



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



TESE DE DOUTORADO

**MINERALIZAÇÕES FERRÍFERAS (ESPECULARÍTICAS) E DEPÓSITOS DO TIPO
JACUTINGA (Au-Pd-Pt), QUADRILÁTERO FERRÍFERO E SUL DA SERRA DO
ESPINHAÇO (MG)**

AUTORA: LUCILIA APARECIDA RAMOS DE OLIVEIRA

ORIENTAÇÃO: CARLOS ALBERTO ROSIÈRE (UFMG)

COORIENTAÇÃO: FRANCISCO JAVIER RIOS (CDTN)

Nº 30

BELO HORIZONTE
DATA (10/12/2015)



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



**MINERALIZAÇÕES FERRÍFERAS (ESPECULARÍTICAS) E DEPÓSITOS DO TIPO
JACUTINGA (Au-Pd-Pt), QUADRILÁTERO FERRÍFERO E SUL DA SERRA DO
ESPINHAÇO (MG)**

por

Lucilia Aparecida Ramos de Oliveira

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia Econômica e Aplicada.

Área de Concentração: Geologia Econômica e Aplicada

Orientação: Dr. Carlos Alberto Rosière

Coorientação: Dr. Francisco Javier Rios

BELO HORIZONTE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UFMG
2015

O48m
2015

Oliveira, Lucilia Aparecida Ramos de.

Mineralizações ferríferas (especularíticas) e depósitos do tipo Jacutinga (Au-Pd-Pt), Quadrilátero Ferrífero e sul da Serra do Espinhaço (MG) [manuscrito] / Lucilia Aparecida Ramos de Oliveira. – 2015.

xxxi, 234 f., enc. (principalmente color.)

Orientador: Carlos Alberto Rosière.

Coorientador: Francisco Javier Rios.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2015.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Bibliografia: f. 165-184.

Inclui anexos.

1. Minérios de ferro – Quadrilátero Ferrífero (MG) – Teses. 2. Geoquímica – Quadrilátero Ferrífero (MG) – Teses. 3. Metalogenia – Quadrilátero Ferrífero (MG) – Teses. I. Rosière, Carlos Alberto. II. Rios, Francisco Javier. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 55(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Mineralizações Ferríferas (especularíticas) e Depósitos do Tipo Jacutinga (Au-Pd-Pt), Quadrilátero Ferrífero e Sul da Serra do Espinhaço (MG)

LUCILIA APARECIDA RAMOS DE OLIVEIRA

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

Aprovada em 10 de dezembro de 2015, pela banca constituída pelos membros:

Prof(a). Carlos Alberto Rosiere - Orientador
UFMG

Prof(a). Lydia Maria Lobato
UFMG

Prof(a). Rosaline Cristina Figueiredo e Silva
UFMG

Prof(a). Hermínio Arias Nalini Júnior
UFOP

Prof(a). Regis Munhoz Kras Borges
UFPA

Belo Horizonte, 10 de dezembro de 2015.

*À minha família e amigos que me apoiaram
incondicionalmente em minhas escolhas...*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu Orientador Carlos Alberto Rosière e ao meu Coorientador Francisco Javier Rios pelo apoio, dedicação, incentivo e pelas longas discussões durante o todo o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

À pós-graduação em Geologia da UFMG pela oportunidade de desenvolvimento desta tese. Aos coordenadores do colegiado de pós-graduação, Mario Chaves e Lydia Lobato. A todos os alunos e professores da pós-graduação do IGC/UFMG, em especial ao grande amigo Vassily Rolim por sua extrema paciência. Aos professores Alexandre Chaves, Kazuo Fuzikawa e Rosaline Figueiredo e Silva por suas importantes contribuições durante a defesa da Qualificação de Doutorado. A todos os colegas da geologia, especialmente: Amanda, Mônica, Érika, Luciano, Diego, Renata, Vanessa, Barrote, Raiane, Rui, e Vitão.

À FAPEMIG pelo pagamento da bolsa de doutorado e a FCS pelo pagamento da bolsa no período de estadia na Suíça. Pelo auxílio financeiro agradeço também: à CNEN/CDTN, FAPEMIG (CRA PPM 0179/13); FINEP (REDETEC 2715/09); CNPq (CAG PPM00666-11, 307546/2011-0, 550348/2010-7, MCT/CT-Mineral/VALE/CNPq N° 12/2009). Às empresas Samarco, Ferrous Resources do Brasil S.A., Vallourec Mineração e Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) pela colaboração durante as etapas de trabalho de campo.

Ao CDTN, UFMG, USP, ETH-Zürich e Universidade de Genebra por toda a infraestrutura disponibilizada durante a realização dos procedimentos analíticos. À Sandra Andrade e Renato Moraes da USP pelo apoio na aquisição de dados de LA-ICP-MS e na elaboração do artigo publicado na RBG. Aos profissionais do grupo de Fluidos e Recursos Minerais (ETH-Zurich), especialmente: Markus Walle pelos ensinamentos sobre o LA-ICP-MS; Gabriel e Vivian por todo o suporte e receptividade brasileira; e aos grandes amigos pelos ótimos momentos de descontração (*Friday-Beer*): Szandra, Dan, Franzy, Krisztina, Katerina e Ying-Jui. Um muito obrigado carinhoso ao professor Christoph Heinrich por acreditar em mim e me abrir as portas do ETH-Zürich e de seu grupo de pesquisa. Ao professor Kalin Kouzmanov e sua aluna Melissa Orтели pelo apoio durante os trabalhos na Universidade de Genebra. À minha querida família do LIFM/CDTN: Soninha, Tati, Lucas, Beth e Mônica obrigada por todo o apoio e amizade, esse trabalho tem um pouco de cada um de vocês. Aos novos bolsistas do LIFM: Camila, Fred e Nilo. Aos geólogos Alexandre R. Cabral, Volker Lüders e Henrile Meireles pelas amostras fornecidas e conhecimentos compartilhados. À Sylvia Dantas (Sica) pelas análises com o Raman, aos amigos Marcio e Garcia pelas análises de

Microsonda Eletrônica e ao Roberto pelas imagens de MEV. À professora Karla Balzuweit pelos ensinamentos sobre microscopia eletrônica. Ao geólogo Paulo C. Rodrigues do CDTN pelos ensinamentos sobre Georeferenciamento e Arcgis. Aos geólogos Francisco R. de Abreu (Bem-te-vi), Felipe e Gerson pelo apoio durante os trabalhos de campo.

Aos amigos do CDTN: Nelson, Camila, Paulo Fernando, Fábio, Tiago, Marina e Carol, sem vocês teria sido impossível. As amigas que não estão mais no CDTN, mas sempre fizeram parte desta longa caminhada: Ana-Sophie, Nadja, Jack, Priscila e Ellen, amo vocês. E aos meus amigos que, mesmo não entendendo muita coisa sobre geologia e química, sempre estiveram ao meu lado: Aleixo (Tody), Alexandre (Xande), Wagner (Teco), Natália Camila e Ricardo. A todos os amigos que compreenderam a minha ausência e sempre acreditaram que eu chegaria lá: Fernandinha, Bruno, Ricardo (Tião), Francismar, Rodrigo (Paregontas), Tina, Letícia, Dona Fia, Aleixo (Pai), Cristiano (Chera), Nick, Vanessa, Andréia, Marys, Daniel (Cabrito), Angélica (Angel), Michel e muitos outros.

Aos grandes amigos da Suíça: Abhishek, Nastya, Tom, Leo, Markus, Francisca, Adrian e Alberto, vocês definitivamente tornaram esse ano muito mais suave e foram como uma família.

