrição microscópica

Lâmina com bandas milimétricas alternadas e microdobradas na porção noroeste e sudeste de quartzo recristalizado e opacos. Pseudobandas milimétricas microdobradas na porção central compostas por mistura de quartzo recristalizado e opaco. Vênulas de quartzo venular. Finos aglomerados e filetes de quartzo venular nas bandas milimétricas. Porosidade moderada dos grãos e das bandas milimétricas de opacos.

Bandas milimétricas microdobradas da porção noroeste e sudeste de quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; com grãos esparsos, e em aglomerados, de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de hematita microlamelar, euédricos tabulares, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 1). Aglomerados e filetes, por vezes com textura lamelar ou radial, de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média (Fotomicrografia 2).

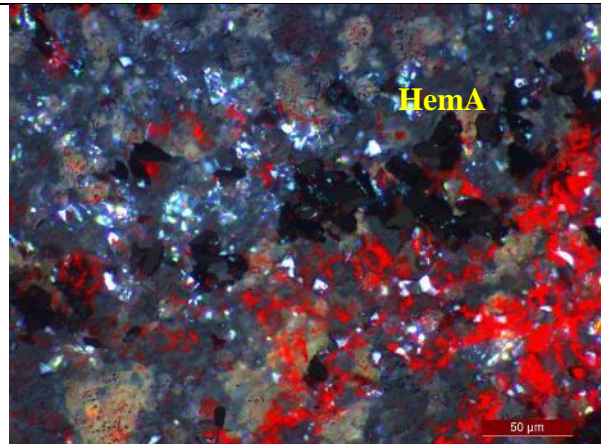
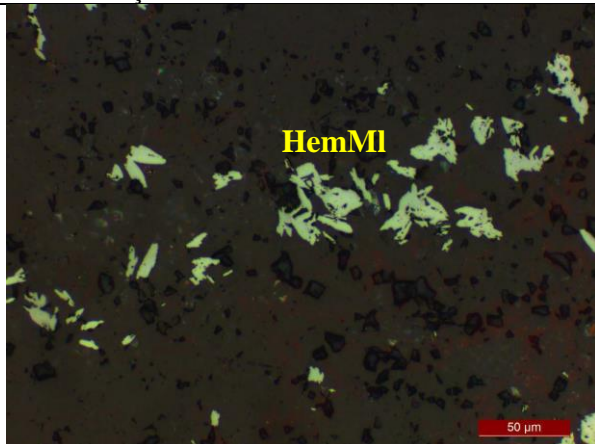
Bandas milimétricas microdobradas da porção noroeste e sudeste de alta quantidade de hematita microlamelar euédrica tabular, bordas regulares e, por vezes, orientada, de granulação muito fina; e de martita euédrica a subédrica, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita (Fotomicrografia 3).

Pseudobandas milimétricas microdobradas da porção central com grãos esparsos, em filetes e em aglomerados, de hematita anédrica com bordas irregulares e contatos interlobados, de granulação muito fina a fina; de martita, euédricos a subédricos, bordas regulares, de granulação fina e com relictos de kenomagnetita; e de alta quantidade de hematita microlamelar, por vezes orientada, euédrica tabular, bordas regulares, de granulação muito fina (Fotomicrografia 4). Há quartzo recristalizado anédrico, bordas irregulares, fumê, de granulação muito fina a fina; e finos aglomerados e filetes de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação fina a média (Fotomicrografia 5).

Vênulas de quartzo venular euédrico a subédrico, bordas regulares/irregulares, fumê, de granulação média e com textura radial. Cortam as bandas milimétricas microdobradas das porções noroeste e sudeste (Fotomicrografia 6).

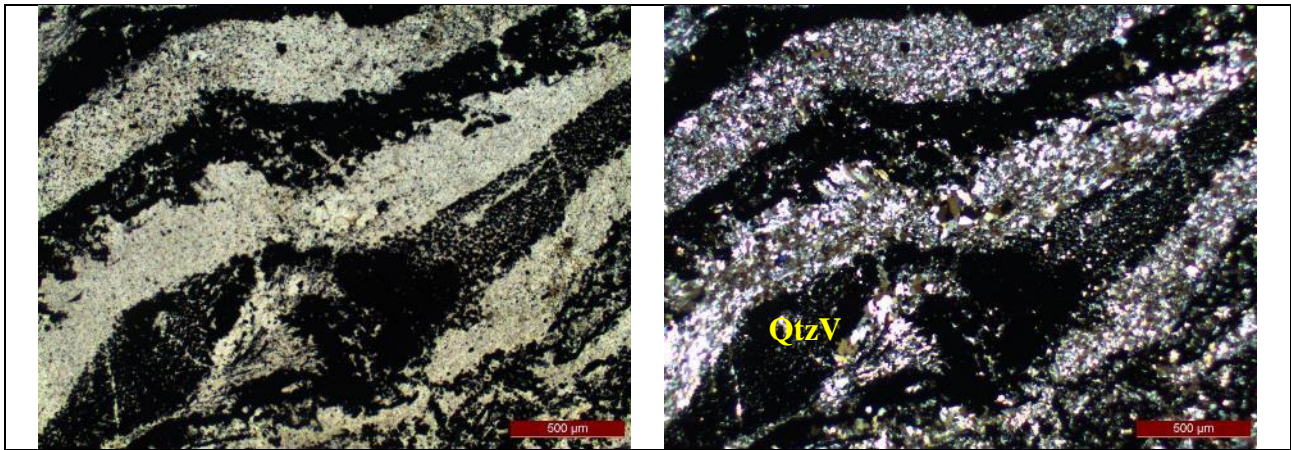
#### Observações:

- Falta de estrutura definida na porção central e alta quantidade de microdobras podem indicar alta deformação da rocha;
- Vênulas de quartzo venular, encontradas principalmente nas bandas milimétricas, podem ser provenientes das bandas milimétricas de quartzo recristalizado e de outros locais;
- Orientação de hematita microlamelar e de quartzo venular em alguns locais pode indicar estágio posterior de deformação da rocha;
- Alta quantidade de hematita microlamelar pode indicar alta deformação da rocha;
- Martita parece dar origem a hematita anédrica de granulação muito fina e fina;
- Hematita microlamelar parece se formar a partir de hematita anédrica e de martita;
- Pouca quantidade de kenomagnetita como relicto no interior de martita indica deficiência em  $Fe^{+2}$  do sistema e alto grau de oxidação da rocha.

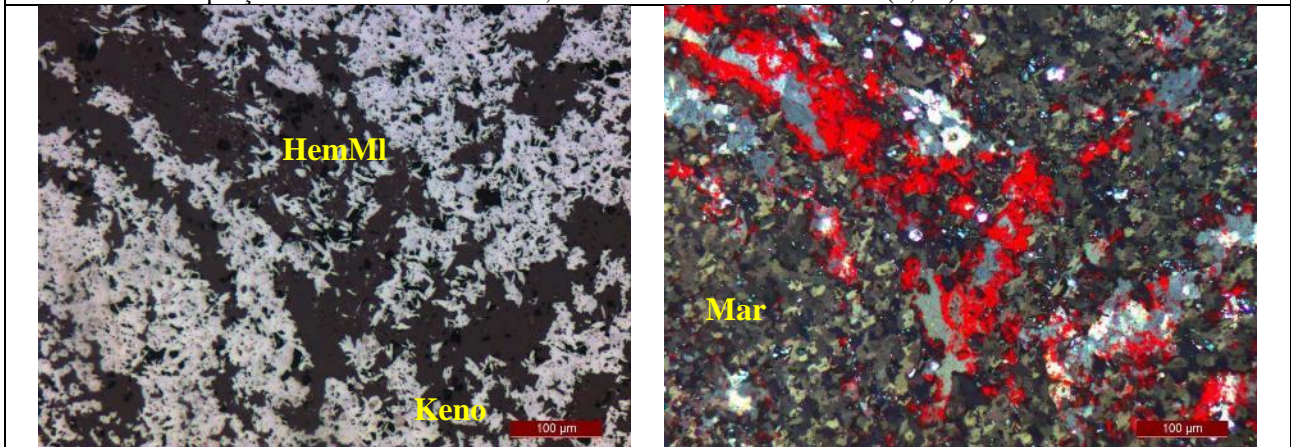


**Fotomicrografia 1:** Grãos esparsos, e em aglomerados, de hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, e de hematita microlamelar (HemMI) na banda milimétrica microdobrada de quartzo recristalizado da porção sudeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (20X).

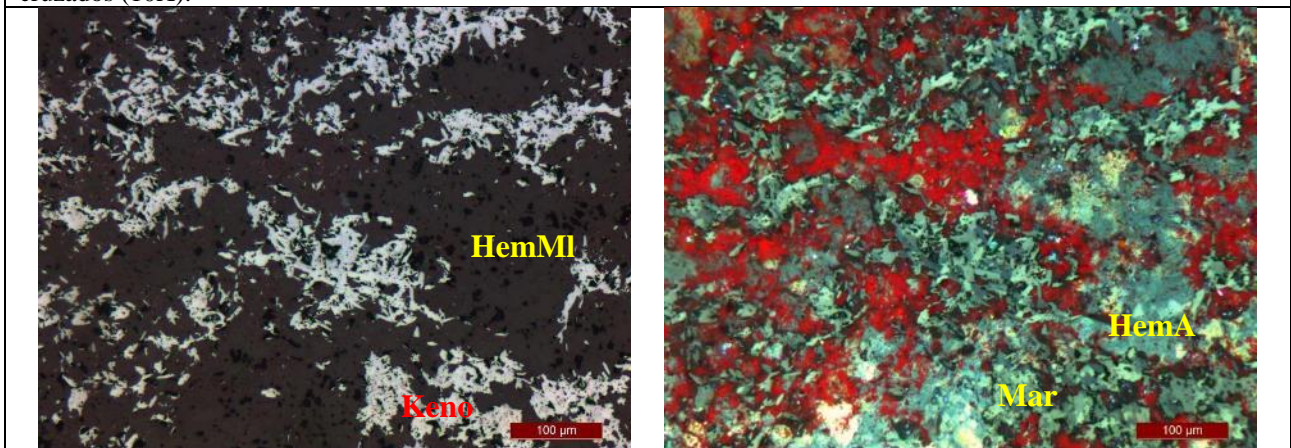




**Fotomicrografia 2:** Aglomerados e filete de quartzo venular (QtzV) com textura radial na banda milimétrica microdobrada da porção sudeste. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).

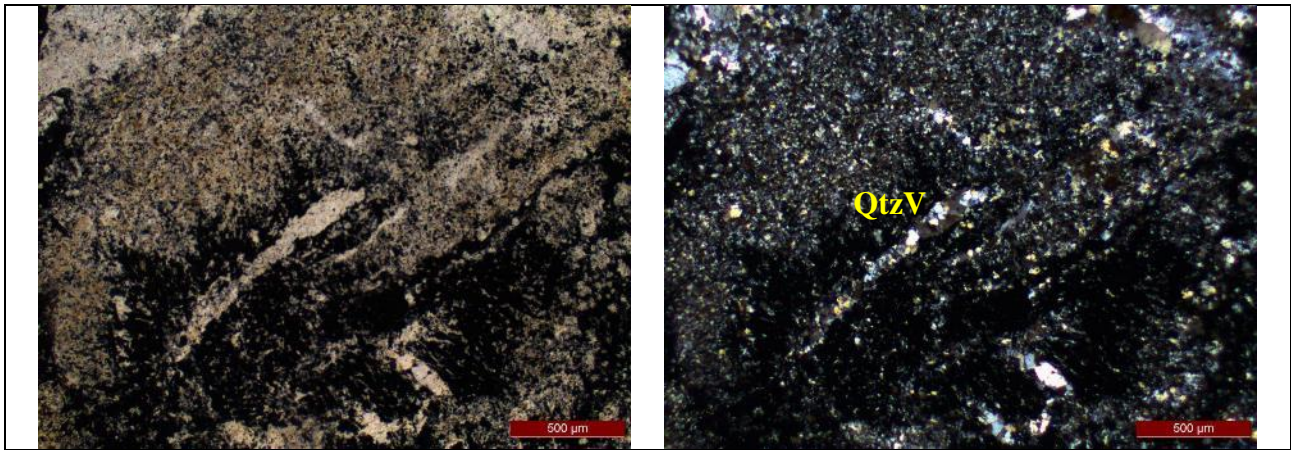


**Fotomicrografia 3:** Martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), e hematita microlamelar (HemMI) com certa orientação na banda milimétrica microdobrada de opacos da porção noroeste. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).

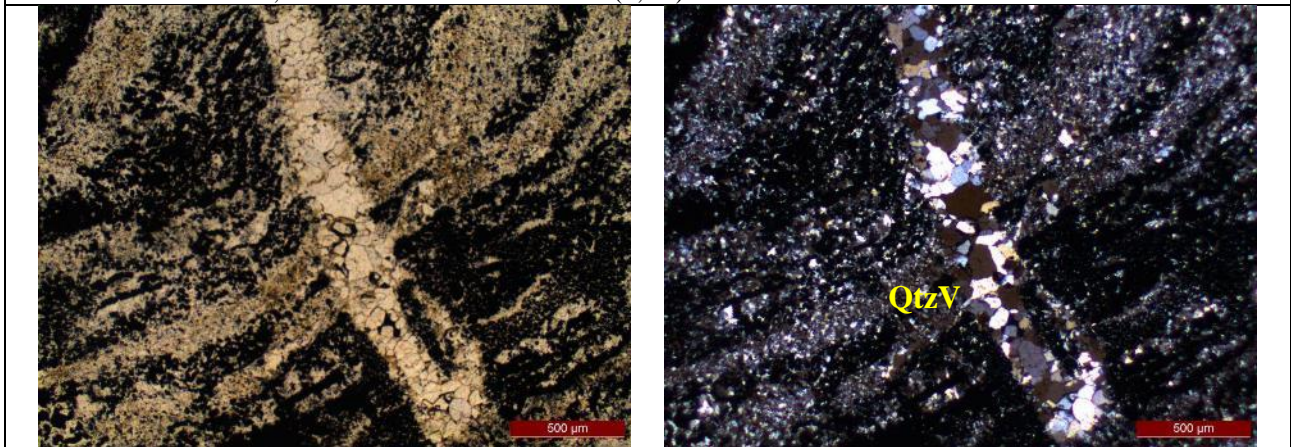


**Fotomicrografia 4:** Hematita anédrica (HemA) com bordas irregulares e contatos interlobados, martita (Mar) com relictos de kenomagnetita (Keno), e hematita microlamelar (HemMI) com certa orientação na pseudobanda milimétrica da porção central. Luz refletida, nicóis descruzados e cruzados (10X).





**Fotomicrografia 5:** Finos aglomerados e filetes de quartzo venular (QtzV) na pseudobanda milimétrica da porção central. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).



**Fotomicrografia 6:** Vênula de quartzo venular (QtzV) com textura radial cortando as bandas milimétricas microdobradas. Luz transmitida, nicóis descruzados e cruzados (2,5X).



## ANEXO F

---

“Supplementary Data” para o artigo  
“Hydrothermal genesis of the locally  
sulfidized itabirite-hosted Minerita iron  
mineralization, southwestern Serra do Curral  
Range, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais”

---

## Appendix A

---



**Table 1A:** Recuperation data for primary standard (BHVO-2) for all elements analyzed in the iron oxides from quartz itabirite (QI).

Elements	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	Mean	$\sigma$	RSD (%)
Na <sup>23</sup>	17227.11	15903.29	16252.20	15461.14	16894.96	17280.26	16503.16	747.01	4.53	
Mg <sup>24</sup>	45021.00	41265.65	45363.10	41235.97	45322.62	44945.41	43858.96	2026.86	4.62	
Al <sup>27</sup>	75889.93	68217.76	71996.38	68582.57	70923.14	77708.27	72219.68	3861.87	5.35	
Si <sup>29</sup>	251708.36	217211.92	235159.97	224425.03	236942.70	241342.44	234465.07	12245.20	5.22	
P <sup>31</sup>	1227.41	1146.97	1234.76	1139.42	1241.07	1229.96	1203.27	46.82	3.89	
K <sup>39</sup>	4651.66	4079.95	4208.14	3899.94	4327.58	4933.57	4350.14	381.49	8.77	
Ca <sup>42</sup>	94417.55	76813.16	74089.56	93425.63	67995.06	85615.80	82059.46	10801.95	13.16	
Sc <sup>45</sup>	34.17	31.36	33.83	32.67	32.57	34.07	33.11	1.11	3.34	
Ti <sup>49</sup>	16808.83	15430.47	16935.43	15037.94	16435.60	18050.93	16449.87	1091.87	6.64	
V <sup>51</sup>	322.30	310.24	320.07	305.55	313.61	337.22	318.17	11.19	3.52	
Cr <sup>53</sup>	286.13	267.77	288.37	279.24	278.72	282.47	280.45	7.27	2.59	
Mn <sup>55</sup>	1298.93	1257.39	1321.58	1261.79	1279.48	1339.84	1293.17	33.08	2.56	
Co <sup>59</sup>	47.18	42.98	45.24	44.83	44.49	46.00	45.12	1.42	3.15	
Ni <sup>60</sup>	110.91	116.69	133.84	74.91	55.02	271.44	127.14	76.38	60.08	
Zn <sup>66</sup>	105.43	97.91	106.51	107.30	98.41	103.81	103.23	4.10	3.97	
Ga <sup>71</sup>	22.53	20.30	22.62	21.03	21.47	22.86	21.80	1.03	4.71	
As <sup>75</sup>	0.521	0.438	0.548	0.530	0.457	0.520	0.502	0.044	8.771	
Sr <sup>88</sup>	408.35	387.85	393.81	375.57	408.48	408.88	397.16	13.82	3.48	
Y <sup>89</sup>	27.87	23.95	26.75	25.24	26.13	26.88	26.14	1.38	5.28	
Zr <sup>90</sup>	178.40	162.03	177.84	170.54	169.77	176.81	172.57	6.37	3.69	
Nb <sup>93</sup>	18.41	17.47	18.23	17.72	17.20	19.49	18.09	0.82	4.56	
Mo <sup>97</sup>	4.07	3.50	3.88	3.81	3.79	3.81	3.81	0.18	4.83	
La <sup>139</sup>	15.46	14.40	15.26	14.79	14.66	15.73	15.05	0.51	3.41	
Ce <sup>140</sup>	37.89	37.49	38.76	37.30	37.58	39.36	38.06	0.82	2.15	
Pr <sup>141</sup>	5.41	5.29	5.37	5.27	5.16	5.71	5.37	0.19	3.51	
Nd <sup>146</sup>	25.68	23.97	25.58	24.37	23.99	27.21	25.13	1.27	5.05	
Sm <sup>147</sup>	6.59	6.09	5.96	5.88	6.40	6.43	6.23	0.29	4.62	
Eu <sup>153</sup>	2.25	1.94	2.06	1.92	2.03	2.36	2.09	0.18	8.39	
Gd <sup>157</sup>	6.59	6.02	6.34	6.25	6.08	6.67	6.33	0.26	4.17	
Tb <sup>159</sup>	1.00	0.87	0.91	0.91	0.86	1.03	0.93	0.07	7.36	
Dy <sup>163</sup>	5.64	4.78	5.57	5.14	5.02	5.82	5.33	0.41	7.64	
Ho <sup>165</sup>	1.060	1.012	1.049	1.110	1.024	0.984	1.040	0.044	4.204	
Er <sup>166</sup>	2.57	2.45	2.69	2.40	2.67	2.63	2.57	0.12	4.65	
Tm <sup>169</sup>	0.391	0.312	0.330	0.342	0.320	0.368	0.344	0.030	8.807	
Yb <sup>172</sup>	1.83	2.07	2.11	1.90	1.95	2.20	2.01	0.14	6.96	
Lu <sup>175</sup>	0.341	0.275	0.240	0.266	0.289	0.297	0.285	0.034	11.945	
Hf <sup>178</sup>	4.30	3.72	4.40	3.63	4.23	4.55	4.14	0.38	9.08	
Ta <sup>181</sup>	1.58	1.26	1.41	1.37	1.37	1.48	1.41	0.11	7.73	
W <sup>182</sup>	0.239	0.240	0.197	0.280	0.270		0.245	0.032	13.238	
Re <sup>185</sup>										
Pb <sup>208</sup>	1.686	1.710	1.705	1.670	1.650	1.810	1.705	0.056	3.282	
Bi <sup>209</sup>	0.0096	0.0092	0.0111	0.0133	0.0088	0.0083	0.0101	0.0019	18.4630	
Th <sup>232</sup>	1.253	1.180	1.174	1.180	1.150	1.290	1.205	0.054	4.511	
U <sup>238</sup>	0.420	0.378	0.413	0.440	0.375	0.398	0.404	0.025	6.248	

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; **RSD > 10 % don't recommended.**

**Table 2A:** Recuperation data for secondary standard (BCR-2) for all elements analyzed in the iron oxides from quartz itabirite (QI).

Elements	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	Mean	$\sigma$	RSD (%)	CV (ppm)	TR (%)
Na <sup>23</sup>	24365.88	21900.15	24779.66	22328.37	22654.00	24204.66	23372.12	1219.32	5.22	23400.00	99.88	
Mg <sup>24</sup>	24743.28	20650.00	22943.35	20410.13	20467.19	21252.55	21744.42	1748.25	8.04	21600.00	100.67	
Al <sup>27</sup>	83842.48	77246.85	82956.34	78392.19	76338.69	79850.24	79771.13	3058.85	3.83	71400.00	111.72	
Si <sup>29</sup>	278652.31	272372.66	284544.97	274494.97	261015.44	268556.44	273272.80	8133.78	2.98	253000.00	108.01	
P <sup>31</sup>	1313.49	1218.75	1186.05	1144.36	1104.72	1158.97	1187.72	72.64	6.12	1500.00	79.18	
K <sup>39</sup>	4375.23	4031.18	4684.56	4717.12	4188.31	4664.87	4443.55	290.44	6.54	14900.00	29.82	
Ca <sup>42</sup>	61518.80	54238.00	76990.07	53793.58	58985.26	69442.42	62494.69	9116.33	14.59	50900.00	122.78	
Sc <sup>45</sup>	41.42	37.64	39.83	34.79	35.28	39.70	38.11	2.67	7.01	33.00	115.48	
Ti <sup>49</sup>	16609.95	14698.45	15905.78	14050.99	14661.25	14651.56	15096.33	957.54	6.34	13500.00	111.82	
V <sup>51</sup>	478.42	440.70	458.03	380.43	429.37	421.10	434.68	33.62	7.73	416.00	104.49	
Cr <sup>53</sup>	17.34	24.17	23.38	22.25	23.38	22.44	21.48	2.62	12.21	18.00	119.31	
Mn <sup>55</sup>	1582.11	1522.10	1594.08	1475.90	1489.95	1470.29	1522.41	54.10	3.55	1520.00	100.16	
Co <sup>59</sup>	37.71	36.90	36.86	37.19	39.48	38.76	37.82	1.08	2.85	37.00	102.21	
Ni <sup>60</sup>	146.25	138.41	116.71	218.42	47.77	61.28	121.47	62.25	51.25	13.00	934.41	
Zn <sup>66</sup>	146.81	131.51	142.18	135.01	127.91	130.42	135.64	7.38	5.44	127.00	106.80	
Ga <sup>71</sup>	26.54	23.66	25.28	23.92	24.29	24.27	24.66	1.07	4.35	23.00	107.22	
As <sup>75</sup>	1.00	0.78	0.96	0.70	0.70	0.48	0.77	0.19	24.85	1.12	68.75	
Sr <sup>88</sup>	371.75	349.14	362.70	353.93	349.23	347.03	355.63	9.69	2.73	346.00	102.78	
Y <sup>89</sup>	44.38	40.64	43.03	37.32	40.73	38.49	40.77	2.66	6.51	37.00	110.18	
Zr <sup>90</sup>	227.81	208.94	217.55	206.52	200.30	187.65	208.13	13.86	6.66	188.00	110.71	
Nb <sup>93</sup>	14.54	13.82	14.58	12.06	12.94	12.21	13.36	1.12	8.39	12.50	106.87	
Mo <sup>97</sup>	145.76	135.83	145.53	113.62	129.39	115.72	130.98	14.07	10.75	248.00	52.81	
La <sup>139</sup>	29.52	26.32	26.77	24.07	25.01	23.68	25.90	2.15	8.30	25.00	103.58	
Ce <sup>140</sup>	60.13	54.89	58.26	48.44	54.14	53.05	54.82	4.11	7.49	53.00	103.43	
Pr <sup>141</sup>	7.78	7.05	7.15	6.43	7.02	6.80	7.04	0.44	6.32	6.80	103.50	
Nd <sup>146</sup>	34.36	28.79	33.81	29.29	32.62	30.22	31.52	2.39	7.59	28.00	112.55	
Sm <sup>147</sup>	7.49	7.01	7.68	7.45	7.81	7.68	7.52	0.28	3.77	6.70	112.24	
Eu <sup>153</sup>	2.44	2.13	2.33	2.13	2.26	2.28	2.26	0.12	5.29	2.00	113.08	
Gd <sup>157</sup>	9.08	7.58	8.77	7.50	7.87	7.81	8.10	0.66	8.14	6.80	119.14	
Tb <sup>159</sup>	1.39	1.12	1.22	1.01	0.98	1.12	1.14	0.15	13.14	1.07	106.54	
Dy <sup>163</sup>	7.61	6.77	7.22	6.22	7.14	7.38	7.06	0.50	7.02	6.44	109.58	
Ho <sup>165</sup>	1.73	1.59	1.68	1.45	1.44	1.37	1.54	0.15	9.40	1.33	116.04	
Er <sup>166</sup>	4.67	3.72	4.61	3.61	3.90	3.90	4.07	0.46	11.23	3.70	109.95	
Tm <sup>169</sup>	0.626	0.568	0.713	0.550	0.550	0.490	0.583	0.077	13.246	0.540	107.932	
Yb <sup>172</sup>	4.42	3.73	4.02	3.40	3.34	3.48	3.73	0.42	11.27	3.50	106.62	
Lu <sup>175</sup>	0.660	0.594	0.630	0.520	0.560	0.670	0.606	0.059	9.696	0.510	118.758	
Hf <sup>178</sup>	5.67	5.10	5.65	4.66	5.10	4.39	5.10	0.51	10.10	4.80	106.15	
Ta <sup>181</sup>	1.26	1.06	1.22	0.95	1.08	0.90	1.08	0.14	13.22	0.78	138.25	
W <sup>182</sup>	0.56	0.53	0.59	0.80	0.63	0.39	0.58	0.13	22.99	0.50	116.67	
Re <sup>185</sup>												
Pb <sup>208</sup>	9.81	8.98	10.01	8.85	9.02	9.03	9.28	0.49	5.32	11.00	84.39	
Bi <sup>209</sup>	0.0142	0.0158	0.0158	0.0122	0.0135	0.0104	0.0137	0.0021	15.4490	0.0500	27.3000	
Th <sup>232</sup>	6.81	6.32	7.18	6.41	6.30	6.42	6.57	0.35	5.33	6.20	106.02	
U <sup>238</sup>	1.55	1.58	1.78	1.35	1.47	1.57	1.55	0.14	9.15	1.69	91.72	

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; CV = certificated values; TR = total recuperation; TR = values out of 80 to 120.

**Table 3A:** Recuperation data for “in house” standard (HM5-F1) for all elements analyzed in the iron oxides from quartz itabirite (QI).

Elements	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	Mean	$\sigma$	RSD (%)	OV England (ppm)	TR (%)
Na <sup>23</sup>											
Mg <sup>24</sup>	32.13	34.04	33.74	33.53	37.14	33.66	34.04	1.66	4.87		
Al <sup>27</sup>	305.24	286.19	282.42	281.48	274.63	273.87	283.97	11.45	4.03	507.53	55.95
Si <sup>29</sup>	10182.20	6959.80	9054.82	3661.47	637.51		6099.16	3934.46	64.51		
P <sup>31</sup>											
K <sup>39</sup>		276.42	276.79				276.61	0.26	0.09		
Ca <sup>42</sup>		10608.59	4198.72	6863.37			7223.56	3220.08	44.58		
Sc <sup>45</sup>	2.31	2.33	1.86	1.73	3.03	2.27	2.26	0.46	20.24	3.12	72.28
Ti <sup>49</sup>	15374.99	15909.59	15394.76	14917.63	15336.39	13799.83	15122.20	720.36	4.76	14627.85	103.38
V <sup>51</sup>	679.99	661.53	631.60	563.68	622.53	537.42	616.13	55.44	9.00	629.50	97.88
Cr <sup>53</sup>	258.11	275.93	311.95	306.14	285.14	299.51	289.46	20.34	7.03	993.00	29.15
Mn <sup>55</sup>	10.57	11.58	13.75	11.35	12.64	16.34	12.71	2.10	16.50	8.69	146.20
Co <sup>59</sup>	5.46	5.48	5.89	5.81	6.16	6.06	5.81	0.29	5.01	5.81	100.00
Ni <sup>60</sup>	173.37	173.43	94.99	122.06	62.71	55.21	113.63	52.09	45.85	46.80	242.80
Zn <sup>66</sup>	12.10	12.12	13.68	11.54	11.72	12.50	12.28	0.77	6.23	10.26	119.66
Ga <sup>71</sup>	8.68	8.63	8.45	8.19	8.49	7.98	8.40	0.27	3.20	9.01	93.27
As <sup>75</sup>				0.266			0.266				
Sr <sup>88</sup>	1.79	1.79	1.77	1.59	2.02	1.63	1.77	0.15	8.60		
Y <sup>89</sup>	0.203	0.298	0.163	0.237	0.194	0.195	0.215	0.047	21.877		
Zr <sup>90</sup>	1.10	0.76	0.98	1.11			0.99	0.16	16.48		
Nb <sup>93</sup>	0.291	0.348	0.344	0.289	0.330	0.321	0.321	0.026	7.969	0.270	118.704
Mo <sup>97</sup>	14.39	14.24	12.77	11.51	12.14	12.96	13.00	1.14	8.76		
La <sup>139</sup>	0.033				0.071		0.052	0.027	51.673		
Ce <sup>140</sup>		0.0284	0.0283		0.0205		0.0257	0.0045	17.6132		
Pr <sup>141</sup>	0.0105	0.0166		0.0172			0.0148	0.0037	25.1052		
Nd <sup>146</sup>				0.118			0.118				
Sm <sup>147</sup>	0.118						0.118				
Eu <sup>153</sup>	0.0249						0.0249				
Gd <sup>157</sup>		0.0310	0.0206				0.0258	0.0074	28.5035		
Tb <sup>159</sup>		0.0077			0.0114	0.0121	0.0104	0.0024	22.7338		
Dy <sup>163</sup>	0.038						0.038				
Ho <sup>165</sup>		0.0223		0.0135			0.0179	0.0062	34.7628		
Er <sup>166</sup>						0.035	0.035				
Tm <sup>169</sup>						0.0127	0.0127				
Yb <sup>172</sup>			0.058				0.058				
Lu <sup>175</sup>	0.0175		0.0155				0.0165	0.0014	8.5710		
Hf <sup>178</sup>											
Ta <sup>181</sup>	1.13	1.02	1.04	0.81	0.68	0.84	0.92	0.17	18.48	0.83	110.84
W <sup>182</sup>			0.1				0.1				
Re <sup>185</sup>											
Pb <sup>208</sup>	0.746	0.474	1.739	0.673	0.819	2.300	1.125	0.724	64.372	0.300	375.056
Bi <sup>209</sup>	0.0021		0.0023		0.0239	0.0028	0.0078	0.0108	138.3855		
Th <sup>232</sup>			0.0167				0.0167				
U <sup>238</sup>	0.0124	0.0085	0.0096			0.0125	0.0108	0.0020	18.7360		

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; OV = obtained values; TR = total recuperation; TR = values out of 80 to 120.



**Table 4A:** Recuperation data for primary standard (BHVO-2) for all elements analyzed in the iron oxides from quartz-veined quartz itabirite (QVQI).

Elements	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	Mean	$\sigma$	RSD (%)
Na <sup>23</sup>	15959.24	16670.49	16079.73	16976.10	17660.55	16329.32	16840.56	15541.06	16241.13	16477.58	632.34	3.84	
Mg <sup>24</sup>	43102.13	43755.41	43149.84	44016.22	45998.73	43378.70	44369.23	43065.42	42443.59	43697.70	1035.60	2.37	
Al <sup>27</sup>	71174.98	71207.76	70473.13	72546.46	75148.24	73125.80	71961.70	70875.07	69403.30	71768.49	1682.43	2.34	
Si <sup>29</sup>	225005.84	226207.70	231529.36	249764.70	247815.94	257905.97	234323.00	210796.59	227354.31	234522.60	14742.92	6.29	
P <sup>31</sup>	1198.18	1209.44	1151.74	1217.67	1279.43	1242.09	1139.14	1255.92	1137.36	1203.44	51.80	4.30	
K <sup>39</sup>	4105.12	4144.42	4533.03	4282.37	4481.29	4566.83	4450.09	4225.02	3983.20	4307.93	208.81	4.85	
Ca <sup>42</sup>	88108.92	68728.89	85190.70	82707.19	89067.16	84464.28	77586.22	80312.22	80406.43	81841.33	6172.34	7.54	
Sc <sup>45</sup>	33.23	31.78	32.95	33.47	35.40	34.05	32.57	32.36	31.81	33.07	1.15	3.48	
Ti <sup>49</sup>	16117.10	16460.01	16011.13	16537.39	16977.85	16357.54	16359.21	16367.03	15753.21	16326.72	346.81	2.12	
V <sup>51</sup>	304.09	310.27	328.61	328.64	327.58	322.16	316.17	312.82	308.50	317.65	9.40	2.96	
Cr <sup>53</sup>	285.21	292.26	270.49	271.45	281.42	261.74	294.74	290.31	272.75	280.04	11.47	4.10	
Mn <sup>55</sup>	1260.38	1283.92	1288.39	1317.28	1297.70	1370.13	1323.30	1251.93	1246.57	1293.29	39.51	3.05	
Co <sup>59</sup>	42.80	45.45	46.96	44.46	45.39	45.13	45.74	44.90	44.35	45.02	1.14	2.52	
Ni <sup>60</sup>	225.96	223.06	223.06	166.20	313.74	72.89	111.47	96.60	77.71	160.95	86.79	53.92	
Zn <sup>66</sup>	105.48	99.81	101.69	103.72	105.94	105.59	111.95	99.29	97.12	103.40	4.48	4.34	
Ga <sup>71</sup>	21.18	21.65	21.41	22.07	22.86	22.90	21.65	20.99	21.19	21.77	0.71	3.25	
As <sup>75</sup>	0.45	0.38	0.62	0.48	0.55	0.65	0.62	0.62	0.58	0.54	0.10	17.65	
Sr <sup>88</sup>	406.22	389.54	376.10	413.21	413.11	416.09	394.05	380.26	389.78	397.60	15.01	3.77	
Y <sup>89</sup>	25.50	25.70	25.54	27.84	27.36	26.64	26.47	24.80	25.13	26.11	1.03	3.95	
Zr <sup>90</sup>	167.56	173.07	166.38	180.34	180.60	184.52	179.61	161.37	162.77	172.91	8.67	5.01	
Nb <sup>93</sup>	17.44	18.07	17.39	19.32	19.65	18.54	18.03	17.37	17.11	18.10	0.90	5.00	
Mo <sup>97</sup>	3.75	3.82	3.67	4.04	3.84	4.02	3.88	3.55	3.76	3.81	0.16	4.10	
La <sup>139</sup>	14.89	14.88	14.47	15.68	15.65	16.15	15.04	13.67	15.32	15.08	0.74	4.87	
Ce <sup>140</sup>	38.06	37.90	36.54	38.92	39.70	40.13	38.51	36.89	36.57	38.14	1.31	3.44	
Pr <sup>141</sup>	5.42	5.26	5.17	5.47	5.65	5.59	5.48	4.98	5.34	5.37	0.21	3.93	
Nd <sup>146</sup>	24.81	24.47	24.14	27.21	26.15	26.67	25.31	22.90	24.77	25.16	1.34	5.33	
Sm <sup>147</sup>	6.43	5.98	5.91	6.58	6.30	6.67	6.70	5.73	5.90	6.24	0.37	5.95	
Eu <sup>153</sup>	2.19	2.06	2.04	2.04	2.04	1.97	2.03	2.13	2.14	2.07	0.07	3.42	
Gd <sup>157</sup>	6.61	6.30	6.17	6.29	5.87	6.27	6.92	5.83	6.61	6.32	0.35	5.59	
Tb <sup>159</sup>	0.972	0.875	0.932	0.900	0.890	0.930	1.050	0.860	0.910	0.924	0.058	6.250	
Dy <sup>163</sup>	5.26	5.11	5.43	5.37	5.52	5.09	5.48	5.30	5.03	5.29	0.18	3.38	
Ho <sup>165</sup>	1.08	1.00	0.99	1.08	1.05	1.22	1.13	0.91	1.01	1.05	0.09	8.52	
Er <sup>166</sup>	3.07	2.40	2.33	2.47	2.56	2.70	2.47	2.59	2.60	2.58	0.22	8.40	
Tm <sup>169</sup>	0.331	0.342	0.349	0.323	0.369	0.327	0.388	0.303	0.343	0.342	0.025	7.406	
Yb <sup>172</sup>	2.11	2.01	2.00	1.76	1.82	2.13	2.39	1.89	1.96	2.01	0.19	9.39	
Lu <sup>175</sup>	0.314	0.261	0.255	0.300	0.287	0.306	0.252	0.253	0.312	0.282	0.027	9.507	
Hf <sup>178</sup>	4.07	4.37	4.02	4.00	3.98	3.83	4.36	4.02	4.26	4.10	0.19	4.54	
Ta <sup>181</sup>	1.34	1.46	1.39	1.39	1.34	1.51	1.27	1.32	1.57	1.40	0.10	6.93	
W <sup>182</sup>	0.35	0.22	0.43	0.20	0.20	0.29	0.42	0.42	0.32	0.10	30.87		
Re <sup>185</sup>													
Pb <sup>208</sup>	1.82	1.73	1.66	1.63	1.68	1.51	1.83	1.62	1.87	1.71	0.12	6.88	
Bi <sup>209</sup>	0.0092	0.0122	0.0094	0.0083	0.0099	0.0075	0.0117	0.0115	0.0087	0.0098	0.0016	16.7041	
Th <sup>232</sup>	1.18	1.18	1.21	1.29	1.21	1.18	1.27	1.05	1.29	1.21	0.07	6.19	
U <sup>238</sup>	0.406	0.407	0.414	0.391	0.404	0.367	0.431	0.387	0.425	0.404	0.020	4.884	

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; **RSD > 10 % don't recommended.**

**Table 5A:** Recuperation data for secondary standard (BCR-2) for all elements analyzed in the iron oxides from quartz-veined quartz itabirite (QVQI).

Elements	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	Mean	$\sigma$	RSD (%)	CV (ppm)	TR (%)
Na <sup>23</sup>	24177.58	25283.56	24625.22	26028.00	26438.74	23646.30	24870.30	22878.06	22495.76	24493.72	1338.86	5.47	23400.00	104.67	
Mg <sup>24</sup>	21877.70	22109.44	22129.02	23375.53	24571.42	21422.53	23563.88	20729.91	20002.35	22197.98	1439.53	6.48	21600.00	102.77	
Al <sup>27</sup>	76246.59	77017.90	75429.55	83905.58	81306.84	78162.28	81470.97	77593.50	71936.26	78118.83	3628.68	4.65	71400.00	109.41	
Si <sup>29</sup>	255323.94	238123.56	257957.61	301017.88	278042.41	284523.53	291969.78	266668.88	255573.72	269911.26	20359.43	7.54	253000.00	106.68	
P <sup>31</sup>	1159.80	1158.21	1219.05	1352.36	1284.54	1278.92	1224.12	1118.79	1025.64	1202.38	98.64	8.20	1500.00	80.16	
K <sup>39</sup>	4026.89	4635.00	4378.63	5456.24	4548.05	4317.31	4802.87	4364.27	3918.20	4494.16	454.86	10.12	14900.00	30.16	
Ca <sup>42</sup>	51170.13	52943.65	47135.23	65851.95	55527.65	50261.56	38342.53	57895.50	54469.48	52621.96	7553.88	14.35	50900.00	103.38	
Sc <sup>45</sup>	37.92	38.42	38.84	40.40	41.83	37.35	41.30	38.12	39.62	39.31	1.57	4.00	33.00	119.12	
Ti <sup>49</sup>	14663.44	14490.40	14595.45	15077.79	16101.08	14290.43	14995.12	14392.21	13685.47	14699.04	665.28	4.53	13500.00	108.88	
V <sup>51</sup>	452.34	448.21	468.78	487.44	461.45	458.52	460.36	436.09	424.99	455.35	18.15	3.99	416.00	109.46	
Cr <sup>53</sup>	20.32	20.98	12.47	20.37	20.98	30.39	25.76	7.77	23.90	20.55	6.80	33.09	18.00	114.16	
Mn <sup>55</sup>	1508.65	1501.30	1573.81	1544.63	1520.08	1473.73	1594.81	1498.32	1522.02	1526.37	38.45	2.52	1520.00	100.42	
Co <sup>59</sup>	37.63	40.79	39.79	40.25	37.34	38.34	43.35	39.99	40.33	39.76	1.84	4.62	37.00	107.45	
Ni <sup>60</sup>	228.96	144.12	159.60	99.19	105.84	89.66	103.89	84.59	52.26	118.68	52.04	43.85	13.00	912.91	
Zn <sup>66</sup>	134.55	140.76	140.72	145.96	133.16	128.52	135.83	135.37	131.82	136.30	5.33	3.91	127.00	107.32	
Ga <sup>71</sup>	24.32	23.39	26.10	26.49	25.23	24.57	24.03	24.81	25.13	24.90	0.98	3.92	23.00	108.25	
As <sup>75</sup>	0.87	0.84	0.92	1.03	1.00	1.14	0.86	0.94	0.79	0.93	0.11	11.71	1.12	83.23	
Sr <sup>88</sup>	341.58	348.06	374.22	374.23	362.49	353.43	369.14	348.06	351.94	358.13	12.22	3.41	346.00	103.51	
Y <sup>89</sup>	39.96	40.52	40.52	41.69	38.79	38.07	41.32	39.05	41.46	40.15	1.28	3.19	37.00	108.52	
Zr <sup>90</sup>	206.42	213.36	214.30	220.78	211.77	202.53	217.54	194.17	220.58	211.27	8.82	4.18	188.00	112.38	
Nb <sup>93</sup>	13.32	13.94	13.93	14.15	13.50	13.27	13.88	13.16	13.73	13.65	0.35	2.57	12.50	109.23	
Mo <sup>97</sup>	145.09	141.52	153.92	145.55	139.86	132.29	142.39	137.68	138.24	141.84	6.08	4.29	248.00	57.19	
La <sup>139</sup>	27.18	27.32	27.43	29.55	27.52	25.78	27.47	25.05	25.96	27.03	1.31	4.84	25.00	108.12	
Ce <sup>140</sup>	55.02	57.66	58.40	62.52	56.38	52.79	55.85	53.90	54.88	56.38	2.89	5.13	53.00	106.37	
Pr <sup>141</sup>	7.05	7.28	7.71	7.65	7.46	6.67	7.24	7.12	7.16	7.26	0.32	4.40	6.80	106.76	
Nd <sup>146</sup>	30.19	31.62	31.95	31.48	30.88	32.02	32.71	31.29	31.18	31.48	0.72	2.30	28.00	112.43	
Sm <sup>147</sup>	7.42	7.39	7.97	7.79	6.86	6.68	7.67	7.76	8.02	7.51	0.47	6.27	6.70	112.04	
Eu <sup>153</sup>	2.12	2.30	2.24	2.48	2.21	1.98	2.17	2.16	2.01	2.19	0.15	6.89	2.00	109.28	
Gd <sup>157</sup>	8.40	7.89	8.58	8.05	7.34	7.19	8.07	7.63	7.59	7.86	0.47	5.93	6.80	115.59	
Tb <sup>159</sup>	1.26	1.13	1.19	1.24	1.08	1.09	1.27	1.13	1.18	1.17	0.07	6.10	1.07	109.76	
Dy <sup>163</sup>	7.04	7.73	7.25	7.34	7.54	6.70	7.26	6.79	7.08	7.19	0.33	4.61	6.44	111.68	
Ho <sup>165</sup>	1.52	1.67	1.70	1.65	1.52	1.44	1.64	1.59	1.55	1.59	0.09	5.38	1.33	119.30	
Er <sup>166</sup>	4.24	4.33	4.61	4.16	4.27	4.60	4.46	3.99	4.03	4.30	0.23	5.24	3.70	116.19	
Tm <sup>169</sup>	0.544	0.588	0.598	0.547	0.553	0.509	0.670	0.490	0.600	0.567	0.054	9.570	0.540	104.918	
Yb <sup>172</sup>	3.97	3.80	4.12	3.75	3.94	3.85	3.86	3.48	4.03	3.87	0.19	4.79	3.50	110.48	
Lu <sup>175</sup>	0.574	0.561	0.576	0.515	0.499	0.570	0.530	0.500	0.520	0.538	0.032	5.938	0.510	105.556	
Hf <sup>178</sup>	5.24	5.29	5.87	5.75	4.97	5.02	4.70	5.63	5.68	5.35	0.40	7.56	4.80	111.46	
Ta <sup>181</sup>	1.08	1.12	1.11	1.18	1.11	1.04	1.22	0.97	1.06	1.10	0.07	6.74	0.78	140.88	
W <sup>182</sup>	0.50	0.41	0.57	0.50	0.49	0.54	1.00	0.69	0.89	0.62	0.20	32.25	0.50	124.22	
Re <sup>185</sup>															
Pb <sup>208</sup>	9.45	10.04	10.28	9.09	8.99	8.44	9.05	7.88	7.37	8.95	0.94	10.55	11.00	81.40	
Bi <sup>209</sup>	0.0175	0.0174	0.0170	0.0155	0.0197	0.0143	0.0129	0.0160	0.0084	0.0154	0.0033	21.3107	0.0500	30.8222	
Th <sup>232</sup>	6.19	6.23	6.83	6.53	6.49	6.23	6.76	6.36	6.19	6.42	0.25	3.82	6.20	103.60	
U <sup>238</sup>	1.57	1.76	1.83	1.74	1.60	1.71	1.76	1.81	1.63	1.71	0.09	5.40	1.69	101.31	