À minha amada mãe Dayse, que sofreu às vezes até mais que eu, mas nunca perdeu sua fé, esta tese também é sua, afinal sem você eu não seria ninguém. Ao meu irmão Daniel que sempre acreditou no meu potencial e aos meus queridos sobrinhos, Jéssica, Carol e Daniel Vitor, que alegraram até mesmo meus dias mais estressantes. Ao meu querido pai Edson por confiar em mim e compreender os momentos de ausência. À minha linda avó, Dona Neuza, pelo carinho e incentivo. Aos meus tios, tias, primos e primas que estiveram sempre torcendo por mim. E minhas cachorrinhas, Química e Marie Curie, que foram minha companhia durante as longas noites de escrita.

Enfim, a todos que de alguma maneira participaram do meu trabalho e/ou da minha vida durante essa inesquecível jornada, o meu mais sincero: **MUITO OBRIGADA!!!**

E o meu maior agradecimento: a **DEUS!!!**

Vencerás

Não desanimes. Persiste mais um tanto.

Não cultives pessimismo. Centraliza-te no bem a fazer.

Esquece as sugestões do medo destrutivo.

Segue adiante, mesmo varando a sombra dos próprios erros.

Avança ainda que seja por entre lágrimas.

Trabalha constantemente. Edifica sempre.

Não consintas que o gelo do desencanto te entorpeça o coração.

Não te impressiones a dificuldade.

Convence-te de que a vitória espiritual é construção para o dia a dia.

Não desistas da paciência.

Não creias em realização sem esforço.

Silêncio para a injúria.

Olvido para o mal.

Perdão às ofensas.

Recorda que os agressores são doentes.

Não permitas que os irmãos desequilibrados te destruam o trabalho ou te apaguem a esperança.

Não menosprezes o dever que a consciência te impõe.

Se te enganaste em algum trecho do caminho, reajusta a própria visão e procura o rumo certo.

Não contes vantagens nem fracassos.

Estuda buscando aprender.

Não te voltes contra ninguém.

Não dramatizes provações ou problemas.

Conserva o hábito da oração para que se te faça luz na vida íntima.

Resguarda-te em Deus e persevera no trabalho que Deus te confiou.

Ama sempre, fazendo pelos outros o melhor que possas realizar.

Age auxiliando. Serve sem apego.

E assim vencerás.

Emmanuel

(Francisco Cândido Xavier)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Mapa Geológico mostrando a localização da SEM e do QF e suas principais litologias (Knauer & Grossi-Sad 1997, CPRM 2004, Lobato <i>et al.</i> 2005).	3
Figura 2.1.	Coluna estratigráfica do QF (modificado de Rosière <i>et al.</i> 2008).....	9
Figura 2.2.	Resumo da estratigrafia da Serra do Espinhaço Meridional baseado em Almeida-Abreu (1995) e Rolim <i>et al.</i> (2016).	10
Figura 2.3.	(a) Mapa ilustrando a ocorrência geral de formações ferríferas no mundo (modificado de Bekker <i>et al.</i> 2010). (b) Diagrama esquemático mostrando a abundância das FFB em função do tempo geológico e os principais depósitos no mundo (modificado de James 1954). O Grupo Hamersley é considerado como o ponto máximo.	12
Figura 2.4.	Esquema mostrando os ambientes tectônicos associados aos três diferentes tipos de FFB (modificado de Gross 1980 e Silveira Braga 2012).	14
Figura 2.5.	Espectros multielementares de elementos terras raras (ETR), normalizado com NASC, para FFB Precambrianas de várias idades (modificado de Klein 2005).....	16
Figura 2.6.	Aspecto textural dos diferentes tipos de minério de ferro de alto teor classificados de acordo com Rosière <i>et al.</i> (2008). (a) Minério compacto, Mina Casa de Pedra (QF); (b) Lente de minério compacto dentro do minério friável, Mina de Pau Branco (QF); (c) Minério xistoso, Mina de Conceição, QF (Rosière <i>et al.</i> 2008); (d) Minério friável a compacto cimentado por goethita (supergênico), Depósito de Catas Altas, (QF)...	22
Figura 2.7.	Veio de Jacutinga cortando o Itabirito dobrado na Mina de Gongo Soco (Cabral 2006).....	24
Figura 2.8.	Mapa geológico simplificado do QF mostrando as principais ocorrências de Jacutinga (Cabral 1996, CPRM 2004, Lobato <i>et al.</i> 2005, Galbiatti <i>et al.</i> 2007).	25
Figura 3.1.	Mapa geológico simplificado da área de estudo, destacando as áreas de amostragem.	30
Figura 4.1.	Sequência genética de formação dos diferentes tipos de óxidos de ferro encontrados nas amostras estudadas.	35
Figura 4.2.	(a) e (b) Fotografia do itabirito dolomítico cortado por veio fibroso, depósito de Esperança, furo de sondagem F24, profundidade 249m. (a) Amostra ES02. (b) Amostra ES08. (c e d) Fotomicrografias ilustrando o aspecto textural das amostras em lâmina petrográfica. (c) Detalhe dentro do bandamento do ID mostrando grãos de hematita/martita, dolomita e quartzo. Luz transmitida e nicóis paralelos, amostra	

	ES02. (d) Detalhe do bandamento do ID ressaltando a presença de relictos de kenomagnetita nos cristais de hematita/martita, luz refletida e nicóis cruzados, amostra ES02.....	36
Figura 4.3.	(a) Itabirito quartzoso dobrado e cortado por veios de talco e quartzo, mina de Esperança, amostra ES07. (b, c e d) Fotomicrografias da mesma amostra mostrando a hematita com relictos de kenomagnetita, quartzo e anfibólio. (b) Luz refletida e nicóis cruzados, (c) Luz transmitida e nicóis paralelos e (d) Luz transmitida e nicóis cruzados.....	37
Figura 4.4.	(a e b) Fotomicrografias do minério friável e brechado da mina de Esperança ressaltando suas diferentes texturas, ambas sob luz refletida e nicóis paralelos. (a) Clasto de especularita em contato com matriz fina de hematita microlamelar, ES03. (b) Cristais granoblásticos subédricos de martita, ES03.	37
Figura 4.5.	(a e c) Imagens das amostras dos minérios compactos de Esperança. (a) Amostra ES06, minério compacto com especularita preenchendo <i>vugs</i> , furo de sondagem F24, Profundidade 70 m. (c) Amostra ES09, minério compacto cortado por veio de quartzo com especularita. (b e d) Fotomicrografias mostrando as principais texturas das amostras de minério compacto de Esperança. Ambas as imagens com luz refletida e nicóis paralelos. (b) Amostra ES06 da mina de Esperança mostrando com detalhe os agregados de hematita microlamelar e especularita. (d) Amostra ES09 mostrando a textura dos cristais de martita-kenomagnetita..	39
Figura 4.6.	(a) Afloramento na mina de Pau Branco mostrando corpo de minério compacto dentro do minério friável. (b) Detalhe mostrando lente de especularita dentro do corpo de minério de Pau Branco.	40
Figura 4.7.	(a) Itabirito quartzoso dobrado AL01 da mina de Alegria (b) Minério de ferro xistoso, especularítico, amostra AL03, mina de Alegria.	40
Figura 4.8.	(a) Amostra CA02, minério compacto que apresenta bandamento incipiente com relictos de quartzo, cortada por veio de quartzo com especularita. (b) Amostra CA06, minério compacto de granulação fina com especularita em plano de fratura. (c) Detalhe em afloramento de veio de quartzo-especularita cortando o minério compacto de (a). (d) Detalhe em afloramento de cristais de especularita preenchendo plano de fratura no minério compacto (b). Todas as amostras de Catas Altas.....	42
Figura 4.9.	(a) Fotomicrografia panorâmica da amostra ES02 onde pode ser observado o contato do veio de quartzo-especularita-carbonatos com a rocha (ID). (b e c) Detalhe do veio da amostra ES08 mostrando a continuidade dos cristais sintaxiais de especularita para dentro do veio, (b) luz transmitida e nicóis paralelos. (c) luz transmitida e nicóis cruzados.....	43