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; CV = certificated values; TR = total recuperation; TR = values out of 80 to 120.

**Table 6A:** Recuperation data for “in house” standard (HM5-F1) for all elements analyzed in the iron oxides from quartz-veined quartz itabirite (QVQI).

Elements	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	Mean	$\sigma$	RSD (%)	OV England (ppm)	TR (%)
Na <sup>23</sup>	9.97	8.10	8.53	15.57	15.79	8.86		11.25	23.17	12.66	5.21	41.19			
Mg <sup>24</sup>	28.92	29.79	27.86	29.78	33.78	32.81	31.48	30.10	32.61	30.79	1.98	6.43			
Al <sup>27</sup>	260.84	263.28	258.20	291.83	271.21	283.64	272.26	278.02	287.39	274.07	12.01	4.38	507.53		54.00
Si <sup>29</sup>	1729.13		2727.81	4464.99	6675.73	7081.44		695.02	8833.02	4601.02	3038.61	66.04			
P <sup>31</sup>															
K <sup>39</sup>	212.24	231.92						306.38		250.18	49.66	19.85			
Ca <sup>42</sup>		7619.67	3596.65	9994.89	2215.35	11117.05	7854.70			7066.39	3506.66	49.62			
Sc <sup>45</sup>	1.85	3.64	3.41	3.87	3.57	4.36	3.75	2.48	2.61	3.28	0.80	24.33	3.12		105.20
Ti <sup>49</sup>	13379.53	13347.05	12970.28	12261.52	14181.83	14113.41	13125.29	12994.45	14086.82	13384.46	643.60	4.81	14627.85		91.50
V <sup>51</sup>	664.82	633.23	631.14	666.32	684.33	659.35	627.68	669.94	679.95	657.42	21.47	3.27	629.50		104.43
Cr <sup>53</sup>	512.30	591.69	580.67	782.85	766.37	773.71	675.95	735.39	579.98	666.55	102.51	15.38	993.00		67.12
Mn <sup>55</sup>	12.05	12.77	11.44	11.16	8.60	7.36	11.67	10.79	10.17	10.67	1.72	16.12	8.69		122.76
Co <sup>59</sup>	5.12	5.63	5.35	4.62	5.44	5.54	5.71	5.50	5.55	5.38	0.33	6.19	5.81		92.68
Ni <sup>60</sup>	136.27	160.45	163.62	137.46	150.97	150.76	106.47	79.06	96.00	131.23	30.24	23.04	46.80		280.40
Zn <sup>66</sup>	9.76	11.51	10.34	8.98	10.94	10.09	10.78			10.34	0.83	8.06	10.26		100.81
Ga <sup>71</sup>	8.36	8.88	8.03	8.31	8.87	9.06	8.03	8.78	9.17	8.61	0.43	5.05	9.01		95.56
As <sup>75</sup>		1.68		2.86	0.33				1.61	1.62	1.03	63.81			
Sr <sup>88</sup>	1.308	1.820	1.393	1.660	1.490	1.460	1.430	1.430	2.020	1.557	0.232	14.878			
Y <sup>89</sup>	0.193	0.467	0.186	0.177	0.182	0.234	0.269	0.250	0.352	0.257	0.097	37.726			
Zr <sup>90</sup>									1.47	1.47					
Nb <sup>93</sup>	0.528	0.524	0.438	0.235	0.526	0.485	0.525	0.564	0.601	0.492	0.106	21.645	0.270		182.140
Mo <sup>97</sup>	12.64	13.38	13.21	14.20	15.20	12.80	14.15	14.19	13.62	13.71	0.81	5.89			
La <sup>139</sup>		0.122		0.140			0.056	0.072	0.140	0.106	0.039	37.213			
Ce <sup>140</sup>		0.110		0.131				0.168	0.136	0.029	0.029	21.539			
Pr <sup>141</sup>		0.0272		0.0325				0.0243	0.168	0.0280	0.0042	14.8504			
Nd <sup>146</sup>	0.077		0.054							0.066	0.016	24.830			
Sm <sup>147</sup>															
Eu <sup>153</sup>	0.0136		0.0237					0.0239	0.0409	0.0255	0.0113	44.3568			
Gd <sup>157</sup>									0.1600	0.1600					
Tb <sup>159</sup>				0.0167				0.0229		0.0198	0.0044	22.1417			
Dy <sup>163</sup>				0.093		0.070				0.082	0.016	19.955			
Ho <sup>165</sup>			0.0169				0.0172			0.0171	0.0002	1.2442			
Er <sup>166</sup>															
Tm <sup>169</sup>							0.0266			0.0266					
Yb <sup>172</sup>		0.070						0.086		0.078	0.011	14.505			
Lu <sup>175</sup>	0.0105				0.0141	0.0074				0.0107	0.0034	31.4354			
Hf <sup>178</sup>															
Ta <sup>181</sup>	1.620	1.480	1.370	0.387	1.480	1.480	1.930	1.760	2.230	1.526	0.506	33.169	0.830		183.896
W <sup>182</sup>		1.10		0.31					0.25	0.55	0.47	85.73			
Re <sup>185</sup>															
Pb <sup>208</sup>	0.563	1.770	1.400	4.210	1.950	0.560	1.820	2.160	2.060	1.833	1.075	58.669	0.300		610.852
Bi <sup>209</sup>		0.2010	0.0018	0.0570	0.0017		0.0019	0.0021	0.0940	0.0514	0.0753	146.6687			
Th <sup>232</sup>		0.0820	0.0282	0.7500	0.0204				0.2320	0.2225	0.3069	137.9080			
U <sup>238</sup>	0.0059	0.2450	0.0215	0.4150	0.0078	0.0040	0.0273	0.0800	0.1200	0.1029	0.1410	136.9426			

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; OV = obtained values; TR = total recuperation; TR = values out of 80 to 120.



**Table 7A:** Recuperation data for primary standard (BHVO-2) for all elements analyzed in the iron oxides from itabirite breccia (IB).

Elements	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	Mean	$\sigma$	RSD (%)
Na <sup>23</sup>	16402.37	15940.86	16970.41	16000.32	16797.52	16450.67	16427.03	412.83	2.51	
Mg <sup>24</sup>	44121.77	43110.59	43515.95	43979.80	45075.00	42053.88	43642.83	1021.59	2.34	
Al <sup>27</sup>	71716.93	71209.32	72035.59	68607.02	74217.17	72644.51	71738.42	1851.46	2.58	
Si <sup>29</sup>	226179.75	249137.78	224224.44	235839.66	235123.94	228214.03	233119.93	9158.04	3.93	
P <sup>31</sup>	1230.25	1248.90	1115.26	1191.82	1311.71	1122.92	1203.48	76.03	6.32	
K <sup>39</sup>	4300.71	3886.71	4955.10	3413.13	4457.48	5142.98	4359.35	648.19	14.87	
Ca <sup>42</sup>	87416.64	72055.96	86236.90	73479.59	90033.82	82669.41	81982.05	7533.41	9.19	
Sc <sup>45</sup>	31.29	32.58	35.45	32.82	34.28	31.84	33.04	1.56	4.71	
Ti <sup>49</sup>	16114.02	16144.13	16681.04	16346.64	16509.93	16041.11	16306.15	251.84	1.54	
V <sup>51</sup>	329.90	307.15	314.82	302.68	334.33	317.37	317.71	12.42	3.91	
Cr <sup>53</sup>	291.09	267.98	281.82	269.07	288.72	284.15	280.47	9.82	3.50	
Mn <sup>55</sup>	1335.82	1230.21	1310.10	1282.76	1332.98	1260.61	1292.08	41.99	3.25	
Co <sup>59</sup>	46.12	44.33	44.57	43.46	46.42	45.39	45.05	1.13	2.51	
Ni <sup>60</sup>	96.59	135.20	126.19	128.64	111.45	114.41	118.75	14.05	11.83	
Zn <sup>66</sup>	105.13	103.88	100.18	97.80	101.64	110.61	103.21	4.47	4.33	
Ga <sup>71</sup>	21.45	21.77	21.91	21.45	22.16	21.51	21.71	0.29	1.34	
As <sup>75</sup>	0.59	0.36	0.55		1.04		0.64	0.29	45.36	
Sr <sup>88</sup>	405.62	385.51	397.07	397.58	399.32	391.67	396.13	6.87	1.73	
Y <sup>89</sup>	26.22	25.90	25.85	26.48	25.94	25.60	26.00	0.31	1.19	
Zr <sup>90</sup>	169.28	176.01	170.94	168.37	175.71	172.25	172.09	3.21	1.87	
Nb <sup>93</sup>	17.82	18.26	17.92	18.21	18.20	17.62	18.01	0.26	1.44	
Mo <sup>97</sup>	3.86	3.57	4.00	3.47	3.99	4.01	3.82	0.24	6.24	
La <sup>139</sup>	15.41	14.46	15.18	14.41	15.50	15.17	15.02	0.47	3.15	
Ce <sup>140</sup>	39.36	36.19	38.64	36.93	38.43	38.74	38.05	1.22	3.20	
Pr <sup>141</sup>	5.52	5.06	5.50	5.41	5.29	5.35	5.36	0.17	3.15	
Nd <sup>146</sup>	25.69	23.30	26.33	24.59	23.93	26.55	25.07	1.33	5.30	
Sm <sup>147</sup>	6.78	5.28	6.84	5.28	6.64	7.02	6.31	0.80	12.76	
Eu <sup>153</sup>	1.94	2.05	2.25	2.04	1.87	2.35	2.08	0.18	8.80	
Gd <sup>157</sup>	6.18	6.62	6.11	6.35	6.34	6.22	6.30	0.18	2.87	
Tb <sup>159</sup>	0.987	0.834	0.951	0.860	0.980	0.940	0.925	0.064	6.882	
Dy <sup>163</sup>	5.150	5.510	5.200	5.050	5.260	5.550	5.287	0.201	3.803	
Ho <sup>165</sup>	1.090	0.950	1.100	0.940	1.080	1.100	1.043	0.077	7.341	
Er <sup>166</sup>	2.630	2.520	2.530	2.570	2.800	2.310	2.560	0.160	6.240	
Tm <sup>169</sup>	0.315	0.318	0.399	0.390	0.294	0.310	0.338	0.045	13.293	
Yb <sup>172</sup>	2.23	1.85	1.92	2.09	1.76	2.21	2.01	0.20	9.72	
Lu <sup>175</sup>	0.292	0.253	0.299	0.219	0.390	0.260	0.286	0.059	20.587	
Hf <sup>178</sup>	4.12	4.28	3.86	4.19	4.16	3.95	4.09	0.16	3.85	
Ta <sup>181</sup>	1.48	1.31	1.42	1.30	1.65	1.33	1.42	0.13	9.53	
W <sup>182</sup>	0.27		0.26	0.30	0.20	0.18	0.24	0.05	20.74	
Re <sup>185</sup>										
Pb <sup>208</sup>	1.74	1.57	1.82	1.44	1.90	1.76	1.71	0.17	9.95	
Bi <sup>209</sup>	0.0066	0.0111	0.0112	0.0095	0.0120	0.0086	0.0098	0.0020	20.4674	
Th <sup>232</sup>	1.34	1.04	1.25	1.25	1.31	1.08	1.21	0.12	10.17	
U <sup>238</sup>	0.397	0.382	0.437	0.422	0.376	0.409	0.404	0.023	5.812	

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; **RSD > 10 % don't recommended.**

**Table 8A:** Recuperation data for secondary standard (BCR-2) for all elements analyzed in the iron oxides from itabirite breccia (IB).

Elements	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	Mean	$\sigma$	RSD (%)	CV (ppm)	TR (%)
Na <sup>23</sup>	23426.98	23072.76	25651.02	24815.68	24313.57	24256.00	1042.83	4.30	23400.00	103.66
Mg <sup>24</sup>	21533.08	21663.77	22929.13	22174.78	20527.41	21765.63	883.00	4.06	21600.00	100.77
Al <sup>27</sup>	75485.42	77725.38	81481.19	75209.41	75399.17	77060.11	2676.38	3.47	71400.00	107.93
Si <sup>29</sup>	248002.72	260296.67	296416.38	269406.81	251463.67	265117.25	19368.80	7.31	253000.00	104.79
P <sup>31</sup>	1066.44	1105.40	1278.66	1014.57	1121.86	1117.39	99.17	8.88	1500.00	74.49
K <sup>39</sup>	4216.42	4672.88	5285.76	4103.73	3666.35	4389.03	616.07	14.04	14900.00	29.46
Ca <sup>42</sup>	53396.13	63555.46	61833.19	35321.84	46806.54	52182.63	11588.09	22.21	50900.00	102.52
Sc <sup>45</sup>	35.63	35.94	38.56	39.98	35.53	37.13	2.02	5.45	33.00	112.51
Ti <sup>49</sup>	13950.22	14182.85	15650.08	14948.39	15038.53	14754.01	688.11	4.66	13500.00	109.29
V <sup>51</sup>	433.93	416.28	465.32	444.69	445.87	441.22	17.96	4.07	416.00	106.06
Cr <sup>53</sup>	19.51	15.89	18.16	36.08	18.84	21.70	8.16	37.59	18.00	120.53
Mn <sup>55</sup>	1474.70	1455.27	1642.41	1591.26	1467.71	1526.27	84.91	5.56	1520.00	100.41
Co <sup>59</sup>	38.78	40.81	43.87	39.27	43.06	41.16	2.25	5.48	37.00	111.24
Ni <sup>60</sup>	44.17	28.58	36.16	43.96	14.62	33.50	12.36	36.90	13.00	257.68
Zn <sup>66</sup>	132.57	137.20	136.36	147.56	138.81	138.50	5.56	4.01	127.00	109.06
Ga <sup>71</sup>	23.95	25.15	23.71	24.18	25.01	24.40	0.64	2.64	23.00	106.09
As <sup>75</sup>		0.66		0.78	1.11	0.85	0.23	27.41	1.12	75.89
Sr <sup>88</sup>	367.65	392.99	379.26	368.37	365.87	374.83	11.43	3.05	346.00	108.33
Y <sup>89</sup>	40.09	36.71	40.35	41.58	40.31	39.81	1.83	4.59	37.00	107.59
Zr <sup>90</sup>	211.26	197.70	209.93	227.11	207.48	210.70	10.60	5.03	188.00	112.07
Nb <sup>93</sup>	13.59	13.25	14.40	14.43	13.16	13.77	0.61	4.46	12.50	110.13
Mo <sup>97</sup>	124.82	126.98	147.61	148.93	154.18	140.50	13.58	9.66	248.00	56.65
La <sup>139</sup>	24.94	24.62	28.15	27.35	26.95	26.40	1.55	5.86	25.00	105.61
Ce <sup>140</sup>	55.04	55.79	60.08	58.93	56.40	57.25	2.15	3.76	53.00	108.02
Pr <sup>141</sup>	7.15	7.36	7.40	7.24	7.11	7.25	0.13	1.75	6.80	106.65
Nd <sup>146</sup>	28.69	28.81	31.34	30.63	31.21	30.14	1.29	4.29	28.00	107.63
Sm <sup>147</sup>	7.62	7.21	8.05	7.78	7.26	7.58	0.35	4.67	6.70	113.19
Eu <sup>153</sup>	2.23	2.33	2.46	2.26	2.10	2.28	0.13	5.82	2.00	113.80
Gd <sup>157</sup>	8.23	8.52	9.52	7.18	8.04	8.30	0.85	10.20	6.80	122.03
Tb <sup>159</sup>	1.12	1.15	1.34	1.05	1.10	1.15	0.11	9.65	1.07	107.66
Dy <sup>163</sup>	6.55	7.19	7.28	7.01	6.37	6.88	0.40	5.82	6.44	106.83
Ho <sup>165</sup>	1.51	1.67	1.55	1.56	1.69	1.60	0.08	4.97	1.33	120.00
Er <sup>166</sup>	3.85	3.82	4.59	3.97	4.14	4.07	0.31	7.72	3.70	110.11
Tm <sup>169</sup>	0.600	0.610	0.479	0.550	0.730	0.594	0.092	15.515	0.540	109.963
Yb <sup>172</sup>	3.59	3.41	3.47	3.38	3.38	3.45	0.09	2.57	3.50	98.46
Lu <sup>175</sup>	0.59	0.69	0.71	0.66	0.60	0.65	0.05	8.21	0.51	127.45
Hf <sup>178</sup>	5.02	5.67	5.31	5.32	4.69	5.20	0.37	7.06	4.80	108.38
Ta <sup>181</sup>	0.99	1.32	1.13	1.05	0.87	1.07	0.17	15.67	0.78	137.44
W <sup>182</sup>	0.88	0.66	0.56	0.39	0.34	0.57	0.22	38.46	0.50	113.20
Re <sup>185</sup>										
Pb <sup>208</sup>	10.29	10.18	9.75	9.34	9.80	9.87	0.38	3.83	11.00	89.75
Bi <sup>209</sup>	0.0169	0.0239	0.0171	0.0230	0.0196	0.0201	0.0033	16.1864	0.0500	40.2000
Th <sup>232</sup>	6.00	7.18	6.07	6.08	6.63	6.39	0.51	7.95	6.20	103.10
U <sup>238</sup>	1.49	1.79	1.49	1.33	1.34	1.49	0.19	12.49	1.69	88.05

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; CV = certificated values; TR = total recuperation; TR = values out of 80 to 120.

**Table 9A:** Recuperation data for “in house” standard (HM5-F1) for all elements analyzed in the iron oxides from itabirite breccia (IB).