- Figura 4.10. Fotomicrografias mostrando a relação de contato entre o minério compacto ES09 com o veio de especularita-quartzo. (a) Luz transmitida e nicóis cruzados. (b) Luz refletida e nicóis paralelos.....44
- Figura 4.11. Imagem da amostra de itabirito quartzoso de Serro, SR01. (a) Observam-se as bandas da rocha truncadas por faixas de especularita. (b) Observação da superfície da amostra com destaque para os cristais de especularita de granulação grossa.44
- Figura 4.12. (a) Minério de ferro xistoso de Morro do Pilar, MP06. (b) Fotomicrografia mostrando a textura granoblástica e lepidoblástica do minério xistoso, amostra FE01 do Morro da Ferrugem. (c) Afloramento de minério xistoso cortado por veios boudinados de quartzo com especularita concordante com a foliação, corte de estrada Conceição do Mato Dentro.....45
- Figura 4.13. (a) Minério compacto de Morro do Pilar apresentando relictos de quartzo e bandamento, amostra MP07. (b) Detalhe dos cristais de especularita em plano de fratura no minério compacto da amostra MP09 de Morro do Pilar.....46
- Figura 4.14. (a) Afloramento de itabirito quartzoso cortado por veio de quartzo, Morro do Pilar. (b) Afloramento de minério de ferro de alto teor compacto cortado por veio de quartzo leitoso com especularita, Morro do Pilar. (c) Amostra do veio de quartzo-especularita mostrado em (b).....46
- Figura 4.15. Imagem da zona de cisalhamento de Barão de Cocais mostrando o contato com o minério compacto e detalhes dos veios de quartzo e especularita que a cortam.47
- Figura 4.16. (a) Detalhe do contato entre o hematita-magnetitito e a zona de cisalhamento. (b) Aspecto macroscópico do hematita-magnetitito de Barão de Cocais, amostra BC06. (c e d) Fotomicrografias mostrando a principal textura do hematita-magnetitito. (c) Mostra que a rocha é principalmente composta por magnetita/kenomagnetita com cristais de hematita e de hidróxido nos interstícios. (d) Detalhe mostrando os sinais de martitização da magnetita para formar hematita.49
- Figura 4.17. (a) Aspecto macroscópico da rocha ferrífera da zona de cisalhamento de Barão de Cocais onde o Au-PGE foi extraído. (b) Amostra de mão da rocha. (c e d) Fotomicrografias da rocha ferrífera encontrada na zona de cisalhamento em Cocais, ambas com luz refletida e nicóis paralelos..50
- Figura 4.18. (a) Aspecto macroscópico da amostra de Jacutinga da mina de Conceição (Itabira). (b a d) Fotomicrografias da mesma amostra mostrando seus principais aspectos texturais. (b, d) Luz refletida e nicóis paralelos. (c) Luz transmitida e nicóis paralelos.....51
- Figura 4.19. (a) Fragmento de quartzo de veio com Au visível extraído da mina de Gongo Soco (QF). (b-d) Imagens de elétrons retroespalhados mostrando com detalhe a associação mineral encontrada no veio.52

Figura 4.20.	Diagramas <i>spider</i> mostrando a composição determinada por análise de rocha total em termos de elementos maiores para as rochas estudadas.	55
Figura 4.21.	<i>Spidergram</i> com os conteúdos em ppm de alguns elementos traço das amostras estudadas. *Au em partes por bilhão (ppb). (a) Itabiritos. (b) Rochas associadas à mineralização do tipo Jacutinga. (c) Minérios compactos. (d) Minérios xistosos. (e) Minérios Friáveis.....	59
Figura 4.22.	(a-e) Diagramas elementos ETR-Y baseados nos dados de rocha total das amostras comparados com a média de Spier <i>et al.</i> (2007) para os itabiritos quartzoso e dolomítico e de Spier <i>et al.</i> (2008) para o minérios compacto e friável, linhas pretas tracejadas. PAAS Normalizado (McLennan 1989). (a) Itabiritos quartzosos e dolomítico; (b) Rochas associadas ao Au-PGE; (c) Minérios compactos; (d) Minérios xistosos; (e) Minérios friáveis.	67
Figura 4.23.	Diagrama para a identificação de anomalias de Ce e/ou de La (Bau & Dulsky 1996).	69
Figure 5.1.	Simplified geological map of the northwestern area of the Quadrilátero Ferrífero highlighting the location of the Esperança deposit.....	74
Figure 5.2.	Dolomitic itabirite (DI) from the Esperança Deposit cross-cut by carbonate-quartz-specularite veins. (a) Hand specimen. (b) Thin section. (c) Transmitted light photomicrograph depicting iron oxide and dolomite layers and a crosscutting vein. (d) Reflected light photomicrograph from the iron oxide band exhibiting the complex intergrowth of granular hematite/martite (gHmA) crystals with kenomagnetite (kmg) relicts (dark gray portions indicated by the arrow).	79
Figure 5.3.	Textural features of high-grade iron ore 1 (HIO1) sample. (a) Hand specimen. (b) Fine grained granular hematite/martite (gHmB) crystals with kenomagnetite (kmg) relicts comprising a massive texture with pores and microfractures. Plane polarized reflected light. (c) Platy hematite (spH1A) filling vugs in massive ore. Partially polarized reflected light. (d) Large specularite (spH1B) sheaves grown in irregular-shaped cavity of massive ore. Partially polarized reflected light.	80
Figure 5.4.	Textural features of high-grade iron ore 2 (HIO2) sample. (a) Hand specimen of massive ore cross-cut by a quartz-specularite vein. (b) Granular hematite/martite (gHmB) aggregates with kenomagnetite (kmg) relicts. Plane polarized reflected light.	81
Figure 5.5.	(a to c) Asymmetric carbonate (dolomite/calcite), quartz and specularite fibrous composite vein, crosscutting dolomitic itabirite (DI). (a). Fibrous syntaxial carbonate (Cb) and specularite crystals (spH2A) grow from the left wall. Carbonate crystals on the right wall are shorter and less elongated oblique to the wall. Antitaxial quartz crystals (Qtz) and specularite concentrate in the internal sector of the vein as long and wide crystals. Lines highlight the sharp contact between the rock and the vein.	

(b) Reflected light. (c) Transmitted light. (d) Quartz-specularite asymmetric vein from high-grade iron ore 2 (HIO2) sample. Specularite fibers (spH2B) grow from one wall to the center of the vein. Quartz concentrates as sacaroidal crystals on the opposite wall..... 82