Elements	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	Mean	$\sigma$	RSD (%)	OV England (ppm)	TR (%)
Na <sup>23</sup>	15.04	23.98	4.73		46.51	27.95	23.64	15.60	65.98		
Mg <sup>24</sup>	32.86	34.79	31.92	36.91	37.55	34.89	34.82	2.19	6.30		
Al <sup>27</sup>	352.43	340.02	365.45	407.53	629.62	389.38	414.07	108.41	26.18	507.53	81.59
Si <sup>29</sup>	5974.39	11496.11	13376.86	1088.58	25741.83	25044.37	13787.02	9973.46	72.34		
P <sup>31</sup>											
K <sup>39</sup>											
Ca <sup>42</sup>		6157.84	2339.68		33214.34		13903.95	16831.90	121.06		
Sc <sup>45</sup>	1.89	3.80	3.52	2.55	4.32	0.85	2.82	1.31	46.26	3.12	90.44
Ti <sup>49</sup>	14848.58	15003.18	14844.51	15804.49	17172.70	15294.39	15494.64	898.17	5.80	14627.85	105.93
V <sup>51</sup>	631.40	644.88	644.36	660.35	675.36	622.12	646.41	19.26	2.98	629.50	102.69
Cr <sup>53</sup>	286.78	299.91	309.24	262.89	225.79	272.00	276.10	30.01	10.87	993.00	27.80
Mn <sup>55</sup>	10.29	9.90	7.75	10.76	14.67	15.58	11.49	3.01	26.20	8.69	132.24
Co <sup>59</sup>	6.02	5.94	5.99	5.53	5.12	5.50	5.68	0.36	6.33	5.81	97.82
Ni <sup>60</sup>	46.31	61.68	49.97	43.35	68.77	52.84	53.82	9.67	17.96	46.80	115.00
Zn <sup>66</sup>	13.16	12.39	11.58	12.47	12.35	11.68	12.27	0.58	4.72	10.26	119.61
Ga <sup>71</sup>	8.83	8.50	8.10	8.08	8.18	8.28	8.33	0.29	3.48	9.01	92.43
As <sup>75</sup>			0.26	0.75			0.51	0.35	68.61		
Sr <sup>88</sup>	1.507	1.600	1.513	1.318	1.174	1.335	1.408	0.159	11.270		
Y <sup>89</sup>	0.225	0.182	0.218	0.210	0.221	0.160	0.203	0.026	12.812		
Zr <sup>90</sup>											
Nb <sup>93</sup>	0.310	0.227	0.267	0.327	0.266	0.263	0.277	0.036	13.037	0.270	102.469
Mo <sup>97</sup>	13.10	12.91	13.50	14.03	13.50	13.75	13.47	0.41	3.05		
La <sup>139</sup>				0.117			0.117				
Ce <sup>140</sup>											
Pr <sup>141</sup>											
Nd <sup>146</sup>	0.234				0.330		0.282	0.068	24.072		
Sm <sup>147</sup>	0.1960				1.2100	0.4400	0.6153	0.5292	86.0103		
Eu <sup>153</sup>			0.073				0.073				
Gd <sup>157</sup>					0.185		0.185				
Tb <sup>159</sup>	0.0095		0.0144		0.0220		0.0153	0.0063	41.1661		
Dy <sup>163</sup>				0.134	0.135	0.095	0.121	0.023	18.800		
Ho <sup>165</sup>	0.0136			0.0450	0.0360		0.0315	0.0162	51.2775		
Er <sup>166</sup>			0.109			0.089	0.099	0.014	14.285		
Tm <sup>169</sup>			0.0388			0.0480	0.0434	0.0065	14.9894		
Yb <sup>172</sup>											
Lu <sup>175</sup>			0.0265				0.0265				
Hf <sup>178</sup>											
Ta <sup>181</sup>	0.82	0.94	0.83	0.78	0.75	0.66	0.80	0.09	11.69	0.83	95.98
W <sup>182</sup>											
Re <sup>185</sup>											
Pb <sup>208</sup>	1.79	1.78	0.73	0.84	0.12	2.02	1.21	0.76	62.60	0.30	404.22
Bi <sup>209</sup>		0.0046	0.0032				0.0039	0.0010	25.3833		
Th <sup>232</sup>			0.0100	0.0240			0.0172	0.0070	41.0212		
U <sup>238</sup>		0.0090					0.0167	0.0042	63.2691		

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; OV = obtained values; TR = total recuperation; TR = values out of 80 to 120.



**Table 10A:** Recuperation data for primary standard (BHVO-2) for all elements analyzed in the iron oxides from massive high-grade iron ore (MIO).

Elements	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	Mean	$\sigma$	RSD (%)
Na <sup>23</sup>	16137.63	16225.13	16484.76	16246.91	16958.96	16410.68	332.38	2.03
Mg <sup>24</sup>	46490.23	41719.32	46304.52	42385.00	44879.38	44355.69	2205.82	4.97
Al <sup>27</sup>	79436.45	72321.95	77011.85	74551.32	75112.20	75686.75	2681.29	3.54
Si <sup>29</sup>	244505.67	240289.52	264062.31	231232.66	280778.91	252173.81	19988.48	7.93
P <sup>31</sup>	1242.47	1199.61	1249.57	1168.30	1293.67	1230.72	48.27	3.92
K <sup>39</sup>	5183.89	3783.70	4935.87	4199.00	4343.00	4489.09	566.88	12.63
Ca <sup>42</sup>	85234.16	84865.46	114174.23	89058.33	64510.34	87568.50	17709.59	20.22
Sc <sup>45</sup>	33.64	32.22	37.20	38.68	30.80	34.51	3.33	9.65
Ti <sup>49</sup>	18561.68	18617.00	17841.11	17354.47	18201.20	18115.09	527.35	2.91
V <sup>51</sup>	339.41	332.27	336.72	323.18	339.79	334.27	6.89	2.06
Cr <sup>53</sup>	243.67	239.91	263.51	282.89	239.30	253.86	19.02	7.49
Mn <sup>55</sup>	1339.93	1255.97	1302.99	1313.20	1288.22	1300.06	31.04	2.39
Co <sup>59</sup>	41.89	41.25	46.12	40.83	43.00	42.62	2.12	4.98
Ni <sup>60</sup>	28.84		89.41	87.67	118.37	81.07	37.56	46.33
Zn <sup>66</sup>	96.21	94.70	100.71	100.51	99.96	98.42	2.77	2.82
Ga <sup>71</sup>	21.23	20.70	21.70	20.79	21.64	21.21	0.46	2.19
As <sup>75</sup>	0.71	0.58	0.43	0.65	0.53	0.58	0.11	18.65
Sr <sup>88</sup>	410.05	422.09	427.53	394.40	413.31	413.48	12.72	3.08
Y <sup>89</sup>	28.75	29.31	27.52	27.76	28.31	28.33	0.73	2.57
Zr <sup>90</sup>	197.82	207.45	189.57	186.96	182.98	192.96	9.76	5.06
Nb <sup>93</sup>	20.01	20.64	18.96	19.09	19.93	19.73	0.70	3.54
Mo <sup>97</sup>	3.23	3.64	3.58	3.68	3.61	3.55	0.18	5.12
La <sup>139</sup>	18.96	19.85	17.42	16.94	17.29	18.09	1.25	6.92
Ce <sup>140</sup>	51.30	50.59	46.87	43.82	42.89	47.09	3.82	8.11
Pr <sup>141</sup>	6.97	6.52	6.05	5.97	5.90	6.28	0.45	7.24
Nd <sup>146</sup>	28.74	29.30	28.05	26.75	27.00	27.97	1.10	3.92
Sm <sup>147</sup>	6.74	6.81	7.00	6.12	6.33	6.60	0.36	5.50
Eu <sup>153</sup>	2.12	2.06	2.22	1.99	2.05	2.09	0.09	4.17
Gd <sup>157</sup>	5.39	5.02	6.23	5.50	5.41	5.51	0.44	8.03
Tb <sup>159</sup>	0.88	0.78	0.95	0.92	0.83	0.87	0.07	7.84
Dy <sup>163</sup>	5.45	5.29	5.62	4.98	5.69	5.41	0.28	5.26
Ho <sup>165</sup>	0.97	1.08	1.05	1.02	1.09	1.04	0.05	4.67
Er <sup>166</sup>	2.45	2.13	2.50	2.50	2.46	2.41	0.16	6.52
Tm <sup>169</sup>	0.362	0.362	0.367	0.364	0.319	0.355	0.020	5.670
Yb <sup>172</sup>	2.01	1.60	2.11	1.85	1.86	1.89	0.19	10.24
Lu <sup>175</sup>	0.249	0.297	0.310	0.300	0.248	0.281	0.030	10.640
Hf <sup>178</sup>	4.12	4.29	4.09	3.81	4.60	4.18	0.29	6.94
Ta <sup>181</sup>	1.46	1.42	1.41	1.43	1.49	1.44	0.03	2.27
W <sup>182</sup>	0.36	0.23	0.42	0.15	0.18	0.27	0.12	43.63
Re <sup>185</sup>								
Pb <sup>208</sup>	1.58	1.42	1.58	1.57	1.67	1.56	0.09	5.77
Bi <sup>209</sup>	0.0117	0.0053	0.0122	0.0089	0.0091	0.0094	0.0028	29.1419
Th <sup>232</sup>	1.43	1.33	1.20	1.35	1.26	1.31	0.09	6.69
U <sup>238</sup>	0.467	0.415	0.430	0.440	0.393	0.429	0.028	6.445

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; **RSD > 10 % don't recommended.**

**Table 11A:** Recuperation data for secondary standard (BCR-2) for all elements analyzed in the iron oxides from massive high-grade iron ore (MIO).

Elements	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	Mean	$\sigma$	RSD (%)	CV (ppm)	TR (%)
Na <sup>23</sup>	22295.40	23606.67	24485.37	23941.16	23113.41	25162.67	23456.14	23722.97	930.58	3.92	23400.00	101.38	
Mg <sup>24</sup>	21882.84	20836.30	21462.37	20600.96	23589.79	23838.03	22529.93	22105.75	1272.96	5.76	21600.00	102.34	
Al <sup>27</sup>	84820.99	75410.41	75897.66	70993.46	84399.33	87435.66	82049.45	80143.85	6068.38	7.57	71400.00	112.25	
Si <sup>29</sup>	292285.75	219393.67	207244.86	167504.72	363032.78	248428.97	231256.72	247021.07	63804.88	25.83	253000.00	97.64	
P <sup>31</sup>	1229.19	1181.77	1136.00	1155.48	1384.82	1322.02	1148.48	1222.54	96.10	7.86	1500.00	81.50	
K <sup>39</sup>	4891.80	4158.63	4441.70	4013.32	4987.30	4737.82	5390.86	4660.20	486.19	10.43	14900.00	31.28	
Ca <sup>42</sup>	51341.25	42909.74	25035.48	48148.05	3613.35	6939.65	85044.13	37575.95	28379.08	75.52	50900.00	73.82	
Sc <sup>45</sup>	35.41	50.66	54.99	60.59	40.11	50.07	36.98	46.97	9.61	20.45	33.00	142.34	
Ti <sup>49</sup>	17970.53	13336.33	13814.08	13356.14	15865.25	16494.56	17144.27	15425.88	1915.34	12.42	13500.00	114.27	
V <sup>51</sup>	474.86	425.06	417.24	424.97	463.05	495.73	471.94	453.26	30.57	6.74	416.00	108.96	
Cr <sup>53</sup>	28.44	20.79	18.57	13.72	7.54	11.35	11.96	16.05	7.06	43.97	18.00	89.18	
Mn <sup>55</sup>	1534.77	1506.77	1483.55	1473.27	1478.96	1536.41	1462.03	1496.54	29.91	2.00	1520.00	98.46	
Co <sup>59</sup>	33.63	37.27	36.69	34.16	31.77	33.65	31.86	34.15	2.15	6.28	37.00	92.29	
Ni <sup>60</sup>	12.43	90.72	75.47	74.24	60.23	58.16	39.47	58.67	26.02	44.34	13.00	451.34	
Zn <sup>66</sup>	116.14	137.89	140.62	134.98	139.37	134.02	124.67	132.53	8.94	6.75	127.00	104.35	
Ga <sup>71</sup>	22.14	24.58	24.56	23.04	23.67	25.28	22.89	23.74	1.12	4.72	23.00	103.20	
As <sup>75</sup>	0.75	1.00	0.98	0.88	1.09	1.27	1.17	1.02	0.18	17.19	1.12	91.07	
Sr <sup>88</sup>	368.14	336.04	356.49	317.60	370.09	386.79	386.01	360.17	25.65	7.12	346.00	104.09	
Y <sup>89</sup>	45.49	36.91	38.91	34.47	39.93	43.55	41.75	40.14	3.81	9.48	37.00	108.50	
Zr <sup>90</sup>	242.53	193.43	195.77	179.39	213.85	229.52	233.09	212.51	23.65	11.13	188.00	113.04	
Nb <sup>93</sup>	16.30	11.88	12.95	11.77	13.83	15.07	14.17	13.71	1.66	12.09	12.50	109.68	
Mo <sup>97</sup>	125.09	114.08	114.03	105.11	92.53	103.57	92.85	106.75	11.91	11.16	248.00	43.04	
La <sup>139</sup>	33.28	22.15	23.07	21.03	29.35	32.12	30.72	27.39	5.14	18.77	25.00	109.55	
Ce <sup>140</sup>	76.27	48.05	49.79	44.68	65.72	74.19	72.08	61.54	13.60	22.10	53.00	116.11	
Pr <sup>141</sup>	9.33	5.97	6.69	6.19	7.49	8.97	8.83	7.64	1.41	18.40	6.80	112.33	
Nd <sup>146</sup>	33.63	29.97	29.28	28.16	34.59	37.76	35.96	32.76	3.66	11.17	28.00	117.02	
Sm <sup>147</sup>	8.26	7.22	7.58	7.27	7.71	7.70	7.77	7.64	0.35	4.55	6.70	114.09	
Eu <sup>153</sup>	2.41	3.41	3.36	3.13	2.71	3.06	2.69	2.97	0.37	12.60	2.00	148.36	
Gd <sup>157</sup>	6.30	11.23	10.94	9.96	7.05	7.86	7.00	8.62	2.04	23.70	6.80	126.76	
Tb <sup>159</sup>	0.93	1.39	1.39	1.30	1.07	1.15	1.00	1.18	0.19	15.93	1.07	109.88	
Dy <sup>163</sup>	7.14	7.49	7.51	6.42	7.51	7.71	7.73	7.36	0.46	6.21	6.44	114.26	
Ho <sup>165</sup>	1.44	1.65	1.74	1.45	1.43	1.66	1.52	1.56	0.13	8.10	1.33	116.97	
Er <sup>166</sup>	3.25	4.11	4.56	3.96	3.67	3.59	3.31	3.78	0.47	12.32	3.70	102.12	
Tm <sup>169</sup>	0.565	0.589	0.700	0.539	0.630	0.720	0.530	0.610	0.076	12.423	0.540	113.042	
Yb <sup>172</sup>	3.59	3.73	3.90	3.87	3.55	3.94	3.15	3.68	0.28	7.54	3.50	105.02	
Lu <sup>175</sup>	0.60	0.58	0.62	0.60	0.56	0.58	0.54	0.58	0.03	4.62	0.51	114.29	
Hf <sup>178</sup>	5.13	5.45	5.78	4.88	4.89	5.59	4.91	5.23	0.37	7.11	4.80	109.02	
Ta <sup>181</sup>	1.14	0.96	1.09	0.90	1.13	1.23	1.09	1.08	0.11	10.42	0.78	138.10	
W <sup>182</sup>	0.24	0.29	0.61	0.47	0.70	0.72	0.90	0.56	0.24	42.82	0.50	112.29	
Re <sup>185</sup>													
Pb <sup>208</sup>	7.84	10.58	10.93	10.42	9.04	9.24	7.99	9.43	1.25	13.23	11.00	85.77	
Bi <sup>209</sup>	0.0169	0.0157	0.0158	0.0162	0.0105	0.0126	0.0111	0.0141	0.0026	18.7248	0.0500	28.2286	
Th <sup>232</sup>	7.26	5.88	5.87	5.57	6.09	6.72	6.00	6.20	0.59	9.44	6.20	99.98	
U <sup>238</sup>	1.69	1.56	1.56	1.46	1.54	1.63	1.45	1.56	0.09	5.52	1.69	92.05	

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; CV = certificated values; TR = total recuperation; TR = values out of 80 to 120.

**Table 12A:** Recuperation data for “in house” standard (HM5-F1) for all elements analyzed in the iron oxides from massive high-grade iron ore (MIO).

Elements	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	Mean	$\sigma$	RSD (%)	OV England (ppm)	TR* (%)
Na <sup>23</sup>	4.01			15.65		15.51	8.49	70.51	3.78	19.66	25.46	129.51		
Mg <sup>24</sup>	33.11	34.15	36.22	23.31	24.32	23.52	29.12	29.00	30.49	29.25	4.76	16.29		
Al <sup>27</sup>	179.54	170.90	226.45	288.59	297.19	292.41	351.51	331.39	347.63	276.18	68.54	24.82	507.53	54.42
Si <sup>29</sup>		3458.37	6191.11			49059.90		16189.76	37045.50	22388.93	19908.04	88.92		
P <sup>31</sup>				75.29		82.05				78.67	4.78	6.08		
K <sup>39</sup>														
Ca <sup>42</sup>	3947.90	12516.75				47954.44	108856.52	54481.05	75796.94	50592.27	39185.51	77.45		
Sc <sup>45</sup>	1.97	3.70	2.82	5.27	8.34		7.96	9.33	3.96	5.42	2.78	51.28	3.12	173.68
Ti <sup>49</sup>	16540.21	17696.03	17257.36	10523.89	11250.64	10687.18	15525.29	14841.82	16437.15	14528.84	2911.16	20.04	14627.85	99.32
V <sup>51</sup>	734.13	744.73	735.53	549.58	602.22	554.10	633.99	605.81	663.84	647.10	76.86	11.88	629.50	102.80
Cr <sup>53</sup>	426.32	427.55	449.95	403.26	427.67	407.12	322.70	326.50	328.68	391.08	50.65	12.95	993.00	39.38
Mn <sup>55</sup>	7.99	12.21	11.77	4.88	6.66	5.43	8.61	11.06	8.21	8.54	2.68	31.35	8.69	98.22
Co <sup>59</sup>	4.98	4.85	5.36	4.11	4.27	4.05	4.37	4.00	4.47	4.50	0.47	10.46	5.81	77.38
Ni <sup>60</sup>	17.51	26.15	20.26	81.90	102.60	95.57	81.98	90.58	83.96	66.72	34.78	52.12	46.80	142.57
Zn <sup>66</sup>	10.21	10.64	10.62	10.99	11.88	11.32	11.58	11.75	12.57	11.28	0.74	6.58	10.26	109.98
Ga <sup>71</sup>	7.92	8.54	8.37	9.01	8.93	8.68	8.68	8.03	8.76	8.55	0.38	4.40	9.01	94.86
As <sup>75</sup>	0.34			0.31	0.39	0.25	0.50	5.07	0.25	1.02	1.79	176.22		
Sr <sup>88</sup>	1.36	1.25	1.21	1.91	2.00	2.01	2.44	3.37	2.68	2.03	0.72	35.48		
Y <sup>89</sup>	0.352	0.189	0.272	0.247	0.320	0.350	0.400	0.670	0.420	0.358	0.138	38.625		
Zr <sup>90</sup>		2.01		1.20		0.88	1.33	1.59	1.89	1.48	0.43	28.95		
Nb <sup>93</sup>	0.520	0.450	0.440	0.284	0.300	0.300	0.610	0.660	0.740	0.478	0.167	35.005	0.270	177.119
Mo <sup>97</sup>	12.52	10.30	11.03	19.45	20.05	20.51	16.70	21.55	18.56	16.74	4.34	25.94		
La <sup>139</sup>	0.143	0.078						0.110		0.110	0.033	29.457		
Ce <sup>140</sup>	0.134	0.063		0.030				0.033	0.100	0.069	0.041	59.173		
Pr <sup>141</sup>		0.043								0.039	0.006	16.530		
Nd <sup>146</sup>		0.200		0.076						0.138	0.088	63.537		
Sm <sup>147</sup>	0.148				0.130					0.139	0.013	9.157		
Eu <sup>153</sup>					0.0195					0.0195				
Gd <sup>157</sup>						0.0209		0.0250		0.0230	0.0029	12.6324		
Tb <sup>159</sup>					0.0052	0.0075		0.0067		0.0065	0.0012	18.0560		
Dy <sup>163</sup>	0.146			0.048				0.078		0.091	0.050	55.382		
Ho <sup>165</sup>				0.0174	0.0233			0.0380	0.0130	0.0229	0.0109	47.5462		
Er <sup>166</sup>	0.145									0.145				
Tm <sup>169</sup>									0.0264	0.0264				
Yb <sup>172</sup>		0.061			0.057			0.080		0.066	0.012	18.618		
Lu <sup>175</sup>	0.0187			0.0109				0.0270		0.0189	0.0081	42.6747		
Hf <sup>178</sup>									0.157	0.157				
Ta <sup>181</sup>	1.370	1.390	1.620	0.339	0.203	0.189	1.540	1.410	1.500	1.062	0.620	58.388	0.830	127.992
W <sup>182</sup>	0.21							0.70		0.46	0.35	76.15		
Re <sup>185</sup>														
Pb <sup>208</sup>	1.35	1.52	1.91	1.62	2.45	2.04	2.10	3.90	1.99	2.10	0.75	35.92	0.30	699.26
Bi <sup>209</sup>	0.0300	0.0300	0.0049	0.0050	0.0038	0.0025	0.0016	0.0146	0.0032	0.0106	0.0116	109.4551		
Th <sup>232</sup>	0.0750				0.0105			0.2600	0.0370	0.0956	0.1127	117.8930		
U <sup>238</sup>	0.1390	0.0251	0.0204	0.0439	0.0110	0.0048		0.1290	0.0470	0.0525	0.0524	99.7545		

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; OV = obtained values; TR = total recuperation; TR = values out of 80 to 120.



**Table 13A:** Recuperation data for primary standard (BHVO-2) for all elements analyzed in the iron oxides from sulfide breccia (SB).