- Figure 5.6. Spider diagrams with the results of trace elements for different iron oxides. Trace elements ordered according to their affinity due the charge density (Z/r). (a) Sample dolomitic itabirite (DI): absolute values for granular hematite (gHmA) grains and vein hosted specular hematite (spH2A). (b) Sample DI: spH2A contents normalized to the average values of gHmA. (c) Sample high-grade iron ore 1 (HIO1): absolute values for granular hematite (gHmB) grains; granular hematite (gHmB) and specular hematite (spH1A and spH1B) grains. Specular hematite (spH1A and spH1B). (d) Sample HIO1: spH1A and spH1B contents normalized to the average values of gHmB. (e) Sample high-grade iron ore 2 (HIO2): absolute values for granular hematite (gHmB) and vein hosted specularite (spH2B). (f) Sample HIO2: spH2B contents normalized to the average values of gHmB. 84
- Figure 5.7. Spider diagrams of the analyzed contents normalized to the average values of gHmA. (a) Granular hematite from high-grade iron ore (gHmB). (b) Specularite (spH1A, 1B, 2A and 2B). 86
- Figure 5.8. Box diagram showing the small variations of Cr, V, and Ga contents in all iron oxides..... 87
- Figure 5.9. Binary logarithmic plots correlating Mg, Mn, and Sr for iron oxides. (A) Mn *versus* Mg (0.99). (B) Sr *versus* Mg (0.98). (C) Sr *versus* Mn (0.96). 88
- Figure 5.10. Ternary diagram of the relative concentration (ppm) of Sr*100, Mg, and Mn from the 89
- Figure 5.11. Vanadium, Chromium and Titanium relative concentration (ppm) ternary diagram presenting trends of mobility of Ti in all different iron oxide generations. 90
- Figure 5.12. The rare earth elements and yttrium spider diagram PAAS normalized (McLennan 1989) for the different generations of iron oxide: (a) Dolomitic itabirite. (b) High-grade iron ore 1 (HIO1). (c) High-grade iron ore 2 (HIO2). Shaded light blue are the whole rock geochemical data from Spier *et al.* (2007) for dolomitic itabirite from the Águas Claras deposit. 91
- Figure 5.13. Discriminative plot of $(Ce/Ce^*)_{SN}$ *versus* $(Pr/Pr^*)_{SN}$. Negative Ce anomaly is defined by Bau & Dulski 1996 as $(Ce/Ce^*)_{SN} = Ce_{SN}/[0.5(Pr_{SN}+La_{SN})] < 1$ and $(Pr/Pr^*)_{SN} = Pr_{SN}/[0.5(Ce_{SN}+0.5Nd_{SN})] > 1$ 94
- Figure 5.14. Yttrium *versus* Y/Ho diagram (Bau 1996) with data from all iron oxide generations from the three studied samples (DI, HIO1, and HIO2) from the Esperança Deposit. The results are compared with CHARAC and seawater field. 94

Figure 5.15.	Schematic illustration of all iron oxide generations studied by LA-ICP-MS and its proposed sequence of formation.....	101
Figura 5.16.	Agrupamentos de inclusões fluidas encontradas em quartzo e especlarita do depósito de Esperança. (a) Inclusões fluidas bifásicas em quartzo do veio hospedado no itabirito dolomítico. (b) Trilha de inclusões fluidas bifásicas em quartzo do veio que corta o minério de alto teor. (c) Inclusões fluidas trifásicas encontradas em cristais de especlarita em <i>vugs</i> no minério de alto teor (luz infravermelha). (d) Inclusões fluidas trifásicas em especlarita do veio que corta o minério de alto teor (luz infravermelha).	105
Figura 5.17.	Parâmetros de temperatura obtidos para inclusões fluidas do depósito de Esperança. (a) Diagrama de T_H versus salinidade; (b) histograma com os valores de temperatura eutética e (c) histograma com as temperaturas finais de fusão da hidro-halita.	107
Figura 5.18.	Diagrama <i>Box</i> mostrando as concentrações dos elementos Na, K, As, Li, B, Sr, Cs, Mg, S, Cl e Br determinadas por LA-ICP-MS nas inclusões fluidas encontradas em quartzo e especlarita do depósito de Esperança.	109
Figura 5.19.	Razão molar Cl/Br versus (a) Na/Br _(molar) , (b) log Na/K _(molar) e (c) Na _(mol/Kg) . Estes diagramas ilustram o comportamento dos halogênios (Cl e Br) nos fluidos aprisionados em quartzo de veios associados à mineralização em Fe do depósito de Esperança em comparação com a composição da água do mar e sua trajetória de evaporação (McCaffrey <i>et al.</i> 1987).....	110
Figura 5.20.	Diagrama ternário do sistema CaCl ₂ -NaCl-H ₂ O (Steele-MacInnis <i>et al.</i> 2011) mostrando a composição das inclusões fluidas encontradas em quartzo de veios que cortam o itabirito dolomítico e o minério de alto teor do depósito de Esperança, QF.	112
Figura 5.21.	Modelo esquemático para a evolução dos fluidos hidrotermais associados com a mineralização de Fe no depósito de Esperança, domínio de baixa deformação, leste do QF.	114
Figure 6.1.	Simplified geological map of the Quadrilátero Ferrífero and the Southern Espinhaço Range (modified after Knauer & Grossi-Sad 1997, CPRM 2004, Lobato <i>et al.</i> 2005). The map presents the main lithologies, the location of the studied areas and the main Jacutinga-type deposits along the eastern border of Quadrilátero Ferrífero (Galbiatti <i>et al.</i> 2007).....	118
Figure 6.2.	Simplified stratigraphic column of Minas and Espinhaço Basins highlighting the ages and occurrence of the veining, hydrothermal and tectonic events in the studied area. Adapted from Rosière <i>et al.</i> (2008) according to Chemale Jr. <i>et al.</i> (2012).	120

Figure 6.3.	(a) Specularitic high-grade Serpentina-type schistose iron ore body hosted by itabirite from the Serra da Serpentina Group. (b) Outcrop of a Jacutinga-type Au-PGE vein.....	122
Figure 6.4.	Outcrop of the two main types of veins associated with the Brasiliano-aged thrusts and shear zones. (a) Stretched veins and <i>boudins</i> are conformable with schistosity planes within the Serra do Sapo high-grade iron orebody (Conceição do Mato Dentro). b) Thrust-related gash veins or extension fractures cutting the massive high-grade iron ore from the Minas Supergroup (Catas Altas).	123
Figure 6.5.	Simplified geological map of the Quadrilátero Ferrífero and the Southern Espinhaço Range, with location of vein samples from iron deposits: CA = Catas Altas, BC = Barão de Cocais, GS = Gongo Soco, IT = Itabira, MP = Morro do Pilar, CM = Conceição do Mato Dentro (modified after CPRM 2004, Lobato <i>et al.</i> 2005).....	126
Figure 6.6.	Jacutinga-type veins (a) Gongo Soco: Quartz vein with visible gold. (b) Barão de Cocais: Quartz-specularite vein hosted by a schistose, specularite-rich iron ore hosted by a shear zone.	127
Figure 6.7.	Samples from the Morro do Pilar deposit, Serra da Serpentina Group. (a) Outcrop of massive milky quartz vein in quartz itabirite. The itabirite is enriched in Fe along the contact with the vein. (b) Close up view of the massive quartz sample. (c) Quartz-specularite vein hosted by massive high-grade iron ore.....	127
Figure 6.8.	Quartz-specularite veins hosted by high-grade iron ore bodies from Catas Altas (a) Quartz-specularite vein in high-grade iron ore, and (b) Lepidoblastic specularite in high-grade iron ore	128
Figure 6.9.	Isochors for the studied fluid inclusions showing the pressure (P) and temperature (T) constraints for entrapment conditions. (a) Fluids from Itabira, Barão de Cocais, Gongo Soco and Catas Altas deposits. The pressure was estimated using the maximum homogenization temperatures obtained by fluid inclusion microthermometry from Gongo Soco and Barão de Cocais (140° to 200°C) in combination with the chlorite geothermometer of Cabral <i>et al.</i> (2012b) for the Gongo Soco deposit. (b) Fluids from Serra da Serpentina Group, Morro do Pilar and Barão de Cocais deposits. The pressure was estimated using the maximum homogenization temperatures by fluid inclusion microthermometry from quartz-specularite from Morro do Pilar and Serra do Sapo in combination with the chlorite geothermometer of Lima (2009).....	131
Figure 6.10.	Box plots showing Na, K, As, Li, B, Sr, Cs, Mg, S, Cl and Br concentrations (ppm) determined by LA-ICP-MS analysis of quartz- and specularite-hosted fluid inclusions from Jacutinga-type veins.	135