Elements	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	Mean	$\sigma$	RSD (%)
Na <sup>23</sup>	15513.91	16985.07	16726.21	16160.43	16120.92	17956.43	17476.09	15679.53	16084.46	16522.56	824.09	4.99	
Mg <sup>24</sup>	43322.98	42200.23	45794.93	42565.88	41486.33	48144.07	45972.34	41338.96	44430.05	43917.31	2333.52	5.31	
Al <sup>27</sup>	69331.41	70391.93	73387.57	71608.01	74008.40	75770.07	72583.98	66812.46	74350.13	72027.11	2801.82	3.89	
Si <sup>29</sup>	260374.56	228737.50	250731.88	186156.70	200261.52	197137.45	293169.31	248489.94	217456.44	231390.59	34843.86	15.06	
P <sup>31</sup>	1085.86	1173.97	1260.00	1251.79	1230.87	1407.71	1218.35	1121.62	1143.33	1210.39	95.40	7.88	
K <sup>39</sup>	4109.70	4410.10	4467.71	4526.68	3726.86	4474.21	4691.03	4568.24	3640.45	4290.55	378.44	8.82	
Ca <sup>42</sup>	105465.04	50343.03	90429.20	100600.25	98961.59	22174.72	104090.81	86798.30	62546.86	80156.64	28929.71	36.09	
Sc <sup>45</sup>	47.44	28.71	31.38	28.12	17.63	22.18	46.67	39.68	29.46	32.36	10.29	31.79	
Ti <sup>49</sup>	16518.09	16271.60	16135.46	15618.48	16224.43	17207.78	16973.71	15690.29	16387.43	16336.36	523.34	3.20	
V <sup>51</sup>	313.87	317.94	315.29	312.76	314.60	338.08	328.70	303.70	315.44	317.82	9.95	3.13	
Cr <sup>53</sup>	282.68	299.42	295.47	237.15	242.33	262.19	298.05	308.87	294.06	280.02	26.35	9.41	
Mn <sup>55</sup>	1244.15	1311.32	1288.65	1265.94	1291.18	1435.12	1352.82	1249.00	1240.68	1297.65	62.98	4.85	
Co <sup>59</sup>	43.39	47.66	45.24	42.86	43.27	47.00	47.29	44.17	44.84	45.08	1.84	4.09	
Ni <sup>60</sup>	116.22	130.67	94.75	133.68	122.18	140.03	122.05	105.03	118.71	120.37	14.09	11.70	
Zn <sup>66</sup>	99.16	104.81	103.87	101.18	104.17	108.83	103.63	98.75	104.65	103.23	3.13	3.03	
Ga <sup>71</sup>	21.20	21.79	21.85	21.44	21.26	23.56	21.47	21.57	21.58	21.75	0.71	3.28	
As <sup>75</sup>	0.42	0.57	0.44	0.43	0.82	0.45	0.59	0.54	0.27	0.50	0.15	30.39	
Sr <sup>88</sup>	390.21	407.20	385.96	404.36	382.80	420.83	391.12	386.67	403.37	396.95	12.64	3.18	
Y <sup>89</sup>	25.08	27.27	25.37	26.12	24.86	28.69	25.94	25.48	25.99	26.09	1.20	4.62	
Zr <sup>90</sup>	166.70	174.79	164.34	185.74	173.14	187.64	175.93	161.44	167.04	172.97	9.17	5.30	
Nb <sup>93</sup>	16.94	18.38	18.45	18.41	17.85	18.76	18.31	17.59	17.65	18.04	0.57	3.17	
Mo <sup>97</sup>	3.50	3.80	3.85	4.02	3.73	4.41	3.62	3.60	3.88	3.82	0.27	7.11	
La <sup>139</sup>	14.54	16.03	14.57	14.31	14.75	16.15	15.14	14.58	15.30	15.04	0.67	4.45	
Ce <sup>140</sup>	36.35	40.05	37.47	38.24	36.88	40.30	38.50	36.62	38.45	38.10	1.42	3.72	
Pr <sup>141</sup>	5.14	5.45	5.46	5.28	5.30	5.57	5.56	5.21	5.26	5.36	0.16	2.90	
Nd <sup>146</sup>	25.29	23.91	24.50	25.99	25.63	26.97	26.23	23.70	23.76	25.11	1.19	4.76	
Sm <sup>147</sup>	6.08	6.78	5.73	6.47	5.96	6.42	6.74	6.14	5.76	6.23	0.39	6.29	
Eu <sup>153</sup>	2.09	2.04	2.04	2.17	1.99	2.18	1.93	2.23	2.01	2.08	0.10	4.79	
Gd <sup>157</sup>	6.34	6.16	6.35	6.14	6.26	6.71	6.67	5.76	6.51	6.32	0.29	4.64	
Tb <sup>159</sup>	0.89	0.92	0.91	0.91	1.00	0.96	0.98	0.92	0.83	0.92	0.05	5.44	
Dy <sup>163</sup>	5.19	5.24	5.28	5.43	5.24	5.58	5.57	4.86	5.31	5.30	0.22	4.12	
Ho <sup>165</sup>	1.01	1.00	1.09	1.06	1.09	1.02	1.06	1.06	0.98	1.04	0.04	3.79	
Er <sup>166</sup>	2.50	2.45	2.63	2.60	2.55	2.87	2.72	2.36	2.50	2.58	0.15	5.91	
Tm <sup>169</sup>	0.386	0.335	0.295	0.342	0.346	0.341	0.362	0.325	0.337	0.341	0.025	7.270	
Yb <sup>172</sup>	1.75	2.20	2.08	2.01	1.99	2.15	2.20	1.91	1.86	2.02	0.16	7.78	
Lu <sup>175</sup>	0.279	0.280	0.277	0.287	0.295	0.268	0.283	0.283	0.269	0.280	0.008	3.005	
Hf <sup>178</sup>	4.18	3.96	3.95	4.47	4.37	4.06	4.03	4.09	3.92	4.11	0.19	4.67	
Ta <sup>181</sup>	1.36	1.51	1.27	1.36	1.50	1.62	1.42	1.27	1.41	1.41	0.12	8.16	
W <sup>182</sup>	0.113	0.250	0.250	0.260	0.240	0.370	0.200	0.180	0.250	0.235	0.070	29.618	
Re <sup>185</sup>													
Pb <sup>208</sup>	1.723	1.697	1.635	1.740	1.690	1.800	1.700	1.730	1.620	1.704	0.054	3.189	
Bi <sup>209</sup>	0.0106	0.0088	0.0097	0.0108	0.0108	0.0102	0.0090	0.0087	0.0124	0.0101	0.0012	11.8830	
Th <sup>232</sup>	1.14	1.18	1.24	1.32	1.09	1.35	1.26	1.07	1.24	1.21	0.10	8.04	
U <sup>238</sup>	0.403	0.395	0.404	0.432	0.383	0.417	0.386	0.382	0.438	0.404	0.021	5.126	

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; **RSD > 10 % don't recommended.**

**Table 13A:** Recuperation data for primary standard (BHVO-2) for all elements analyzed in the iron oxides from sulfide breccia (SB) (cont.).

Elements	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	BHVO-2	Mean	$\sigma$	RSD (%)
Na <sup>23</sup>	16754.18	16120.21	16344.76	16072.55	16458.68	16696.25	16407.77	16407.77	284.55	1.73
Mg <sup>24</sup>	43965.76	43658.38	43162.45	42705.30	44688.13	43546.90	43621.15	43621.15	680.19	1.56
Al <sup>27</sup>	72238.69	71091.64	71447.47	70806.50	73803.04	70490.41	71646.29	71646.29	1215.81	1.70
Si <sup>29</sup>	218508.63	251318.41	231670.66	231465.84	225366.67	241258.98	233264.87	233264.87	11625.34	4.98
P <sup>31</sup>	1174.90	1175.81	1257.65	1237.78	1201.49	1158.51	1201.02	1201.02	39.20	3.26
K <sup>39</sup>	4617.92	4085.96	4196.31	4299.08	4084.35	4487.83	4295.24	4295.24	218.76	5.09
Ca <sup>42</sup>	79836.80	83843.52	81490.48	72303.60	100028.18	73151.20	81775.63	81775.63	10053.58	12.29
Sc <sup>45</sup>	33.70	34.04	31.20	30.95	33.51	34.66	33.01	33.01	1.55	4.70
Ti <sup>49</sup>	16179.03	16377.38	16383.20	15796.41	15942.15	17191.86	16311.67	16311.67	490.67	3.01
V <sup>51</sup>	313.32	320.89	317.68	298.33	327.08	326.87	317.36	317.36	10.73	3.38
Cr <sup>53</sup>	270.62	279.47	291.50	260.30	295.36	284.45	280.28	280.28	13.14	4.69
Mn <sup>55</sup>	1281.26	1332.91	1257.74	1262.68	1312.34	1297.16	1290.68	1290.68	29.16	2.26
Co <sup>59</sup>	44.48	44.97	45.61	45.22	45.87	43.96	45.02	45.02	0.71	1.58
Ni <sup>60</sup>	134.53	116.40	104.25	127.05	124.21	107.20	118.94	118.94	11.80	9.92
Zn <sup>66</sup>	103.23	100.55	105.55	99.56	107.76	101.98	103.11	103.11	3.10	3.01
Ga <sup>71</sup>	21.32	21.04	22.93	21.08	22.54	21.49	21.73	21.73	0.80	3.69
As <sup>75</sup>	0.54		0.80			0.75	0.70	0.70	0.14	19.80
Sr <sup>88</sup>	398.80	396.99	391.57	394.23	418.11	379.30	396.50	396.50	12.63	3.19
Y <sup>89</sup>	25.64	25.82	26.60	26.01	27.08	25.01	26.03	26.03	0.73	2.80
Zr <sup>90</sup>	177.95	173.63	164.00	173.01	177.77	166.61	172.16	172.16	5.75	3.34
Nb <sup>93</sup>	17.96	18.49	17.59	16.75	18.96	18.45	18.03	18.03	0.79	4.36
Mo <sup>97</sup>	3.63	4.14	3.62	3.83	3.98	3.62	3.80	3.80	0.22	5.79
La <sup>139</sup>	14.62	15.46	14.93	15.28	15.78	14.08	15.03	15.03	0.61	4.09
Ce <sup>140</sup>	38.22	38.66	37.02	39.17	39.36	35.89	38.05	38.05	1.35	3.54
Pr <sup>141</sup>	5.34	5.25	5.48	5.11	5.73	5.25	5.36	5.36	0.22	4.07
Nd <sup>146</sup>	25.49	24.65	24.79	25.23	27.15	23.05	25.06	25.06	1.33	5.31
Sm <sup>147</sup>	6.28	5.91	6.45	6.21	6.45	5.98	6.21	6.21	0.23	3.69
Eu <sup>153</sup>	2.19	1.93	2.10	2.19	2.07	1.96	2.07	2.07	0.11	5.34
Gd <sup>157</sup>	5.86	6.48	6.68	6.03	6.51	6.33	6.32	6.32	0.31	4.94
Tb <sup>159</sup>	0.90	0.92	0.94	0.97	0.93	0.87	0.92	0.92	0.04	4.02
Dy <sup>163</sup>	5.14	5.38	5.32	5.30	6.05	4.70	5.32	5.32	0.44	8.22
Ho <sup>165</sup>	1.06	1.03	1.03	1.02	1.07	1.03	1.04	1.04	0.02	1.85
Er <sup>166</sup>	2.51	2.52	2.65	2.54	2.76	2.43	2.57	2.57	0.12	4.58
Tm <sup>169</sup>	0.348	0.307	0.368	0.350	0.321	0.346	0.340	0.340	0.022	6.489
Yb <sup>172</sup>	2.15	1.98	1.87	1.86	2.36	1.87	2.02	2.02	0.20	10.04
Lu <sup>175</sup>	0.277	0.304	0.254	0.335	0.253	0.243	0.278	0.278	0.036	12.836
Hf <sup>178</sup>	4.20	4.09	4.01	4.44	4.09	3.82	4.11	4.11	0.21	5.01
Ta <sup>181</sup>	1.39	1.32	1.51	1.31	1.49	1.40	1.40	1.40	0.08	5.94
W <sup>182</sup>	0.250	0.310	0.146	0.270	0.330		0.261	0.261	0.072	27.467
Re <sup>185</sup>										
Pb <sup>208</sup>	1.720	1.648	1.730	1.820	1.720	1.590	1.705	1.705	0.078	4.602
Bi <sup>209</sup>	0.0100	0.0094	0.0105	0.0180	0.0082	0.0066	0.0105	0.0105	0.0040	37.8432
Th <sup>232</sup>	1.200	1.191	1.210	1.210	1.310	1.110	1.205	1.205	0.064	5.290
U <sup>238</sup>	0.421	0.393	0.397	0.351	0.435	0.433	0.405	0.405	0.032	7.858

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; **RSD > 10 % don't recommended.**

**Table 14A:** Recuperation data for secondary standard (BCR-2) for all elements analyzed in the iron oxides from sulfide breccia (SB).

Elements	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	Mean	$\sigma$	RSD (%)	CV (ppm)	TR (%)
Na <sup>23</sup>	24805.04	23431.51	24014.81	25682.15	23457.54	25186.81	26164.45	24677.47	1078.27	4.37	23400.00	105.46	
Mg <sup>24</sup>	22262.57	21828.74	22528.04	23066.15	21601.74	24434.12	24801.32	22931.81	1249.45	5.45	21600.00	106.17	
Al <sup>27</sup>	81373.73	76448.84	79106.45	82814.20	74625.94	85179.45	82344.73	80270.48	3739.63	4.66	71400.00	112.42	
Si <sup>29</sup>	233596.63	287983.16	208122.08	305909.28	279078.59	321370.00	261114.88	271024.95	39916.25	14.73	253000.00	107.12	
P <sup>31</sup>	1239.19	1179.73	1308.91	1321.27	1187.35	1277.17	1262.07	1253.67	55.26	4.41	1500.00	83.58	
K <sup>39</sup>	4208.07	4316.38	3247.19	4358.54	4223.53	4561.59	3327.45	4034.68	524.07	12.99	14900.00	27.08	
Ca <sup>42</sup>	117624.09	33428.47		68355.21		31797.78	98325.36	69906.18	38307.73	54.80	50900.00	137.34	
Sc <sup>45</sup>	45.43	33.18	19.29	24.30	23.73	46.71	47.90	34.36	12.25	35.66	33.00	104.13	
Ti <sup>49</sup>	16205.01	15302.75	15617.69	15907.62	14451.91	15990.08	16088.13	15651.88	610.88	3.90	13500.00	115.94	
V <sup>51</sup>	465.46	458.97	465.27	475.31	442.32	494.29	483.83	469.35	17.02	3.63	416.00	112.82	
Cr <sup>53</sup>	17.47	7.72	18.51	16.99	17.07	19.62	29.42	18.11	6.34	34.99	18.00	100.63	
Mn <sup>55</sup>	1594.04	1514.79	1543.27	1640.68	1516.60	1605.72	1597.45	1573.22	48.55	3.09	1520.00	103.50	
Co <sup>59</sup>	38.58	36.37	39.10	39.63	36.42	42.47	44.81	39.63	3.09	7.79	37.00	107.10	
Ni <sup>60</sup>	38.77	44.26	33.38	31.68	25.06	15.97	15.32	29.21	11.01	37.69	13.00	224.66	
Zn <sup>66</sup>	146.33	132.10	138.45	141.75	133.03	148.26	141.36	140.18	6.14	4.38	127.00	110.38	
Ga <sup>71</sup>	24.67	24.79	25.13	24.92	23.94	25.85	24.69	24.86	0.57	2.31	23.00	108.07	
As <sup>75</sup>	0.69	0.99	1.04	1.03	0.78	0.82	0.79	0.88	0.14	15.98	1.12	78.32	
Sr <sup>88</sup>	378.53	345.88	390.66	378.96	358.29	372.31	381.47	372.30	15.27	4.10	346.00	107.60	
Y <sup>89</sup>	43.00	41.57	41.92	40.76	39.35	42.57	39.57	41.25	1.42	3.43	37.00	111.48	
Zr <sup>90</sup>	225.63	206.45	202.13	209.30	205.22	213.93	204.16	209.55	8.07	3.85	188.00	111.46	
Nb <sup>93</sup>	14.10	13.52	13.64	13.74	13.78	13.94	13.25	13.71	0.28	2.03	12.50	109.68	
Mo <sup>97</sup>	104.57	98.61	92.02	94.62	95.25	98.85	95.68	97.09	4.05	4.17	248.00	39.15	
La <sup>139</sup>	28.23	27.17	27.74	26.09	25.06	26.15	24.64	26.44	1.34	5.07	25.00	105.76	
Ce <sup>140</sup>	59.19	58.37	54.88	54.36	52.74	56.78	50.42	55.25	3.11	5.64	53.00	104.24	
Pr <sup>141</sup>	7.79	7.34	6.87	6.91	6.90	7.66	7.04	7.22	0.38	5.33	6.80	106.11	
Nd <sup>146</sup>	32.84	30.46	31.24	31.46	29.81	33.78	29.90	31.36	1.50	4.77	28.00	111.98	
Sm <sup>147</sup>	8.44	7.38	7.28	7.32	6.81	6.76	8.14	7.45	0.63	8.48	6.70	111.15	
Eu <sup>153</sup>	3.28	3.13	2.95	3.00	2.81	3.08	2.86	3.02	0.16	5.38	2.00	150.79	
Gd <sup>157</sup>	9.06	8.49	8.06	8.37	8.07	8.33	8.06	8.35	0.36	4.29	6.80	122.77	
Tb <sup>159</sup>	1.13	1.15	1.09	1.11	1.10	1.10	1.11	1.11	0.02	1.79	1.07	103.99	
Dy <sup>163</sup>	8.35	7.51	6.89	7.04	6.29	7.03	7.13	7.18	0.63	8.81	6.44	111.45	
Ho <sup>165</sup>	1.62	1.61	1.48	1.42	1.56	1.45	1.40	1.51	0.09	6.01	1.33	113.21	
Er <sup>166</sup>	3.71	3.54	3.51	3.64	3.70	3.87	3.75	3.67	0.12	3.37	3.70	99.31	
Tm <sup>169</sup>	0.547	0.567	0.508	0.640	0.558	0.590	0.560	0.567	0.041	7.151	0.540	105.026	
Yb <sup>172</sup>	3.38	3.54	3.90	3.92	3.46	3.66	3.79	3.66	0.21	5.84	3.50	104.69	
Lu <sup>175</sup>	0.611	0.575	0.459	0.547	0.468	0.581	0.546	0.541	0.057	10.610	0.510	106.078	
Hf <sup>178</sup>	4.98	5.33	4.54	4.80	4.24	4.40	4.72	4.72	0.37	7.80	4.80	98.24	
Ta <sup>181</sup>	1.08	1.13	1.04	1.08	1.08	1.05	1.00	1.07	0.04	3.83	0.78	136.63	
W <sup>182</sup>	0.60	0.37	0.54	0.35	0.45	0.51	0.43	0.46	0.09	19.58	0.50	92.86	
Re <sup>185</sup>													
Pb <sup>208</sup>	10.06	9.55	9.75	10.27	9.46	10.04	10.44	9.94	0.37	3.68	11.00	90.35	
Bi <sup>209</sup>	0.0201	0.0181	0.0131	0.0157	0.0115	0.0129	0.0123	0.0148	0.0033	21.9476	0.0500	29.6286	
Th <sup>232</sup>	6.57	6.47	6.02	6.39	6.11	5.99	6.34	6.27	0.23	3.66	6.20	101.13	
U <sup>238</sup>	1.66	1.54	1.39	1.65	1.46	1.67	1.51	1.55	0.11	7.04	1.69	91.97	

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; CV = certificated values; TR = total recuperation; TR = values out of 80 to 120.



**Table 14A:** Recuperation data for secondary standard (BCR-2) for all elements analyzed in the iron oxides from sulfide breccia (SB) (cont.).