- Figure 6.11. Box plots showing Na, K, As, Li, B, Sr, Cs, Mg, S, Cl and Br concentrations (ppm) in quartz- and specularite-hosted fluid inclusions in thrust related veins from Southern Espinhaço Range, determined by LA-ICP-MS..... 137
- Figure 6.12. Box plots showing Na, K, As, Li, B, Sr, Cs, Mg, S, Cl and Br concentrations (ppm) in quartz- and specularite-hosted fluid inclusions in thrust vein from the Catas Altas deposit, determined by LA-ICP-MS..... 138
- Figure 6.13. Cl/Br molar ratio versus Na/Br (molar) (a), log Na/K (molar) (b) and Na (mol/kg) (c). These diagrams illustrate the behavior of Cl and Br in quartz-hosted fluid inclusions from Jacutinga and thrust-type veins compared with seawater and seawater evaporation path (McCaffrey *et al.* 1987). For comparison data from Lüders *et al.* (2005), Yardley (2013) and Thorne *et al.* (2014) are also plotted. 139
- Figure 6.14. Fluid inclusion assemblages in quartz and specularite from Jacutinga-type veins. (a) Type 1, two-phase, aqueous-saline fluid inclusions in quartz from the Barão de Cocais deposit. (b) Type 2, two-phase, aqueous-saline fluid inclusions in quartz from the Barão de Cocais deposit. (c) Two-phase aqueous-saline fluid inclusions hosted in quartz from Gongo Soco deposit. (d) Coexistence of three-phase, aqueous-carbonic fluid inclusion (type 1) with three-phase, aqueous-saline fluid inclusions (type 2) in specularite crystal from Itabira (NIR transmitted-light microphotograph). 140
- Figure 6.15. Diagram of homogenization temperature (TH) versus salinity (wt% NaCl_{eqv}) summarizing the microthermometry results and the proposed model for hydrothermal (Brasiliano) fluid evolution Jacutinga-type Au-PGE veins, eastern of Quadrilátero Ferrífero. (I) low- to moderate-temperature and salinity fluid from Gongo Soco and Barão de Cocais. This fluid is similar to Jacutinga- type fluids studied by Lüders *et al.* (2005) hosted by quartz from Itabira and specularite from Gongo Soco. The Au-PGE transport may have occurred by Cl-complexes (AuCl₄⁻) under oxidizing and acidic conditions, in the presence of a strong oxidizing agent. (II) The coexistence of a CO₂-rich fluid and an aqueous saline brine indicates that mixtures of fluids have happened in the region, resulting in Au-PGE transport and precipitation. The aqueous-carbonic fluid may be a variation of the fluids from the anatectic pegmatites from Santa Maria de Itabira (Rios *et al.* 2003, Newman 2009) which are similar to the fluids present in Catas Altas (this work) and Itabira (Lüders *et al.* 2005, Rosière & Rios 2004). 142
- Figure 6.16. Microthermometry results for the studied fluid inclusions. (a) Histogram of eutectic temperatures in fluid inclusions from Jacutinga-type deposits. (b) CO₂ melting and (c) CO₂ homogenization temperatures for quartz-hosted aqueous-carbonic fluid inclusions from Catas Altas (qtz-HIO-CA) and specularite-hosted inclusions from Itabira (spH-IT-1). (d) Eutectic temperatures for fluid inclusions in quartz and specularite from Serpentina-type deposits. (e) Eutectic temperatures and (f) hydrohalite melting temperatures for fluid inclusions from Catas Altas deposit..... 143

- Figure 6.17. Fluid inclusion assemblages in quartz and specularite from veins of the Serra da Serpentina Group. (a) Two-phase, aqueous-saline fluid inclusions in quartz from the quartz itabirite hosted vein from Morro do Pilar. (b) aqueous-saline fluid inclusions in quartz from the hard high-grade iron ore vein, Morro do Pilar. (c) Three-phase fluid inclusion in specularite from hard high-grade iron ore hosted vein from Morro do Pilar (NIR transmitted light). (d) two-phase fluid inclusions in quartz from the schistose high-grade iron ore vein from Conceição do Mato Dentro..... 144
- Figure 6.18. Diagram of homogenization temperature (T_H) *versus* salinity (wt% NaCl_{eqv}) illustrating the model for hydrothermal fluids associated with the Serra da Serpentina iron mineralization, Southern Espinhaço Range compared with fluid inclusion data obtained by Lima (2009) and Cabral *et al.* (2015b). (I) Silica-rich fluids represent the stages of silica leaching responsible for the concentration of the Fe-rich bands and formation of the ore bodies. These fluids have similar temperatures and salinity to the fluids studied by Cabral *et al.* (2015b) in secondary fluid inclusions trapped in rutile from Mil Oitavas Au deposit that have Brasiliano age. (II) Granular hematite from iron ore in Serra da Serpentina Group (Lima 2009) represents the first stage of Fe enrichment. (III) Specularite trapped fluids were responsible for the last stage of Fe enrichment with a significant increase of fluid salinity caused by loss of elements like Ca, Mg and Pb. 146
- Figure 6.19. Fluid inclusion assemblages in quartz and specularite from the Catas Altas deposit, Quadrilátero Ferrífero. (a) Three-phase aqueous-carbonic fluid inclusions in quartz from a quartz vein in high-grade iron ore. (b) Secondary trails of two-phase, aqueous-saline fluid inclusions in quartz from a quartz vein in high-grade iron ore. (c) Three-phase aqueous-saline fluid inclusions in vugs-filling specularite crystal in the high-grade iron ore. (d) Three-phase aqueous-saline fluid inclusions in vein specularite high-grade iron ore hosted; (c) and (d) are NIR transmitted light microphotographs..... 147
- Figure 6.20. Diagram of homogenization temperature (T_H) *versus* salinity (wt% NaCl_{eqv}) showing a simplified model for hydrothermal fluids, that evolved to the fluids pathway at Catas Altas deposit, eastern high strain domain, Quadrilátero Ferrífero. (I) Fluid trapped in specularite crystals that represent a stage of Fe remobilization after the fluid percolates within the iron ore bodies from Quadrilátero Ferrífero. (II) Aqueous carbonic fluid trapped in quartz crystals in extensional veins that cut the high-grade iron ore discordant to the foliation. The results of aqueous carbonic fluids studied by Rosière & Rios (2004) in quartz veins from Itabira and by Rios *et al.* (2003) and Newman (2009) in the anatectic pegmatite bodies from Santa Maria de Itabira are used for comparison. 148
- Figure 6.21. Raman spectra of (a) host quartz, (b) aqueous-saline, (c) liquid carbonic and (d) vapor carbonic phases of primary fluid inclusions in quartz crystals from a vein that cuts the hard high-grade iron ore from the Catas Altas deposit, eastern Quadrilátero Ferrífero..... 149

Figure 6.22.	Ternary diagram showing the characteristic trends of K/Sr/Ba for the studied fluids	157
Figure 6.23.	The proposed fluid model related to Fe enrichment of itabirites from Serra da Serpentina Group and Au-PGE deposition in the Jacutinga-type deposits from the Minas Supergroup during the Brasiliano orogeny. The diagram illustrates that several inputs of three distinct fluids (aqueous-carbonic and aqueous-saline) responsible for the mineralization processes along the eastern border of São Francisco Craton. The anatectic pegmatite bodies from Santa Maria de Itabira (Bilal <i>et al.</i> 1998, Rios <i>et al.</i> 2003, Newman 2009) are the source of the high-temperature aqueous carbonic fluids found at Catas Altas (this work), Itabira (Rosière & Rios 2004, Lüders <i>et al.</i> 2005 and this work) and Mil Oitavas (Cabral <i>et al.</i> 2015b) deposits. Different inputs of a metamorphic, low- to moderate-temperature fluids caused silica leaching and iron concentration at the deposits from Serra da Serpentina Group and Au-PGE mobilization and transport in the Jacutinga-type deposits from central Quadrilátero Ferrífero (Gongo Soco and Barão de Cocais). A mixing of fluids resulted in Au-PGE precipitation in the Itabira deposit	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.	Resumo dos dados existentes na literatura relacionados com a gênese das mineralizações de ferro e Au-PGE no QF e SEM.	26
Tabela 3.1.	Relação da quantidade e origem das amostras coletadas.	28
Tabela 3.2.	Relação das amostras cedidas para a realização deste trabalho.	29
Tabela 4.1.	Geoquímica dos elementos maiores para amostras selecionadas de quartzo itabirito e itabirito dolomítico do QF.	53
Tabela 4.2.	Geoquímica dos elementos maiores para amostras selecionadas de minério de ferro de alto teor compacto, xistoso e friável do QF e da SEM.	56
Tabela 4.3.	Geoquímica dos elementos maiores para amostras associadas à mineralização de Au-PGE do QF.	58
Tabela 4.4.	Resultados geoquímicos de elementos traço analisados para as amostras de itabirito quartzoso e itabirito dolomítico do QF.	60
Tabela 4.5.	Resultados geoquímicos de elementos traço analisados para as amostras de minério de ferro de alto teor do QF e SEM.	61
Tabela 4.6.	Resultados das análises de geoquímica de rocha total em termo dos elementos traço para amostras associadas à mineralização de Au-PGE do QF.	62
Tabela 4.7.	Resultado das análises de rocha total de ETR-Y para as amostras de itabirito quartzoso e itabirito dolomítico do QF.	64
Tabela 4.8.	Resultado das análises de rocha total de ETR-Y para as amostras dos diferentes tipos de minério de ferro de alto teor do QF e da SEM.	66
Tabela 4.9.	Resultado das análises de rocha total de ETR-Y para as amostras associadas à mineralização de Au-PGE do QF.	68
Table 5.1.	Rare earth elements and yttrium data obtained by LA-ICP-MS for granular hematite from samples dolomitic itabirite, high-grade iron ore 1 and high-grade iron ore 2. ..	92
Table 5.2.	Rare earth elements and yttrium data obtained by LA-ICP-MS for specularite from sample high-grade iron ore 1.	95
Tabela 5.3.	Rare earth elements and yttrium data obtained by LA-ICP-MS for specularite crystals from the vein that cross-cut sample dolomitic itabirite.	96

Table 5.4.	Rare earth elements and yttrium data obtained by LA-ICP-MS for specularite crystals from the vein that cross-cut sample high-grade iron ore 2.....	97
Tabela 5.5.	Resumo dos resultados obtidos por microtermometria para inclusões fluidas encontradas em cristais de quartzo e especularita do depósito de Esperança, QF. ..	104
Tabela 5.6.	Varição da composição microquímica e razão molar Cl/Br de inclusões fluidas em quartzo e especularita do depósito de Esperança, QF.	108
Tabela 5.7.	Resultados microtermométricos das temperaturas finais de fusão do gelo e da hidrohalição e a comparação dos valores obtidos para a salinidade utilizando os modelos propostos por Bodnar & Vityk (1994) e Steele-MacInnis <i>et al.</i> (2011).....	111
Table 6.1.	Summary of the elemental composition, detection limit and sigma error in fluid inclusions found in quartz and specularite crystals in studied deposits from Minas Supergroup (Quadrilátero Ferrífero) and Serra da Serpentina Group (Southern Espinhaço Range).....	133
Table 6.2.	Summary of microthermometry data obtained for fluid inclusions in quartz and specularite from veins associated with the Au-PGE mineralization in the Jacutinga-type deposits (Quadrilátero Ferrífero).....	136
Table 6.3.	Summary of microthermometry data obtained for fluid inclusions from veins from Serra da Serpentina Group.....	137
Table 6.4.	Summary of microthermometry data obtained for fluid inclusions in quartz and specularite crystals from the Catas Altas deposit, Quadrilátero Ferrífero.....	138

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

% p/p	Porcentagem em peso
AL	Alegria
anf	Anfibólio
AP	Antônio Pereira
BC	Barão de Cocais
BDL	<i>Below the Detection Limit</i>
BIF	<i>Banded Iron Formation</i>
CA	Catas Altas
Cb	Carbonato
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CHARAC	<i>CHArge-and-RAdius-Controlled</i>
CL	<i>Confidence Limit</i>
CM	Conceição do Mato Dentro
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
CV	<i>Coefficient of Variation</i>
DI	<i>Dolomitic Itabirite</i>
DL	<i>Detection Limit</i>
DP	Desvio Padrão

ES	Mina de Esperança
ETH-Zürich	<i>Swiss Federal Institute of Technology Zurich</i>
ETR	Elementos Terras Raras
ETRL	Elementos Terras Raras Leves
ETRP	Elementos Terras Raras Pesados
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais
FB	Fábrica
FCS	<i>Swiss Federal Commission for Scholarship for Foreign Students</i>
FE	Morro da Ferrugem
FF	Formações Ferríferas
FFB	Formações Ferríferas Bandadas
FFG	Formações Ferríferas Granulares
FIA	<i>Fluid Inclusion Assemblage</i>
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
gHm	<i>Granular hematite</i>
GS	Gongo Soco
hid	Hidróxido de ferro
HIO	<i>High-Grade Iron Ore</i>
hm	hematita/martita
hml	hematita microlamelar
HREE	<i>Heavy Rare Earth Elements</i>

ICP-ES	<i>Inductive Coupled Plasma - Emission Spectrometry</i>
ICP-MS	<i>Inductive Coupled Plasma - Mass Spectrometry</i>
ID	Itabirito Dolomítico
IF	Inclusões Fluidas
IGC	Instituto de Geociências
IGP	<i>Institute of Geochemistry and Petrology</i>
IT	Itabira
JA	Jacutinga de Conceição
kmg	Kenomagnetita
LA-ICP-MS	Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado por Ablação à Laser (<i>Laser Ablation - Inductive Coupled Plasma - Mass Spectrometer</i>)
LD	Limite de Detecção
LIFM	Laboratório de Inclusões Fluidas e Metalogênese
LOI	Perda por Ignição (<i>Loss on Ignition</i>)
LREE	<i>Light Rare Earth Elements</i>
MP	Morro do Pilar
mt	Martita
MT	Mutuca
N.A.	Não Analisado
NaCl _{eqv}	Equivalente em NaCl
NASC	<i>North American Shale Composite</i>
nd	<i>Not detected</i>

NIR	<i>Near infra-red</i>
PAAS	<i>Post Archean Australian Shale</i>
PB	Pau Branco
PGE	Elementos do Grupo da Platina (<i>Platinum Group Elements</i>)
ppb	Partes por bilhão
ppm	Partes por milhão
QF	Quadrilátero Ferrífero
QI	Quartzo Itabirito
QL	<i>Quantitation Limit</i>
Qtz	Quartzo
REE	<i>Rare Earth Elements</i>
RM	<i>Reference Material</i>
rsd	<i>Relative Standard Deviation</i>
s	<i>Standard Deviation</i>
Sca-17	<i>Scapolite standard</i>
SEM	Serra do Espinhaço Meridional
SER	<i>Southern Espinhaço Range</i>
SETEM	Serviço de Tecnologia Mineral
SHRIMP	<i>Sensitive High Resolution Ion Microprobe</i>
SIO	<i>Schistose high-grade iron ore</i>
spH	Espeularita