Elements	BCR-2	BCR-2	BCR-2	BCR-2	Mean	$\sigma$	RSD (%)	CV (ppm)	TR (%)
Na <sup>23</sup>	24726.25	26228.19	24576.82	24794.05	25081.33	769.94	3.07	23400.00	107.19
Mg <sup>24</sup>	21981.45	24268.73	22215.64	21251.16	22429.25	1293.28	5.77	21600.00	103.84
Al <sup>27</sup>	84847.86	87079.48	81500.93	82297.22	83931.37	2538.24	3.02	71400.00	117.55
Si <sup>29</sup>	266654.03	307931.50	265439.38	268591.78	277154.17	20559.25	7.42	253000.00	109.55
P <sup>31</sup>	1227.47	1321.03	1189.38	1359.34	1274.31	79.20	6.22	1500.00	84.95
K <sup>39</sup>	4622.34	4738.96	3490.08	4561.14	4353.13	580.08	13.33	14900.00	29.22
Ca <sup>42</sup>	56512.28	59259.91	44625.30	60755.29	55288.20	7322.55	13.24	50900.00	108.62
Sc <sup>45</sup>	37.27	38.86	39.15	35.69	37.74	1.60	4.24	33.00	114.37
Ti <sup>49</sup>	15710.14	15554.91	15458.97	15003.50	15431.88	303.76	1.97	13500.00	114.31
V <sup>51</sup>	428.19	482.44	422.79	436.25	442.42	27.25	6.16	416.00	106.35
Cr <sup>53</sup>	17.86	22.50	21.42	19.71	20.37	2.03	9.97	18.00	113.18
Mn <sup>55</sup>	1532.63	1586.06	1499.52	1360.95	1494.79	96.09	6.43	1520.00	98.34
Co <sup>59</sup>	39.87	42.17	37.61	39.21	39.72	1.89	4.76	37.00	107.34
Ni <sup>60</sup>	61.94	29.12	20.98	33.37	36.35	17.82	49.01	13.00	279.63
Zn <sup>66</sup>	140.73	145.21	133.73	138.83	139.63	4.75	3.40	127.00	109.94
Ga <sup>71</sup>	24.45	26.34	24.85	24.53	25.04	0.88	3.52	23.00	108.88
As <sup>75</sup>	0.72	0.66		0.93	0.77	0.14	18.41	1.12	68.75
Sr <sup>88</sup>	365.14	388.74	376.94	361.59	373.10	12.32	3.30	346.00	107.83
Y <sup>89</sup>	41.42	40.89	39.35	42.36	41.01	1.26	3.07	37.00	110.82
Zr <sup>90</sup>	201.06	220.84	190.93	197.75	202.65	12.84	6.34	188.00	107.79
Nb <sup>93</sup>	13.54	14.33	12.75	13.54	13.54	0.65	4.76	12.50	108.32
Mo <sup>97</sup>	129.97	138.77	130.18	126.72	131.41	5.16	3.92	248.00	52.99
La <sup>139</sup>	26.37	27.62	24.23	25.41	25.91	1.44	5.55	25.00	103.63
Ce <sup>140</sup>	55.94	58.24	56.10	55.12	56.35	1.33	2.36	53.00	106.32
Pr <sup>141</sup>	7.38	7.37	7.10	6.64	7.12	0.35	4.87	6.80	104.74
Nd <sup>146</sup>	31.74	32.90	30.02	33.04	31.93	1.40	4.38	28.00	114.02
Sm <sup>147</sup>	7.40	7.06	7.26	6.29	7.00	0.50	7.07	6.70	104.51
Eu <sup>153</sup>	2.21	2.39	2.08	1.92	2.15	0.20	9.26	2.00	107.50
Gd <sup>157</sup>	8.43	7.98	7.67	8.29	8.09	0.34	4.18	6.80	119.01
Tb <sup>159</sup>	1.08	1.06	1.12	1.32	1.15	0.12	10.31	1.07	107.13
Dy <sup>163</sup>	7.09	7.97	6.73	7.17	7.24	0.52	7.22	6.44	112.42
Ho <sup>165</sup>	1.558	1.647	1.251	1.353	1.452	0.182	12.538	1.330	109.192
Er <sup>166</sup>	3.93	4.84	3.26	3.77	3.95	0.66	16.67	3.70	106.76
Tm <sup>169</sup>	0.606	0.703	0.528	0.488	0.581	0.095	16.311	0.540	107.639
Yb <sup>172</sup>	3.30	2.99	3.75	3.71	3.44	0.36	10.50	3.50	98.21
Lu <sup>175</sup>	0.579	0.630	0.720	0.720	0.662	0.070	10.549	0.510	129.853
Hf <sup>178</sup>	5.96	5.73	4.61	5.39	5.42	0.59	10.88	4.80	112.97
Ta <sup>181</sup>	0.973	1.150	1.200	1.230	1.138	0.115	10.103	0.780	145.929
W <sup>182</sup>	0.48	0.42	0.41	0.30	0.40	0.08	18.63	0.50	80.50
Re <sup>185</sup>									
Pb <sup>208</sup>	9.18	10.02	7.97	8.49	8.92	0.89	9.96	11.00	81.05
Bi <sup>209</sup>	0.0172	0.0157	0.0180	0.0190	0.0175	0.0014	7.9756	0.0500	34.9500
Th <sup>232</sup>	6.43	6.77	6.17	5.95	6.33	0.35	5.57	6.20	102.10
U <sup>238</sup>	1.62	1.77	1.55	1.62	1.64	0.09	5.65	1.69	97.04

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; CV = certificated values; TR = total recuperation; TR = values out of 80 to 120.

**Table 15A:** Recuperation data for “in house” standard (HM5-F1) for all elements analyzed in the iron oxides from sulfide breccia (SB).

Elements	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	Mean	$\sigma$	RSD (%)	OV England (ppm)	TR (%)
Na <sup>23</sup>	15.56	73.59	32.79	19.81	16.29	19.33	12.35	23.74	12.82	25.14	19.22	76.45			
Mg <sup>24</sup>	24.56	27.65	27.82	25.65	24.92	25.59	23.98	25.78	28.09	26.00	1.50	5.78			
Al <sup>27</sup>	333.82	327.98	315.40	370.26	372.88	370.65	443.72	429.92	451.51	379.57	51.12	13.47	507.53		74.79
Si <sup>29</sup>		37179.18	39030.31		9706.65	13662.88	7392.38	35889.33		23810.12	15018.05	63.07			
P <sup>31</sup>															
K <sup>39</sup>															
Ca <sup>42</sup>	15781.23	8556.34	47648.26	28729.94	23586.20	5393.33	33339.89	41349.20		25548.05	15133.23	59.23			
Sc <sup>45</sup>		9.95					26.20	25.28		20.48	9.13	44.58	3.12		656.30
Ti <sup>49</sup>	12883.17	14603.24	13796.76	12874.03	12987.91	12498.97	12799.36	12717.91	13735.36	13210.75	684.36	5.18	14627.85		90.31
V <sup>51</sup>	625.13	633.42	598.22	629.71	633.40	624.06	640.12	660.72	651.21	632.89	17.72	2.80	629.50		100.54
Cr <sup>53</sup>	439.09	449.24	442.58	606.40	595.03	629.61	812.24	829.26	834.42	626.43	166.06	26.51	993.00		63.08
Mn <sup>55</sup>	15.04	19.00	13.45	27.59	18.08	18.33	24.24	19.17	23.09	19.78	4.48	22.64	8.69		227.58
Co <sup>59</sup>	4.54	4.84	4.65	4.93	4.67	4.85	5.26	5.30	5.49	4.95	0.33	6.66	5.81		85.16
Ni <sup>60</sup>	45.52	85.19	78.84	58.14	72.25	59.04	29.98	33.50	32.29	54.97	20.91	38.03	46.80		117.46
Zn <sup>66</sup>	12.07	12.97	12.89	11.88	11.77	11.89	10.85	11.80	12.41	12.06	0.64	5.34	10.26		117.53
Ga <sup>71</sup>	8.93	8.71	8.67	9.07	8.96	8.70	9.06	8.91	9.23	8.92	0.19	2.15	9.01		98.95
As <sup>75</sup>		1.46	0.75	0.29	0.23	0.48	0.44	0.47	0.30	0.55	0.40	72.53			
Sr <sup>88</sup>	2.07	3.38	2.55	2.09	2.01	1.99	2.16	1.87	2.22	2.26	0.46	20.41			
Y <sup>89</sup>	0.443	0.435	0.414	0.305	0.330	0.357	0.379	0.330	0.384	0.375	0.049	13.027			
Zr <sup>90</sup>	1.03	1.87	1.03		0.85	2.33		1.34	1.68	1.45	0.54	37.09			
Nb <sup>93</sup>	0.406	0.661	0.548	0.308	0.355	0.271	0.309	0.271	0.390	0.391	0.133	34.012	0.270		144.815
Mo <sup>97</sup>	17.99	18.49	18.42	18.70	17.86	17.07	17.77	16.32	18.69	17.92	0.80	4.45			
La <sup>139</sup>									0.079	0.079					
Ce <sup>140</sup>			0.035				0.057	0.027		0.040	0.016	39.164			
Pr <sup>141</sup>			0.046							0.046					
Nd <sup>146</sup>			0.212			0.157	0.219			0.196	0.034	17.324			
Sm <sup>147</sup>		0.137			0.109	0.146			0.179	0.143	0.029	20.209			
Eu <sup>153</sup>								0.0097	0.0304	0.0201	0.0146	73.0030			
Gd <sup>157</sup>			0.0328					0.0242	0.0160	0.0243	0.0084	34.5238			
Tb <sup>159</sup>	0.0059		0.0072				0.0068	0.0056		0.0064	0.0008	11.7647			
Dy <sup>163</sup>															
Ho <sup>165</sup>					0.0184					0.0184					
Er <sup>166</sup>	0.0291				0.0266					0.0279	0.0018	6.3475			
Tm <sup>169</sup>	0.0231						0.0220	0.0490		0.0314	0.0153	48.7167			
Yb <sup>172</sup>						0.098				0.098					
Lu <sup>175</sup>			0.0078	0.0064						0.0071	0.0010	13.9430			
Hf <sup>178</sup>	0.080					0.119				0.100	0.028	27.716			
Ta <sup>181</sup>	0.910	1.800	1.890	0.313	0.340	0.325	0.359	0.460	0.470	0.763	0.640	83.936	0.830		91.928
W <sup>182</sup>		0.153	0.091					0.113	0.075	0.108	0.034	31.299			
Re <sup>185</sup>															
Pb <sup>208</sup>	1.614	1.752	2.180	1.930	2.370	2.640	2.160	3.860	2.690	2.355	0.673	28.565	0.300		785.037
Bi <sup>209</sup>	0.0019	0.0590	0.0560	0.0035		0.0115		0.0018	0.0029	0.0195	0.0262	134.0753			
Th <sup>232</sup>	0.0105	0.0248	0.0211							0.0188	0.0074	39.4801			
U <sup>238</sup>		0.0367	0.3770	0.0130		0.0432	0.0159		0.0099	0.0826	0.1449	175.3289			

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; OV = obtained values; TR = total recuperation; TR = values out of 80 to 120.

**Table 15A:** Recuperation data for “in house” standard (HM5-F1) for all elements analyzed in the iron oxides from sulfide breccia (SB) (cont.).

Elements	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	HM5-F1	Mean	$\sigma$	RSD (%)	OV England (ppm)	TR (%)
Na <sup>23</sup>		13.17	82.73	5.14	35.57	27.72	32.87	30.32	92.25		
Mg <sup>24</sup>	31.39	32.61	29.42	27.46	30.44	30.05	30.23	1.76	5.81		
Al <sup>27</sup>	291.92	273.06	299.65	262.57	290.33	275.53	282.18	13.99	4.96	507.53	55.60
Si <sup>29</sup>		6914.20		7447.39			7180.80	377.02	5.25		
P <sup>31</sup>											
K <sup>39</sup>											
Ca <sup>42</sup>		22196.28			8333.49	15535.19	15354.99	6933.15	45.15		
Sc <sup>45</sup>	3.94	2.87	3.43	1.31	2.95	2.71	2.87	0.89	30.89	3.12	91.93
Ti <sup>49</sup>	13283.65	13287.09	12668.31	11119.58	11667.45	12967.27	12498.89	903.21	7.23	14627.85	85.45
V <sup>51</sup>	709.31	675.72	663.41	582.30	599.59	620.48	641.80	48.89	7.62	629.50	101.95
Cr <sup>53</sup>	478.59	874.50	906.29	551.89	551.93	630.86	665.68	180.89	27.17	993.00	67.04
Mn <sup>55</sup>	10.09	9.06	7.70	10.89	9.94	12.39	10.01	1.59	15.91	8.69	115.21
Co <sup>59</sup>	5.16	5.38	5.08	4.60	4.78	5.01	5.00	0.28	5.55	5.81	86.09
Ni <sup>60</sup>	45.20	61.01	49.22	23.65	15.34	23.76	36.36	17.96	49.40	46.80	77.70
Zn <sup>66</sup>	10.58	10.79	13.60	9.50	10.94	11.12	11.09	1.36	12.23	10.26	108.07
Ga <sup>71</sup>	8.42	8.62	8.65	7.69	7.75	8.60	8.29	0.45	5.40	9.01	91.99
As <sup>75</sup>	0.54		3.17	0.50	0.45		1.17	1.34	114.78		
Sr <sup>88</sup>	1.254	1.347	5.010	1.129	1.046	1.190	1.829	1.562	85.365		
Y <sup>89</sup>	0.219	0.189	0.452	0.250		0.121	0.246	0.125	50.591		
Zr <sup>90</sup>		1.2	2.2				1.7	0.7	41.6		
Nb <sup>93</sup>	0.208	0.408	0.456	0.153	0.260	0.506	0.332	0.144	43.468	0.270	122.901
Mo <sup>97</sup>	13.33	12.24	11.47	10.84	11.29	12.30	11.91	0.89	7.51		
La <sup>139</sup>			0.192				0.192				
Ce <sup>140</sup>		0.026	0.131				0.079	0.074	94.581		
Pr <sup>141</sup>	0.0296		0.0310				0.0303	0.0010	3.2672		
Nd <sup>146</sup>						0.265	0.265				
Sm <sup>147</sup>	0.192					0.219	0.206	0.019	9.290		
Eu <sup>153</sup>											
Gd <sup>157</sup>						0.082	0.082				
Tb <sup>159</sup>			0.0120	0.0107		0.0104	0.0110	0.0009	7.7084		
Dy <sup>163</sup>	0.108						0.108				
Ho <sup>165</sup>			0.0154	0.0148			0.0151	0.0004	2.8097		
Er <sup>166</sup>	0.081		0.078				0.080	0.002	2.668		
Tm <sup>169</sup>			0.0217	0.0182			0.0200	0.0025	12.4054		
Yb <sup>172</sup>			0.072			0.100	0.086	0.020	23.022		
Lu <sup>175</sup>			0.0107	0.0070	0.0290		0.0156	0.0118	75.6731		
Hf <sup>178</sup>											
Ta <sup>181</sup>	0.210	2.090	2.050	0.295	0.610	2.650	1.318	1.066	80.909	0.830	158.735
W <sup>182</sup>			0.16				0.16				
Re <sup>185</sup>											
Pb <sup>208</sup>	1.95	2.95	3.46	1.91	1.80	2.08	2.36	0.68	28.89	0.30	786.11
Bi <sup>209</sup>	0.0071	0.0033	0.1400	0.0048	0.0027	0.0025	0.0267	0.0555	207.6640		
Th <sup>232</sup>	0.073		0.121				0.097	0.034	34.991		
U <sup>238</sup>	0.1860		0.4030			0.0299	0.2063	0.1874	90.8272		

$\sigma$  = standard deviation; RSD = recuperation standard deviation; OV = obtained values; TR = total recuperation; TR = values out of 80 to 120.



**Table 16A:** LA-ICP-MS results of trace elements, used in this study, for all iron oxides of the different lithotypes analysed in the Minerita deposit. Data in ppm.

Lithotypes	Minerals	Spot	Mg <sup>24</sup>	Al <sup>27</sup>	Si <sup>29</sup>	Ti <sup>49</sup>	V <sup>51</sup>	Cr <sup>53</sup>	Mn <sup>55</sup>	Co <sup>59</sup>	Zn <sup>66</sup>	Ga <sup>71</sup>	Pb <sup>208</sup>	
Quartz itabirite (QI)	Martite	S4_SMPABC010	449.71	187.94	9609.41	44.14	24.10	12.54	66.21	1.221	3.68	0.349	3.56	
	Martite	S4_SMPABC011	174.25	121.44	9161.06	55.97	26.46	10.40	79.10	0.599	1.49	0.336	3.61	
	Martite	S4_SMPABC012	211.31	157.09	3660.96	37.55	19.62	5.68	77.89	0.603	2.92	0.343	2.53	
	Martite	S4_SMPABC020	774.55	222.93	9804.86	68.79	17.97	7.52	115.73	2.090	5.53	0.433	3.94	
	Martite	S4_SMPABC021	240.88	589.97	3207.76	41.08	41.08	17.25	158.82	1.480	4.67	0.373	3.24	
	Martite	S4_SMPABC022	333.06	220.36	62.30	62.30	33.39	4.87	148.92	0.661	2.91	0.404	4.87	
	Martite	S4_SMPABC023	681.99	227.17	7391.54	49.73	35.20	18.05	343.79	5.580	3.50	0.410	8.33	
	Anhedral hematite	S4_SMPABC013	301.62	230.22	9255.51	35.00	47.89	5.20	94.08	0.555	2.63	0.426	2.76	
	Anhedral hematite	S4_SMPABC014	218.21	337.68	9120.36	50.05	90.91	33.80	69.60	1.970	6.14	0.467	3.25	
	Anhedral hematite	S4_SMPABC016	93.99	404.96	13984.44	32.37	134.32	46.11	57.41	1.299	6.99	0.423	3.83	
	Anhedral hematite	S4_SMPABC017	133.30	325.76	11888.71	36.88	115.67	43.25	37.87	0.534	4.85	0.366	2.21	
	Anhedral hematite	S4_SMPABC025	97.17	426.69		15.02	63.19	10.42	110.78	1.990	4.00	0.403	2.38	
	Anhedral hematite	S4_SMPABC026	217.50	227.84	13624.53	29.08	40.73	7.05	145.84	0.858	5.93	0.352	4.75	
Quartz- veined quartz itabirite (QVQI)	Kenomagnetite	S1_SMPABC015	216.03	159.91	4774.41	90.86	82.04	3.30	209.90	1.175	3.40	0.334	3.11	
	Kenomagnetite	S1_SMPABC018	920.52	147.65	9148.61	96.31	27.04	3.75	80.87	3.030	4.47	0.413	2.31	
	Kenomagnetite	S1_SMPABC021	236.98	182.35		90.22	31.35	6.31	154.42	2.390	5.01	0.403	1.75	
	Kenomagnetite	S1_SMPABC033	624.84	177.98	12273.15	88.72	30.71	13.23	100.57	1.990	5.15	0.380	2.22	
	Martite	S1_SMPABC010	500.00	216.68	10367.14	101.59	34.83	6.77	65.43	1.231	3.82	0.393	3.10	
	Martite	S1_SMPABC012	209.03	144.31	4971.37	105.80	60.12	16.15	92.57	0.587	2.80	0.294	2.13	
	Martite	S1_SMPABC020	262.42	182.01	10464.55	104.67	39.04	11.85	90.25	1.362	2.61	0.293	2.77	
	Martite	S1_SMPABC022	270.10	162.90	1034.89	91.19	23.60	6.26	93.20	0.854	2.89	0.287	1.58	
	Martite	S1_SMPABC023	443.89	180.10	9653.21	68.50	22.57	7.85	104.61	1.810	3.07	0.341	2.05	
	Martite	S1_SMPABC036	535.09	165.67	9563.74	84.21	19.23	3.31	95.47	2.910	2.41	0.381	3.15	
	Martite	S1_SMPABC037	734.56	399.27	16619.94	103.69	26.20		135.22	2.960	9.10	0.388	10.79	
	Martite	S1_SMPABC038	770.80	680.92	6109.39	88.31	19.95	15.49	104.26	2.430	3.14	0.340	2.38	
	Martite	S1_SMPABC039	145.23	196.51	120.59	120.59	60.08	8.38	210.74	1.850	3.39	0.268	3.14	
	Martite	S1_SMPABC041	460.04	160.91	9950.21	99.83	40.28	3.43	98.31	1.223	3.09	0.349	2.69	
	Martite	S1_SMPABC044	811.83	635.27	15467.08	92.70	19.93	9.05	112.67	3.200	4.77	0.415	4.22	
	Martite	S1_SMPABC045	362.04	152.35	9457.75	98.30	32.03	9.41	102.36	0.982	2.55	0.386	2.67	
	Martite	S1_SMPABC058	336.91	490.83	4827.70	73.10	49.23	13.31	110.11	0.948	2.76	0.356	1.89	
	Anhedral hematite	S1_SMPABC017	270.12	251.23	9952.83	74.77	75.76	12.30	81.02	1.870	2.90	0.440	1.66	
	Itabirite breccia (IB)	Martite	S6_SMPABC020	543.63	98.38	14961.56	22.30	12.56		176.82	0.717	2.65	0.281	4.06
		Martite	S6_SMPABC022	433.35	146.96	19832.93	23.65	11.60	8.60	210.81	0.843	3.20	0.318	5.89
Martite		S6_SMPABC027	681.02	138.23	15140.41	20.51	17.67		150.58	2.160	5.28	0.374	6.76	
Anhedral hematite		S6_SMPABC015	54.11	680.75		16.01	97.45	14.60	130.48	2.090	1.78	0.415	3.58	
Anhedral hematite		S6_SMPABC016	49.80	613.31	9907.44	17.91	93.24	11.92	97.38	2.170	1.79	0.474	3.73	
Anhedral hematite		S6_SMPABC018	62.90	714.97	4311.44	8.50	66.33	20.15	33.17	1.900	2.89	0.407	2.69	
Anhedral hematite		S6_SMPABC019	67.36	744.91	2949.99	7.87	71.75	9.53	28.75	1.940	2.41	0.340	2.50	
Anhedral hematite		S6_SMPABC024	518.73	337.09	3676.39	23.09	35.55	14.28	167.10	1.426	5.45	0.439	4.32	
Anhedral hematite		S6_SMPABC025	464.47	144.16	4432.39	14.94	32.30	7.37	201.65	2.410	4.74	0.336	5.03	
Anhedral hematite		S6_SMPABC026	295.53	136.10	9401.25	15.54	22.95	3.27	139.31	1.790	3.42	0.397	4.24	
Anhedral hematite		S6_SMPABC029	361.82	154.82	6447.83	17.14	24.94	13.92	143.12	2.560	5.70	0.579	9.00	

**Table 16A:** LA-ICP-MS results of trace elements, used in this study, for all iron oxides of the different lithotypes analysed in the Minerita deposit. Data in ppm (cont.).