SR	Serro
SRM	<i>Standard Reference Material</i>
T _{clath}	Temperatura de fusão do clatrato
T _{CO₂}	Temperatura de fusão do CO ₂
T _{eut}	Temperatura eutética
T _H	Temperatura de homogeneização
T _{hCO₂}	Temperatura de homogeneização do CO ₂
T _{m-gelo}	Temperatura final de fusão do gelo
T _{m-HH}	Temperatura final de fusão da hidro-halita
TTG	Trondjemitó-Tonalito-Granodiorito
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USP	Universidade de São Paulo
wt%	<i>Weight percent</i>
ΣETR	Somatório dos Elementos Terras Raras

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xviii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xx
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2. OBJETIVO GERAL.....	5
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. ARCABOUÇO GEOLÓGICO	6
2.1.1. Quadrilátero Ferrífero	6
2.1.2. Serra do Espinhaço Meridional.....	8
2.2. FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS.....	11
2.2.1. Geoquímica das Formações Ferríferas Bandadas	15
2.2.2. As Formações Ferríferas do Supergrupo Minas.....	17
2.2.3. As Formações Ferríferas do Grupo Serra da Serpentina.....	18
2.3. METALOGÊNESE	19
2.3.1. O Minério de Ferro de Alto Teor	19
2.3.1.1. Principais Tipos de Minério de Ferro de Alto Teor.....	21
2.3.2. Jacutinga.....	23
2.3.3. Resumo dos Eventos e Processos Associados à Mineralização de Fe e Au-PGE em Minas Gerais.	26
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1. AMOSTRAGEM.....	28

3.2. PETROGRAFIA.....	29
3.3. GEOQUÍMICA DE ROCHA TOTAL.....	30
3.4. ESTUDOS DE INCLUSÕES FLUIDAS: Convencional e Infravermelho.....	31
3.5. ESPECTROSCOPIA RAMAN.....	32
3.6. ESPECTROMETRIA DE MASSA COM PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO POR ABLAÇÃO À LASER (LA-ICP-MS).....	33
CAPÍTULO 4. CARACTERÍSTICAS DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS E MINÉRIOS.	35
4.1. MINERALOGIA.....	35
4.1.1. Características dos Óxidos de Ferro nas Rochas dos Depósitos de Ferro do Supergrupo Minas, QF.....	35
4.1.1.1. Especcularita e Veios Hidrotermais.....	38
4.1.2. Características dos Óxidos de Ferro nas Rochas dos Depósitos de Ferro do Grupo Serra da Serpentina, SEM.....	41
4.1.2.1. Especcularita e Veios Hidrotermais.....	41
4.1.3. Características dos Óxidos de Ferro nas Rochas dos Depósitos do Tipo Jacutinga, QF	47
4.2. CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DAS ROCHAS ANALISADAS.....	53
4.2.1. Elementos Maiores.....	53
4.2.2. Elementos Traço.....	57
4.2.3. Elementos Terras Raras e Ítrio (ETR-Y).....	63
CAPÍTULO 5. MINERALIZAÇÃO EM FERRO NO SUPERGRUPO MINAS: O DEPÓSITO DE ESPERANÇA.....	70
ARTIGO: "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".....	71
5.1. INTRODUCTION.....	73
5.2. GEOLOGICAL SETTING OF QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	73

5.3. DOLOMITIC ITABIRITE AND THE HYPOGENE ENRICHMENT OF BANDED IRON FORMATION IN THE QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	75
5.4. ESPERANÇA DEPOSIT	76
5.5. MATERIALS AND METHODS	77
5.6. ANALYZED SAMPLES	78
5.7. RESULTS OF TRACE ELEMENT MICROCHEMISTRY (LA-ICP-MS).....	81
5.7.1. Strontium, Manganese and Magnesium Correlations	85
5.7.2. Titanium, Chromium and Vanadium Mobility	87
5.7.3. Rare Earth Elements and Yttrium Behavior.....	89
5.8. DISCUSSION.....	98
5.8.1. Behavior of Manganese, Magnesium and Strontium.....	99
5.8.2. Behavior of Chromium, Titanium and Vanadium	100
5.8.3. Rare Earth Elements and Yttrium	100
5.8.4. Chemical Model.....	101
5.8.5. Characteristics of Hematite from Dolomitic Itabirite	102
5.8.6. Hydrothermal Iron Upgrade from Dolomitic Itabirite and Formation of High-Grade Iron Ore Bodies.....	102
5.8.7. Iron Remobilization and Precipitation of Hydrothermal Specularite in Syn Kinematic Vugs and Veins	102
5.9. CONCLUSIONS	103
5.10. ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS: DEPÓSITO DE ESPERANÇA	104
5.10.1. Petrografia e Microtermometria das Inclusões Fluidas.....	104
5.10.1.1. Quartzo	104
5.10.1.2. Especularita.....	106
5.10.2. Microquímica de Elementos Traço por LA-ICP-MS.....	106
5.10.2.1. Quartzo	108

5.10.2.2.	Especlarita.....	110
5.11.	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS E MODELO PARA O DEPÓSITO DE ESPERANÇA.....	113
CAPÍTULO 6. MINERALIZAÇÕES BRASILIANAS.....		115
Artigo: “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, BRAZIL” ...		115
6.1.	INTRODUCTION	117
6.2.	GEOLOGICAL SETTING.....	119
6.2.1.	Regional Setting	119
6.2.2.	Orebodies and Related Veins	121
6.3.	ANALYZED QUARTZ-SPECULARITE VEINS	125
6.3.1.	Jacutinga-type Veins	125
6.3.2.	Thrust Related Veins.....	125
6.3.2.1.	Foliation-concordant Quartz-hematite Veins	125
6.3.2.2.	Gash Veins.....	128
6.4.	ANALYTICAL PROCEDURES	129
6.5.	ANALYTICAL RESULTS FROM FLUID INCLUSION STUDIES	132
6.5.1.	Fluid Inclusions in Veins from Au-PGE Jacutinga-type Deposits.....	132
6.5.1.1.	Barão de Cocais Deposit.....	132
6.5.1.2.	Gongo Soco Deposit	136
6.5.1.3.	Itabira Deposit	140
6.5.2.	Fluid Inclusions from Thrust Related-veins that Cut High-grade Iron Ore Deposits ...	141
6.5.2.1.	Morro do Pilar deposit.....	141
6.5.2.2.	Conceição do Mato Dentro deposit	145
6.5.2.3.	Catas Altas deposit	145

6.6. DISCUSSION.....	150
6.6.1. Fluid Evolution During the Brasiliano Orogeny Along the Eastern Border of the Quadrilátero Ferrífero and the Southern Espinhaço Range	150
6.6.1.1. Fluids Associated with Au-PGE Jacutinga-type Mineralization	150
6.6.1.2. Fluids Associated with Thrusts.....	152
6.6.2. Cl/Br Ratios and the Interpreted Source of Fluids	154
6.6.3. Chemical Variation and Evolution of the Fluids.....	156
6.7. CONCLUSIONS	159
CAPÍTULO 7. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	160
7.1. ESPECULARITA E A EVOLUÇÃO DOS FLUIDOS NOS DEPÓSITOS DE FERRO PALEOPROTEROZÓICOS: O DEPÓSITO DE ESPERANÇA.....	160
7.2. ESPECULARITA E A EVOLUÇÃO DOS FLUIDOS NOS DEPÓSITOS DE FERRO E Au-PGE DURANTE O BRASILIANO	162
7.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS FLUIDOS: TRANSAMAZÔNICOS <i>VERSUS</i> BRASILIANOS.....	164
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	165
ANEXOS	185