Lithotypes	Minerals	Spot	Mg <sup>24</sup>	Al <sup>27</sup>	Si <sup>29</sup>	Ti <sup>49</sup>	V <sup>51</sup>	Cr <sup>53</sup>	Mn <sup>55</sup>	Co <sup>59</sup>	Zn <sup>66</sup>	Ga <sup>71</sup>	Pb <sup>208</sup>
	Kenomagnetite	S2_SMPABC013	863.55	273.54	11818.49	44.07	25.00	6.84	76.81	0.950	3.43	0.379	1.86
	Kenomagnetite	S2_SMPABC015	421.63	320.39	12403.85	30.37	29.04	3.91	101.22	7.820	6.03	0.412	0.59
	Kenomagnetite	S2_SMPABC017	691.19	335.06		55.09	32.69		128.42	9.370	9.29	0.824	1.82
	Kenomagnetite	S2_SMPABC035	906.55	239.83	8760.86	72.46	27.38	10.19	154.26	3.450	8.94	0.866	3.36
	Martite	S2_SMPABC018	122.36	287.13	6345.83	75.79	30.23	3.62	109.50	1.850	3.25	0.417	1.67
	Martite	S2_SMPABC020	44.35	429.08	4932.82	109.25	101.54	8.78	110.19	0.630	3.76	0.537	0.77
	Martite	S2_SMPABC037	246.89	383.37		80.35	42.55	5.80	18.14	0.510	2.82	0.635	1.69
	Martite	S2_SMPABC044	166.22	198.39		58.58	22.03	6.04	29.50	1.450	3.06	0.738	2.22
	Martite	S2_SMPABC045	49.34	335.06	16023.84	69.36	32.85	5.08	66.80	0.850	4.63	0.565	1.23
Massive high-grade iron ore (MIO)	Anhedral hematite	S2_SMPABC010	67.11	269.57	1832.20	16.35	71.75	9.64	20.25	0.740	3.11		0.43
	Anhedral hematite	S2_SMPABC012	117.87	285.48	12962.45	22.76	65.70	8.30	35.63	0.412	2.77	0.354	0.56
	Anhedral hematite	S2_SMPABC014	195.92	312.95	15846.07	31.80	45.37	9.71	29.69	0.284	2.50	0.253	0.50
	Anhedral hematite	S2_SMPABC016	375.71	319.68	3288.73	24.42	102.19	7.31	101.04	0.670	2.41	0.325	0.87
	Anhedral hematite	S2_SMPABC019	48.09	392.23	9233.51	37.48	101.59	17.73	21.07	0.670	2.27	0.619	0.48
	Anhedral hematite	S2_SMPABC022	8.82	194.83		30.21	88.78	5.77	12.56	0.640	5.99	0.758	0.70
	Anhedral hematite	S2_SMPABC036	113.90	182.95	16461.72	31.10	62.89	13.28	30.39	0.740	3.42	0.419	2.22
	Anhedral hematite	S2_SMPABC038	307.65	219.32	11219.77	14.54	56.33	11.02	24.47	0.490	4.69	0.433	1.31
	Anhedral hematite	S2_SMPABC040	229.19	208.86		23.86	47.25	5.19	20.66	0.550	4.75	0.580	1.89
	Anhedral hematite	S2_SMPABC042	3.95	210.52	9056.99	30.09	117.68	10.71	12.06	0.421	2.33	0.549	0.41
	Anhedral hematite	S2_SMPABC043	44.63	193.73	13583.42	28.72	94.51	12.00	27.23	0.680	3.12	0.564	0.50
	Anhedral hematite	S2_SMPABC056	163.68	200.55		49.04	80.24	10.60	214.18	0.830	2.42	0.458	1.47
	Anhedral hematite	S2_SMPABC057	355.97	215.73		20.31	52.61	6.90	132.04	0.680	3.02	0.500	1.77

**Table 16A:** LA-ICP-MS results of trace elements, used in this study, for all iron oxides of the different lithotypes analysed in the Minerita deposit. Data in ppm (cont.).

Lithotypes	Minerals	Spot	Mg <sup>24</sup>	Al <sup>27</sup>	Si <sup>29</sup>	Ti <sup>49</sup>	V <sup>51</sup>	Cr <sup>53</sup>	Mn <sup>55</sup>	Co <sup>59</sup>	Zn <sup>66</sup>	Ga <sup>71</sup>	Pb <sup>208</sup>
Sulfide breccia (SB)	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC036	682.40	52.07	3561.03	8.72	3.22	8.76	122.49	0.393	35.35	0.437	4.63
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC038	1719.89	184.35		11.51	3.28	4.37	144.98	0.324	90.02	0.390	1.89
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC042	731.90	42.53	6070.27	15.18	3.43	3.63	131.00	0.177	45.31	0.386	1.65
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC039	1587.88	81.14		11.05	3.19		132.72	0.134	54.93	0.405	3.31
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC041	1444.86	69.84		10.63	3.36		137.68	0.150	62.11	0.423	2.25
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC013	1989.22	257.34	16081.33	12.54	3.65		197.92	1.204		70.910	4.27
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC014	1545.57	227.63	8765.36	10.24	3.40		166.93	1.050	11.04	66.940	3.25
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC023	1375.46	402.93	13285.69	10.46	3.41		189.53	1.191	25.47	71.190	6.10
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC024	1367.01	131.99	1008.64	9.26	3.33		184.79	0.896	10.36	69.880	4.46
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC025	950.02	99.77	9227.05	7.98	3.37	6.78	201.90	1.146	17.45	62.390	4.81
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC030	2093.52	282.63	13675.03	10.19	2.99		169.77	0.877		68.340	3.73
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC031	1092.62	105.62	18855.33	10.37	3.30		178.44	0.897	18.28	61.660	4.50
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC032	1014.40	68.43	8150.79	7.06	3.21	6.52	185.65	0.974	21.82	55.640	4.64
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC016	1711.18	180.62	16251.29	7.72	3.23		173.91	1.728	13.23	67.600	2.93
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC018	1257.34	178.40	15035.73	9.43	3.51	5.33	166.25	1.162	9.21	64.970	4.11
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC019	1351.44	151.11	10378.46	7.68	3.55	7.51	189.30	1.086		72.200	3.71
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC026	1385.40	230.64	13018.00	8.16	3.10	6.76	188.42	1.033	10.49	78.660	2.27
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC027	154.47	31.07	7151.76	3.44	2.99	6.64	172.90	0.988	12.29	62.620	2.38
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC029	1275.00	129.75	11399.09	7.92	3.36	11.78	193.06	1.045	19.28	80.310	3.11
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC010	1315.14	172.43	17228.15	8.15	3.10		163.58	1.103	20.58	59.530	4.04
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC011	1405.40	209.32	19322.03	7.26	3.53	7.31	158.19	1.113	7.82	64.710	3.21
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC021	1750.76	224.78	12276.04	10.97	3.31		185.04	1.094	11.99	64.200	5.53
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC022	816.53	294.28	13220.06	8.26	3.20	9.92	168.15	1.052		60.470	5.86
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC018	1483.02	103.43		10.30	3.41	14.76	122.12	1.274	40.30	0.402	6.70
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC020	1176.54	104.39		11.45	3.30	10.31	140.91	2.230	39.32	0.476	6.96
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC021	1367.26	69.51	7132.91	9.50	3.36	8.41	123.57	0.343	37.37	0.386	4.31
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC046	29.75	26.33		10.50	3.52	5.48	140.23	0.220	59.20	0.399	0.75
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC050	135.39	32.93	15205.50	5.83	3.21		142.02	0.115	46.24	0.393	1.16
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC015	1393.28	213.12	4698.89	11.26	3.35		177.85	1.894		73.180	4.55
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC017	1169.22	172.58	1324.29	10.21	3.55	9.52	177.33	2.310	23.24	73.040	5.11
	Anhedral hematite	S3_SMPABC012	791.15	1189.86		214.87	3.08	6.31	82.88	0.239	3863.12	0.251	11.71
	Anhedral hematite	S3_SMPABC014	1189.74	581.96		133.69	4.05	3.55	126.37	0.290	3519.47	0.283	10.24

**Table 17A:** LA-ICP-MS results of REEs for all iron oxides of the different lithotypes analysed in the Minerita deposit. Data in ppm.

Lithotypes	Minerals	Spot	Y <sup>89</sup>	La <sup>139</sup>	Ce <sup>140</sup>	Pr <sup>141</sup>	Nd <sup>146</sup>	Sm <sup>147</sup>	Eu <sup>153</sup>	Gd <sup>157</sup>	Tb <sup>159</sup>	Dy <sup>163</sup>	Ho <sup>165</sup>	Er <sup>166</sup>	Tm <sup>169</sup>	Yb <sup>172</sup>
Quartz itabirite (QI)	Martite	S4_SMPABC010	4.950	1.198	1.693	0.2490	1.2110	0.361	0.1400	0.3830	0.0798	0.8600	0.2060	0.5670	0.1010	0.4560
	Martite	S4_SMPABC011	6.940	1.493	2.082	0.2970	1.6900	0.465	0.2490	0.5520	0.1170	1.0300	0.2600	0.5990	0.1010	0.5790
	Martite	S4_SMPABC012	7.870	1.435	1.918	0.2650	1.4400	0.497	0.1900	0.5090	0.1170	0.8900	0.2860	0.7120	0.1160	0.7710
	Martite	S4_SMPABC020	5.060	1.196	1.803	0.2560	1.1700	0.282	0.1250	0.4470	0.1050	0.7800	0.1510	0.4790	0.0930	0.4880
	Martite	S4_SMPABC021	4.820	1.150	2.050	0.2940	1.6100	0.633	0.2120	0.5440	0.0960	0.9300	0.1910	0.5570	0.1060	0.6310
	Martite	S4_SMPABC022	7.380	1.710	2.580	0.3440	1.9800	0.584	0.2540	0.7130	0.1200	1.0100	0.2680	0.6730	0.0730	0.8800
	Martite	S4_SMPABC023	8.090	2.140	3.130	0.3950	2.2400	0.669	0.2960	0.8430	0.1480	0.9400	0.2590	0.6610	0.1120	0.5780
	Anhedral hematite	S4_SMPABC013	7.370	1.313	1.848	0.2600	1.3300	0.465	0.1950	0.5150	0.1070	1.0700	0.2340	0.6250	0.0990	0.5590
	Anhedral hematite	S4_SMPABC014	4.900	1.163	1.619	0.2260	1.1000	0.348	0.1800	0.4340	0.0840	0.6260	0.1690	0.4070	0.0720	0.4800
	Anhedral hematite	S4_SMPABC016	4.320	1.098	1.554	0.2300	1.1600		0.0950	0.4510	0.0790	0.5840	0.1320	0.3710	0.0550	0.3540
	Anhedral hematite	S4_SMPABC017	3.160	0.716	1.059	0.1340	0.7640	0.131	0.0890	0.3280	0.0760	0.4200	0.1260	0.3340	0.0381	0.2550
	Anhedral hematite	S4_SMPABC025	3.260	0.838	1.317	0.1660	1.2200	0.274	0.1290	0.3200	0.0790	0.6900	0.0860	0.4610	0.0670	0.3220
	Anhedral hematite	S4_SMPABC026	5.000	1.350	2.090	0.2600	1.3500	0.327	0.1700	0.4860	0.1100	0.6700	0.1230	0.4300	0.0840	0.3430
	Quartz- veined quartz itabirite (QVQI)	Kenomagnetite	S1_SMPABC015	6.470	1.000	1.174	0.1790	1.0100		0.0730	0.3670	0.0970	0.6630	0.1990	0.5320	0.0710
Kenomagnetite		S1_SMPABC018	4.910	0.900	1.471	0.1450	0.5770	0.146	0.0621	0.3020	0.0588	0.4860	0.1600	0.3950	0.0770	0.4070
Kenomagnetite		S1_SMPABC021	5.500	0.689	0.840	0.1140	0.5400	0.178	0.0490	0.3670	0.0890	0.6130	0.1460	0.5170	0.0820	0.5330
Kenomagnetite		S1_SMPABC033	3.860	0.511	0.689	0.1160	0.4820	0.240	0.0491	0.1340	0.0567	0.5940	0.1120	0.2740	0.0680	0.3740
Martite		S1_SMPABC010	5.430	0.558	0.845	0.1030	0.5390	0.246	0.0276	0.2030	0.0821	0.6530	0.1660	0.5050	0.0830	0.4340
Martite		S1_SMPABC012	5.950	0.684	0.868	0.1010	0.6220	0.229	0.0741	0.3140	0.0654	0.5630	0.1390	0.4080	0.0550	0.2600
Martite		S1_SMPABC020	5.150	0.736	1.025	0.1050	0.5990	0.159	0.0980	0.1630	0.0600	0.4120	0.1430	0.3310	0.0380	0.2770
Martite		S1_SMPABC022	4.370	0.518	0.686	0.0980	0.4980	0.172	0.0264	0.2330	0.0670	0.3970	0.1250	0.3230	0.0700	0.3320
Martite		S1_SMPABC023	3.170	0.471	0.491	0.1010	0.3700	0.207	0.0740	0.1910	0.0421	0.5020	0.1130	0.3560	0.0480	0.3610
Martite		S1_SMPABC036	7.090	0.739	0.945	0.1300	0.5920	0.136	0.0740	0.3790	0.0840	0.7300	0.1590	0.6400	0.1130	0.4600
Martite		S1_SMPABC037	7.410	1.420	1.770	0.2270	1.1300	0.337	0.1550	0.4110	0.0640	0.9310	0.1730	0.5100	0.0760	0.5600
Martite		S1_SMPABC038	5.170	0.620	0.772	0.1140	0.5850	0.337	0.0670	0.2650	0.0580	0.4610	0.1650	0.4900	0.0760	0.5800
Martite		S1_SMPABC039	9.210	1.260	1.410	0.2290	1.0200	0.251	0.1180	0.5220	0.1390	0.9700	0.2490	0.6500	0.1250	0.8000
Martite		S1_SMPABC041	4.930	0.810	0.956	0.1530	0.4530	0.340	0.0810	0.3250	0.0840	0.5460	0.1840	0.3400	0.0600	0.5000
Martite	S1_SMPABC044	5.950	0.726	0.901	0.1540	0.6400	0.164	0.0890	0.4000	0.0700	0.4960	0.1660	0.4700	0.0990	0.5300	
Martite	S1_SMPABC045	6.090	0.770	1.006	0.1180	0.5400	0.345	0.0570	0.4060	0.0720	0.7460	0.1720	0.5300	0.0860	0.3470	
Martite	S1_SMPABC058	4.970	0.720	0.845	0.0800	0.5600	0.290	0.0950	0.1770	0.1000	0.5910	0.1540	0.4000	0.0660	0.3400	
Anhedral hematite	S1_SMPABC017	3.330	0.447	0.683	0.0738	0.437	0.133	0.0486	0.201	0.0404	0.449	0.086	0.303	0.0393	0.277	
Itabirite breccia (IB)	Martite	S6_SMPABC020	7.990	1.410	1.870	0.2470	1.4000	0.380	0.1420	0.6080	0.1510	0.7800	0.2150	0.5970	0.1270	0.6000
	Martite	S6_SMPABC022	6.110	0.924	1.256	0.1920	0.6700		0.1320	0.3250	0.1210	0.5730	0.1720	0.7270	0.0770	0.5900
	Martite	S6_SMPABC027	9.610	2.010	2.300	0.3790	1.6400	0.790	0.1560	0.7230	0.1450	0.8700	0.3180	0.9600	0.1360	0.7200
	Anhedral hematite	S6_SMPABC015	5.170	1.650	3.040	0.3240	1.3700	0.400	0.1650	0.6370	0.0660	0.9590	0.2180	0.7070	0.1050	0.6600
	Anhedral hematite	S6_SMPABC016	5.990	1.426	2.130	0.2770	1.0600		0.1350	0.6490	0.0960	0.7770	0.2010	0.6820	0.0900	0.6500
	Anhedral hematite	S6_SMPABC018	4.480	1.129	1.520	0.1670	1.0600		0.0770	0.4440	0.0690	0.5400	0.1090	0.5350	0.1030	0.3310
	Anhedral hematite	S6_SMPABC019	4.060	1.039	1.520	0.2040	0.9900	0.440		0.2670	0.0420	0.6430	0.2020	0.4300	0.0750	0.3670
	Anhedral hematite	S6_SMPABC024	7.750	1.440	2.060	0.3230	1.4500		0.1110	0.5160	0.1280	0.9900	0.2030	0.6460	0.1280	0.5700
	Anhedral hematite	S6_SMPABC025	7.220	1.410	1.930	0.2180	1.3900	0.340	0.2510	0.5630	0.1400	1.0100	0.2400	0.6960	0.0970	0.7300
	Anhedral hematite	S6_SMPABC026	7.700	1.380	2.190	0.2610	1.6600	0.400	0.1290	0.6480	0.1580	1.1500	0.2400	0.7900	0.1120	0.4900
	Anhedral hematite	S6_SMPABC029	9.570	2.040	2.650	0.3560	2.3900	0.500	0.1640	0.7360	0.1700	1.2800	0.2760	0.9300	0.1560	0.5500



**Table 17A: LA-ICP-MS results of REEs for all iron oxides of the different lithotypes analysed in the Minerita deposit. Data in ppm (cont.).**

Lithotypes	Minerals	Spot	Y <sup>89</sup>	La <sup>139</sup>	Ce <sup>140</sup>	Pr <sup>141</sup>	Nd <sup>146</sup>	Sm <sup>147</sup>	Eu <sup>153</sup>	Gd <sup>157</sup>	Tb <sup>159</sup>	Dy <sup>163</sup>	Ho <sup>165</sup>	Er <sup>166</sup>	Tm <sup>169</sup>	Yb <sup>172</sup>
	Kenomagnetite	S2_SMPABC013	3.100	0.860	1.500	0.2640	1.0500	0.315	0.0960	0.1790	0.0510	0.3600	0.1130	0.2840	0.0350	0.2740
	Kenomagnetite	S2_SMPABC015	0.730	0.470	0.510	0.0610	0.2530	0.253	0.0357		0.0207		0.0317			0.0760
	Kenomagnetite	S2_SMPABC017	3.130	1.070	1.580	0.1970	1.1400		0.0610	0.0830	0.0284	0.3270	0.1150	0.1920		0.1570
	Kenomagnetite	S2_SMPABC035	2.790	0.660	0.940	0.1490	0.7400	0.310	0.0790	0.2100	0.0445	0.4350	0.0870	0.1720	0.0710	0.3760
	Martite	S2_SMPABC018	2.310	1.220	1.540	0.1710	0.8400	0.195	0.0560	0.1380	0.0490	0.1730	0.0760	0.1800	0.0211	0.1010
	Martite	S2_SMPABC020	1.150	0.750	0.800	0.1250	0.4300		0.0390	0.0470	0.0179		0.0810	0.0810		0.1240
	Martite	S2_SMPABC037	1.930	0.340	0.750	0.0990	0.5100	0.225	0.0305	0.1740	0.0259	0.1890	0.0610	0.1280	0.0430	0.1550
	Martite	S2_SMPABC044	2.620	0.720	1.060	0.1700	0.7900	0.210	0.0599	0.2110	0.0446	0.2900	0.1190	0.2170	0.0316	0.2250
	Martite	S2_SMPABC045	1.920	0.650	0.950	0.1300	0.5200		0.0580	0.1240	0.0359	0.3210	0.0400	0.1370	0.0420	0.2070
Massive high-grade iron ore (MIO)	Anhedral hematite	S2_SMPABC010	0.313	0.197	0.208	0.0630	0.1450				0.0104		0.0270	0.0920	0.0290	
	Anhedral hematite	S2_SMPABC012	1.460	0.420	0.740	0.0720	0.4500	0.254				0.1160		0.0800	0.0207	0.1590
	Anhedral hematite	S2_SMPABC014	0.820	0.280	0.490	0.0580	0.2510				0.0214	0.1900	0.0380	0.1690	0.0460	
	Anhedral hematite	S2_SMPABC016	1.720	0.520	0.830	0.1280	0.5300	0.211	0.0390		0.0401	0.3280		0.0820	0.0330	0.1020
	Anhedral hematite	S2_SMPABC019	1.380	0.220	0.650	0.0510	0.4800		0.0410	0.0850	0.0250	0.2230	0.0490	0.1030	0.0383	0.2030
	Anhedral hematite	S2_SMPABC022	0.111	0.046	0.026		0.1190	0.073	0.0180			0.0660				
	Anhedral hematite	S2_SMPABC036	2.480	0.790	1.000	0.1370	0.8900	0.265	0.0680	0.2090	0.0550	0.4120	0.0870	0.2160	0.0289	0.3080
	Anhedral hematite	S2_SMPABC038	2.760	0.490	0.870	0.1170	0.7500	0.154	0.0606	0.2240	0.0510	0.2980	0.0900	0.2200	0.0520	0.2360
	Anhedral hematite	S2_SMPABC040	3.650	0.900	1.510	0.1700	0.9900	0.410	0.0680	0.2660	0.0660	0.5700	0.1440	0.3060	0.0510	0.3020
	Anhedral hematite	S2_SMPABC042	0.670	0.170	0.280	0.0340	0.2100	0.126	0.0202	0.0490	0.0133	0.0510		0.0430	0.0135	0.0760
	Anhedral hematite	S2_SMPABC043	1.120	0.140	0.320	0.0490	0.4100		0.0229	0.0830	0.0178	0.1860	0.0387	0.0830		
	Anhedral hematite	S2_SMPABC056	3.660	1.300	1.610	0.2100	1.3100	0.310	0.0810	0.1860	0.0460	0.5500	0.0960	0.1610	0.0710	0.2290
	Anhedral hematite	S2_SMPABC057	4.630	1.640	2.550	0.3100	1.3300	0.330	0.1100	0.2510	0.0650	0.5800	0.1130	0.2890	0.0530	0.2570

**Table 17A:** LA-ICP-MS results of REEs for all iron oxides of the different lithotypes analysed in the Minerita deposit. Data in ppm (cont.).

Lithotypes	Minerals	Spot	Y <sup>89</sup>	La <sup>139</sup>	Ce <sup>140</sup>	Pr <sup>141</sup>	Nd <sup>146</sup>	Sm <sup>147</sup>	Eu <sup>153</sup>	Gd <sup>157</sup>	Tb <sup>159</sup>	Dy <sup>163</sup>	Ho <sup>165</sup>	Er <sup>166</sup>	Tm <sup>169</sup>	Yb <sup>172</sup>		
Sulfide breccia (SB)	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC036	0.201	0.207	0.168	0.0278			0.0117	0.0272	0.0056						0.0510	
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC038				0.0287					0.0052		0.0242	0.0740				
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC042	0.154		0.054	0.0197			0.0107		0.0098							
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC039	0.236		0.096	0.0263	0.1260	0.114	0.0146					0.0123	0.0297	0.0325		
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC041	0.336		0.035			0.173			0.0150	0.0055	0.0600					
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC013	0.845	0.250		0.1270					0.0300	0.0630	0.0210					0.0387
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC014	0.881	0.263	0.063	0.0970	0.0303			0.0322	0.0440		0.0092		0.0345			
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC023	0.707	0.193	0.157	0.2440							0.0230					0.0209
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC024	0.837	0.132	0.151	0.2360										0.0830		
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC025	0.723	0.230		0.0840	0.0450					0.1340						0.0290
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC030	0.713	0.197		0.0850			0.149									
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC031	0.761	0.176	0.074	0.0750						0.0830						
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC032	0.643	0.146	0.120	0.1630									0.0334			0.0248
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC016	0.646	0.424	0.096	0.1110					0.0340				0.0298			0.0372
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC018	0.804	0.240	0.117	0.1290	0.0510				0.0600			0.1050	0.0224			
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC019	0.880	0.289	0.257	0.1040				0.0420		0.0750		0.0880				
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC026	0.828	0.226		0.1070	0.0522	0.269		0.0250			0.0203	0.1010	0.0300	0.1190	0.0399	
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC027	0.572									0.0630			0.0283	0.1350		
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC029	0.749	0.209		0.0630							0.0165	0.1580		0.0710		
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC010	0.692	0.211	0.091	0.2360			0.208	0.0443				0.1430	0.0108	0.1200		
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC011	0.817	0.242		0.0930			0.093			0.0990				0.0570		
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC021	0.758	0.174	0.180	0.2020	0.0410				0.0440	0.0770				0.1360		
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC022	0.637	0.203		0.1190					0.0450				0.0284			
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC018	0.596		0.070	0.0342					0.0265	0.0144	0.0720	0.0113				0.1860
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC020	0.678	0.169	0.128						0.0198	0.0064		0.0334	0.0780	0.0248		
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC021	0.601		0.162	0.0498					0.0261	0.0056			0.0550			
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC046		0.055	0.074	0.0512	0.1020						0.0280		0.0298	0.0292	0.0460	
	Hydrothermal magnetite	S3_SMPABC050	0.054		0.043						0.0220			0.0110			0.0790	
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC015	0.749	0.195	0.074	0.1360						0.0700			0.0159		0.0450	
	Hydrothermal magnetite	S5_SMPABC017	0.860	0.175	0.111	0.1990				0.0520		0.0840					0.0184	
Anhedral hematite	S3_SMPABC012	0.760	1.041	1.023	0.0940	0.5430	0.096	0.0310	0.1190	0.1190	0.0223		0.0400	0.1180		0.0540		
Anhedral hematite	S3_SMPABC014	0.506	0.831	0.631		0.1420	0.121	0.0266	0.0621	0.0621	0.0059	0.0670	0.0199	0.0830		0.0750		

**Table 18A:** Kenomagnetite in QVQI normalization for discriminating elements, and Pb, to the martite in itabirites and iron ore.

<b>Mineral</b>	<b>Mg<sup>24</sup></b>	<b>Al<sup>27</sup></b>	<b>Ti<sup>49</sup></b>	<b>V<sup>51</sup></b>	<b>Cr<sup>53</sup></b>	<b>Mn<sup>55</sup></b>	<b>Co<sup>59</sup></b>	<b>Zn<sup>66</sup></b>	<b>Ga<sup>71</sup></b>	<b>Pb<sup>208</sup></b>
Kenomagnetite in QVQI (n = 4) (mean values)	499.59	166.97	91.53	42.79	6.65	136.44	2.146	4.51	0.383	2.35
	0.90	1.13	0.48	0.56	1.89	0.49	0.569	0.82	0.912	1.52
	0.35	0.73	0.61	0.62	1.56	0.58	0.279	0.33	0.878	1.54
	0.42	0.94	0.41	0.46	0.85	0.57	0.281	0.65	0.897	1.08
Martite in QI (n = 7)	1.55	1.34	0.75	0.42	1.13	0.85	0.974	1.23	1.132	1.68
	0.48	3.53	0.45	0.96	2.59	1.16	0.690	1.04	0.975	1.38
	0.67	1.32	0.68	0.78	0.73	1.09	0.308	0.65	1.056	2.07
	1.37	1.36	0.54	0.82	2.72	2.52	2.600	0.78	1.072	3.55
	1.00	1.30	1.11	0.81	1.02	0.48	0.574	0.85	1.027	1.32
	0.42	0.86	1.16	1.41	2.43	0.68	0.274	0.62	0.769	0.91
	0.53	1.09	1.14	0.91	1.78	0.66	0.635	0.58	0.766	1.18
	0.54	0.98	1.00	0.55	0.94	0.68	0.398	0.64	0.750	0.67
	0.89	1.08	0.75	0.53	1.18	0.77	0.843	0.68	0.892	0.87
	1.07	0.99	0.92	0.45	0.50	0.70	1.356	0.53	0.996	1.34
Martite in QVQI (n = 13)	1.47	2.39	1.13	0.61		0.99	1.379	2.02	1.014	4.60
	1.54	4.08	0.96	0.47	2.33	0.76	1.132	0.70	0.889	1.01
	0.29	1.18	1.32	1.40	1.26	1.54	0.862	0.75	0.701	1.34
	0.92	0.96	1.09	0.94	0.52	0.72	0.570	0.69	0.912	1.15
	1.62	3.80	1.01	0.47	1.36	0.83	1.491	1.06	1.085	1.80
	0.72	0.91	1.07	0.75	1.42	0.75	0.458	0.57	1.009	1.14
	0.67	2.94	0.80	1.15	2.00	0.81	0.442	0.61	0.931	0.81
	1.09	0.59	0.24	0.29		1.30	0.334	0.59	0.735	1.73
Martite in IB (n = 7)	0.87	0.88	0.26	0.27	1.29	1.55	0.393	0.71	0.831	2.51
	1.36	0.83	0.22	0.41		1.10	1.006	1.17	0.978	2.88
	0.24	1.72	0.83	0.71	0.54	0.80	0.862	0.72	1.090	0.71
	0.09	2.57	1.19	2.37	1.32	0.81	0.294	0.83	1.404	0.33
Martite in MIO (n = 5)	0.49	2.30	0.88	0.99	0.87	0.13	0.238	0.63	1.660	0.72
	0.33	1.19	0.64	0.51	0.91	0.22	0.676	0.68	1.929	0.95
	0.10	2.01	0.76	0.77	0.76	0.49	0.396	1.03	1.477	0.52

n = number of iron oxide crystals analyzed.

QI = quartz itabirite; QVQI = quartz-veined quartz itabirite; IB = itabirite breccia; MIO = massive high-grade iron ore.

**Table 19A:** Kenomagnetite in QVQI normalization for discriminating elements, and Pb, to the anhedral hematite in itabirites and iron ore.

<b>Mineral</b>	<b>Mg<sup>24</sup></b>	<b>Al<sup>27</sup></b>	<b>Ti<sup>49</sup></b>	<b>V<sup>51</sup></b>	<b>Cr<sup>53</sup></b>	<b>Mn<sup>55</sup></b>	<b>Co<sup>59</sup></b>	<b>Zn<sup>66</sup></b>	<b>Ga<sup>71</sup></b>	<b>Pb<sup>208</sup></b>
Kenomagnetite in QVQI (n = 4) (mean values)	499.59	166.97	91.53	42.79	6.65	136.44	2.146	4.51	0.383	2.35
Anhedral hematite in QI (n = 6)	0.60	1.38	0.38	1.12	0.78	0.69	0.259	0.58	1.114	1.18
	0.44	2.02	0.55	2.12	5.08	0.51	0.918	1.36	1.221	1.38
	0.19	2.43	0.35	3.14	6.94	0.42	0.605	1.55	1.106	1.63
	0.27	1.95	0.40	2.70	6.51	0.28	0.249	1.08	0.957	0.94
	0.19	2.56	0.16	1.48	1.57	0.81	0.927	0.89	1.054	1.01
	0.44	1.36	0.32	0.95	1.06	1.07	0.400	1.32	0.920	2.02
Anhedral hematite in QVQI (n = 1)	0.54	1.50	0.82	1.77	1.85	0.59	0.871	0.64	1.150	0.71
Anhedral hematite in IB (n = 8)	0.11	4.08	0.17	2.28	2.20	0.96	0.974	0.39	1.085	1.53
	0.10	3.67	0.20	2.18	1.79	0.71	1.011	0.40	1.239	1.59
	0.13	4.28	0.09	1.55	3.03	0.24	0.885	0.64	1.064	1.15
	0.13	4.46	0.09	1.68	1.43	0.21	0.904	0.53	0.889	1.06
	1.04	2.02	0.25	0.83	2.15	1.22	0.664	1.21	1.148	1.84
	0.93	0.86	0.16	0.75	1.11	1.48	1.123	1.05	0.878	2.14
	0.59	0.82	0.17	0.54	0.49	1.02	0.834	0.76	1.038	1.81
	0.72	0.93	0.19	0.58	2.09	1.05	1.193	1.26	1.514	3.83
Anhedral hematite in MIO (n = 13)	0.13	1.61	0.18	1.68	1.45	0.15	0.345	0.69	0.719	0.18
	0.24	1.71	0.25	1.54	1.25	0.26	0.192	0.61	0.925	0.24
	0.39	1.87	0.35	1.06	1.46	0.22	0.132	0.55	0.661	0.21
	0.75	1.91	0.27	2.39	1.10	0.74	0.312	0.53	0.850	0.37
	0.10	2.35	0.41	2.37	2.67	0.15	0.312	0.50	1.618	0.20
	0.02	1.17	0.33	2.08	0.87	0.09	0.298	1.33	1.982	0.30
	0.23	1.10	0.34	1.47	2.00	0.22	0.345	0.76	1.095	0.95
	0.62	1.31	0.16	1.32	1.66	0.18	0.228	1.04	1.132	0.56
	0.46	1.25	0.26	1.10	0.78	0.15	0.256	1.05	1.516	0.81
	0.01	1.26	0.33	2.75	1.61	0.09	0.196	0.52	1.435	0.17
	0.09	1.16	0.31	2.21	1.81	0.20	0.317	0.69	1.475	0.21
	0.33	1.20	0.54	1.88	1.59	1.57	0.387	0.54	1.197	0.63
	0.71	1.29	0.22	1.23	1.04	0.97	0.317	0.67	1.307	0.75

n = number of iron oxide crystals analyzed.

QI = quartz itabirite; QVQI = quartz-veined quartz itabirite; IB = itabirite breccia; MIO = massive high-grade iron ore.



**Table 20A:** Kenomagnetite in QVQI normalization for discriminating elements, and Pb, to the hydrothermal magnetite and anhedral hematite in sulfide breccia.

<b>Mineral</b>	<b>Mg<sup>24</sup></b>	<b>Al<sup>27</sup></b>	<b>Ti<sup>49</sup></b>	<b>V<sup>51</sup></b>	<b>Cr<sup>53</sup></b>	<b>Mn<sup>55</sup></b>	<b>Co<sup>59</sup></b>	<b>Zn<sup>66</sup></b>	<b>Ga<sup>71</sup></b>	<b>Pb<sup>208</sup></b>
Kenomagnetite in QVQI (n = 4) (mean values)	499.59	166.97	91.53	42.79	6.65	136.44	2.146	4.51	0.383	2.35
	1.37	0.31	0.10	0.08	1.32	0.90	0.183	7.84	1.142	1.97
	3.44	1.10	0.13	0.08	0.66	1.06	0.151	19.97	1.020	0.81
	1.46	0.25	0.17	0.08	0.55	0.96	0.082	10.05	1.009	0.70
	3.18	0.49	0.12	0.07		0.97	0.062	12.19	1.059	1.41
	2.89	0.42	0.12	0.08		1.01	0.070	13.78	1.106	0.96
	3.98	1.54	0.14	0.09		1.45	0.561		185.386	1.82
	3.09	1.36	0.11	0.08		1.22	0.489	2.45	175.007	1.38
	2.75	2.41	0.11	0.08		1.39	0.555	5.65	186.118	2.60
	2.74	0.79	0.10	0.08		1.35	0.417	2.30	182.693	1.90
	1.90	0.60	0.09	0.08	1.02	1.48	0.534	3.87	163.111	2.05
	4.19	1.69	0.11	0.07		1.24	0.409		178.667	1.59
	2.19	0.63	0.11	0.08		1.31	0.418	4.06	161.203	1.92
	2.03	0.41	0.08	0.08	0.98	1.36	0.454	4.84	145.464	1.98
	3.43	1.08	0.08	0.08		1.27	0.805	2.94	176.732	1.25
	2.52	1.07	0.10	0.08	0.80	1.22	0.541	2.04	169.856	1.75
Hydrothermal magnetite in SB (n = 30)	2.71	0.90	0.08	0.08	1.13	1.39	0.506		188.758	1.58
	2.77	1.38	0.09	0.07	1.02	1.38	0.481	2.33	205.647	0.97
	0.31	0.19	0.04	0.07	1.00	1.27	0.460	2.73	163.712	1.01
	2.55	0.78	0.09	0.08	1.77	1.41	0.487	4.28	209.961	1.32
	2.63	1.03	0.09	0.07		1.20	0.514	4.57	155.634	1.72
	2.81	1.25	0.08	0.08	1.10	1.16	0.519	1.73	169.176	1.37
	3.50	1.35	0.12	0.08		1.36	0.510	2.66	167.843	2.36
	1.63	1.76	0.09	0.07	1.49	1.23	0.490		158.092	2.50
	2.97	0.62	0.11	0.08	2.22	0.90	0.594	8.94	1.051	2.85
	2.35	0.63	0.13	0.08	1.55	1.03	1.039	8.72	1.244	2.96
	2.74	0.42	0.10	0.08	1.27	0.91	0.160	8.29	1.009	1.84
	0.06	0.16	0.11	0.08	0.82	1.03	0.103	13.13	1.043	0.32
	0.27	0.20	0.06	0.08		1.04	0.054	10.26	1.027	0.49
	2.79	1.28	0.12	0.08		1.30	0.882		191.320	1.94
	2.34	1.03	0.11	0.08	1.43	1.30	1.076	5.16	190.954	2.18
Anhedral hematite in SB (n = 2)	1.58	7.13	2.35	0.07	0.95	0.61	0.111	857.04	0.656	4.99
	2.38	3.49	1.46	0.09	0.53	0.93	0.135	780.80	0.740	4.36

n = number of iron oxide crystals analyzed.

QVQI = quartz-veined quartz itabirite; SB = sulfide breccia.

## Appendix B

---

**Table 1B:** Results of  $\delta^{33}\text{S}$ ,  $\delta^{34}\text{S}$  and  $\Delta^{33}\text{S}$ , with associated error, for the sixty-six pyrite grains in sulfide breccia analyzed by SIMS technique.

Frag.	Samples	$\delta^{33}\text{S}$ (‰)	$\sigma$	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	$\sigma$	$\Delta^{33}\text{S}$ (‰)	$\sigma$	Frag.	Samples	$\delta^{33}\text{S}$ (‰)	$\sigma$	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	$\sigma$	$\Delta^{33}\text{S}$ (‰)	$\sigma$
A*	FD052-005-Py1A	0.23	0.19	0.39	0.31	0.02	0.16	C	FD052-005-Py10C	0.78	0.06	1.36	0.07	0.08	0.05
	FD052-005-Py2A	0.35	0.20	0.54	0.31	0.07	0.16		FD052-005-Py11C	-0.21	0.07	-0.42	0.07	0.01	0.06
	FD052-005-Py3A	0.22	0.19	0.51	0.31	-0.04	0.16		FD052-005-Py12C	0.94	0.06	1.80	0.07	0.02	0.06
	FD052-005-Py4A	0.60	0.20	1.17	0.31	0.00	0.17		FD052-005-Py13C	-0.20	0.06	-0.57	0.07	0.09	0.05
	FD052-005-Py5A	-0.52	0.20	-0.99	0.31	-0.02	0.17		FD052-005-Py14C	-0.15	0.06	-0.35	0.07	0.03	0.05
	FD052-005-PyB1	1.76	0.06	3.37	0.07	0.03	0.05		FD052-005-Py15C	-0.25	0.06	-0.52	0.07	0.02	0.05
	FD052-005-PyB2	0.97	0.06	1.87	0.07	0.01	0.06		FD052-005-Py1D	-0.39	0.06	-0.84	0.07	0.05	0.05
	FD052-005-PyB3	0.29	0.06	0.45	0.07	0.06	0.05		FD052-005-Py2D	1.04	0.06	1.91	0.07	0.06	0.05
	FD052-005-PyB4	-0.11	0.07	-0.17	0.07	-0.02	0.06		FD052-005-Py3D	0.81	0.06	1.47	0.07	0.05	0.05
	FD052-005-PyB5	0.67	0.06	1.08	0.07	0.12	0.05		FD052-005-Py4D	-0.05	0.06	-0.10	0.07	0.00	0.05
B	FD052-005-PyB6	0.32	0.06	0.37	0.07	0.13	0.05	FD052-005-Py5D	0.42	0.06	0.68	0.07	0.07	0.06	
	FD052-005-PyB7	0.08	0.06	0.19	0.07	-0.02	0.05	FD052-005-Py6D	-0.35	0.06	-0.75	0.07	0.04	0.05	
	FD052-005-PyB8	0.00	0.06	-0.11	0.07	0.06	0.05	FD052-005-Py7D	-0.45	0.06	-0.95	0.07	0.04	0.05	
	FD052-005-PyB9	0.07	0.06	0.13	0.07	0.00	0.05	FD052-005-Py8D	-0.42	0.06	-0.80	0.07	-0.01	0.05	
	FD052-005-PyB10	0.32	0.06	0.34	0.07	0.14	0.05	FD052-005-Py9D	0.65	0.06	1.22	0.07	0.02	0.05	
	FD052-005-PyB11	1.39	0.06	2.50	0.07	0.10	0.05	FD052-005-Py10D	0.47	0.06	0.81	0.07	0.05	0.05	
	FD052-005-PyB12	0.10	0.06	0.05	0.07	0.08	0.05	FD052-005-Py11D	-0.32	0.06	-0.58	0.07	-0.02	0.05	
	FD052-005-PyB13	0.31	0.06	0.52	0.07	0.04	0.05	FD052-005-Py12D	-0.37	0.06	-0.78	0.07	0.03	0.05	
	FD052-005-PyB14	0.29	0.06	0.46	0.07	0.05	0.05	FD052-005-Py13D	0.91	0.06	1.66	0.07	0.06	0.05	
	FD052-005-PyB15	0.33	0.06	0.39	0.07	0.12	0.05	FD052-005-Py14D	0.51	0.06	0.95	0.07	0.02	0.06	
C	FD052-005-PyB16	0.13	0.06	0.14	0.07	0.06	0.05	FD052-005-Py15D	-0.68	0.06	-1.39	0.07	0.04	0.05	
	FD052-005-PyB17	0.14	0.06	0.17	0.07	0.05	0.05	FD052-005-Py1E	-1.22	0.06	-2.35	0.07	-0.01	0.05	
	FD052-005-PyB18	0.06	0.06	-0.09	0.07	0.10	0.05	FD052-005-Py2E	-0.72	0.06	-1.53	0.07	0.06	0.06	
	FD052-005-PyB19	0.06	0.06	0.03	0.07	0.04	0.05	FD052-005-Py3E	-1.03	0.06	-2.07	0.07	0.04	0.05	
	FD052-005-Py1C	-0.11	0.06	-0.35	0.07	0.07	0.05	FD052-005-Py4E	-0.89	0.06	-1.60	0.07	-0.07	0.05	
	FD052-005-Py2C	-0.04	0.06	-0.21	0.07	0.07	0.05	FD052-005-Py5E	-0.73	0.06	-1.53	0.07	0.06	0.06	
	FD052-005-Py3C	-0.13	0.06	-0.40	0.07	0.08	0.05	FD052-005-Py6E	0.61	0.06	1.02	0.07	0.08	0.05	
	FD052-005-Py4C	-0.06	0.06	0.01	0.07	-0.06	0.05	FD052-005-Py7E	0.85	0.06	1.51	0.07	0.07	0.06	
	FD052-005-Py5C	-0.13	0.06	-0.33	0.07	0.04	0.05	FD052-005-Py8E	-0.74	0.06	-1.59	0.07	0.08	0.05	
	FD052-005-Py6C	-0.58	0.06	-1.08	0.07	-0.03	0.05	FD052-005-Py9E	0.00	0.06	-0.05	0.07	0.02	0.05	
D	FD052-005-Py7C	-0.83	0.06	-1.68	0.07	0.03	0.06	FD052-005-Py10E	-0.94	0.06	-1.83	0.07	0.01	0.05	
	FD052-005-Py8C	-0.13	0.06	-0.34	0.07	0.05	0.06	FD052-005-Py11E	-1.20	0.06	-2.46	0.07	0.07	0.05	
	FD052-005-Py9C	-0.25	0.06	-0.62	0.07	0.07	0.05	FD052-005-Py12E	-1.46	0.06	-2.84	0.07	0.01	0.05	

Frag. = Fragments; SB = sulfide breccia;  $\sigma$  = standard deviation.\*associated error of  $2\sigma$ .