RESUMO

Características geoquímicas das rochas (itabiritos e minérios de ferro de alto teor), das diferentes gerações de óxidos de ferro e dos fluidos associados aos processos de enriquecimento em Fe e Au-PGE do Quadrilátero Ferrífero (QF) e do Sul da Serra do Espinhaço Meridional (SEM) foram estudadas utilizando-se as metodologias: petrografia, geoquímica de rocha total, inclusões fluidas e LA-ICP-MS. Os resultados da geoquímica de rocha total mostraram que os padrões obtidos são na maioria das vezes similares aos encontrados na literatura. As assinaturas químicas dos óxidos de ferro presentes no itabirito dolomítico e no minério de ferro de alto teor do Depósito de Esperança, localizado no QF, indicam que processos policíclicos envolvendo mudanças nas condições químicas e de redox são responsáveis pelo enriquecimento em ferro na Formação Cauê do Supergrupo Minas. Os resultados indicam que o itabirito dolomítico é o principal precursor do corpo de minério naquele depósito. Percolação de longa duração de fluidos hidrotermais e mudança nas condições de redox contribuíram para a alteração das razões Y/Ho, elementos terras raras leves/pesados e da anomalia de Ce com sucessivas gerações de óxido de ferro (martita-hematita granular), bem como empobrecimento dos conteúdos de elementos traço, incluindo os elementos terras raras das gerações mais recentes de specularita. Os estudos de inclusões fluidas nos cristais de quartzo e specularita sugerem a presença de fluidos distintos em termos de salinidade, temperatura e composição química. Os dados obtidos indicam que os fluidos responsáveis pela mineralização e remobilização de Fe, na região oeste do QF (depósito de Esperança), foram gerados durante a orogenia Transamazônica. Na borda leste do Craton do São Francisco diferentes fluidos metamórficos associados aos cavalgamentos e zonas de cisalhamento durante o Brasiliano foram responsáveis pela lixiviação de sílica e concentração de ferro na SEM e pelo transporte e precipitação de Au-PGE nos depósitos do leste do QF.

Palavras chave: Jacutinga, Mineralização Ferrífera, Inclusões Fluidas, Geoquímica e Metalogênese.

ABSTRACT

Geochemical characteristics of rocks, different iron oxide generations and fluids associated with the Fe-enrichment and Au-PGE processes that occurred in Quadrilátero Ferrífero (QF) and Southern Espinhaço Range (SER) were studied using the methodologies: petrography, whole rock geochemistry, fluid inclusions and LA-ICP-MS. The whole rock geochemistry results show that the obtained patterns are mostly similar to those found in the literature. Chemical signatures of iron oxides from dolomitic itabirite and high-grade iron ore from the Esperança deposit, located in the QF, indicate that polycyclic processes involving changing of chemical and redox conditions are responsible for the iron enrichment on Cauê Formation from Minas Supergroup. The results indicate that dolomitic itabirite is the main precursor of the iron ore in that deposit. Long-lasting percolation of hydrothermal fluids and shifts in the redox conditions have contributed to changes in the Y/Ho ratio, light/heavy rare earth elements ratio and Ce anomaly with successive iron oxide generations (martite-granular hematite), as well as lower abundance of trace elements including rare earth elements in the younger specularite generations. Studies of fluid inclusions in quartz and specularite crystals suggest the presence of different fluids in terms of salinity, temperature and chemical composition. Data obtained indicate that the fluids responsible for Fe-mineralization and remobilization, in western QF (Esperança deposit), were generated during the Transamazonian orogeny. In the São Francisco Craton eastern border, different metamorphic fluids are associated to the trusts and shear zones during the Brasiliano orogeny. These fluids were responsible by silica leaching and iron concentration in SER and by Au-PGE transport and precipitation in Jacutinga-type veins at eastern border of QF.

Key words: Jacutinga, Iron Mineralization, Fluid Inclusions, Geochemistry and Metalogenesis.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

As Formações Ferríferas Bandadas (FFB) são as mais importantes fontes de minério de ferro no mundo e, devido à sua forma de ocorrência, são também o tipo de depósito de ferro mais proeminente (Eichler 1973). De acordo com James (1983) o termo “Formações Ferríferas Bandadas” refere-se às rochas bandadas ou finamente laminadas em que camadas de *chert* se alternam com camadas constituídas principalmente de óxidos de ferro. O conteúdo de ferro nessas rochas normalmente varia entre 20 e 35 % e o de sílica de 40 % a 50 %. As FFB metamórficas no Brasil foram denominadas “Itabiritos” por Eschwege (1822). Em Minas Gerais essas rochas (itabiritos) hospedam importantes depósitos de minério de ferro de alto teor (> 65 % Fe) e também mineralizações raras de Au-Pd-Pt (PGE) que estão associadas a veios de hematita especular e são conhecidas como “Jacutinga”.

1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A gênese dos depósitos minerais associados aos itabiritos do Supergrupo Minas no Quadrilátero Ferrífero (QF) e do Grupo Serra da Serpentina na Serra do Espinhaço Meridional (SEM – Figura 1.1) constitui um tema muito discutido onde ainda há muito para descobrir. Daí a importância no desenvolvimento de estudos metalogenéticos com base na evolução dos fluidos envolvidos nos processos de mineralização e na geoquímica das rochas e minerais associados a esses processos.

O termo geológico “especularita” é utilizado para identificar os cristais de hematitas de aspecto lamelar que ocorrem em itabiritos e em alguns corpos de minério de ferro de alto teor do Supergrupo Minas (QF) e do Grupo Serra da Serpentina (SEM), em Minas Gerais (Figura 1.1). Essa feição da hematita pode se formar basicamente por dois processos distintos: precipitação a partir de fluidos hidrotermais ou recristalização durante processos de deformação (Rosière & Rios 2004). A importância de se conhecer a composição dos fluidos presentes neste mineral está relacionada à possibilidade de se fazer uma associação direta com os processos de mineralização. Uma vez que, a especularita é principalmente encontrada nestes depósitos em minério de ferro xistoso, em falhas ou em veios que cortam a mineralização (neste caso frequentemente associada a quartzo e carbonatos hidrotermais), assim como nos veios e/ou zonas de cisalhamento onde o ouro paladiado (Jacutinga) foi precipitado.

Estudos petrográficos, texturais e de inclusões fluidas (IF) recentemente desenvolvidos, indicaram que no nordeste do QF (Figura 1.1) ocorreu um complexo processo de oxidação e mineralização durante dois eventos orogênicos, desenvolvidos sob diferentes condições e envolvendo fluidos diferentes (Rosière & Rios 2004, 2006, Rosière *et al.* 2008). De acordo com Rosière e Rios (2004), o primeiro estágio de mineralização em Fe no Supergrupo Minas gerou corpos ricos em magnetita, que posteriormente foi martitizada. Possivelmente, nesse estágio, cristais de hematita contendo fluidos de salinidade baixa a intermediária (3,4 a 4,9% p/p NaCl_{eqv}), e temperaturas menores do que 160°C foram formados. Ainda segundo Rosière e Rios (2004), posteriormente, fluidos de elevadas salinidade e temperatura penetraram as formações ferríferas ao longo de zonas de cisalhamento cristalizando inicialmente hematita tabular e, posteriormente especularita, formando os corpos de minério xistosos.

No Grupo Serra da Serpentina (Figura 1.1), gerações de hematita (e os fluidos associados) foram estudadas preliminarmente por Lima *et al.* (2009). As soluções encontradas na hematita granular da Serra do Sapo apresentaram altas salinidades (17% p/p NaCl_{eqv}) e temperaturas de até 250°C. Cristais de especularita dessa mesma região mostram temperaturas similares, mas salinidades mais baixas (10 a 12% p/p NaCl_{eqv}). Os fluidos estudados por Rosière & Rios (2004) em hematita granular e especularita de formações ferríferas do Supergrupo Minas são um pouco diferentes tanto em termos de salinidade quanto em temperatura. Entretanto, Lima *et al.* (2009) sugerem que o conteúdo em Li observado na especularita pode indicar uma associação genética e temporal com pegmatitos de idade Brasileira localizados na região de Santa Maria de Itabira (Figura 1.1).

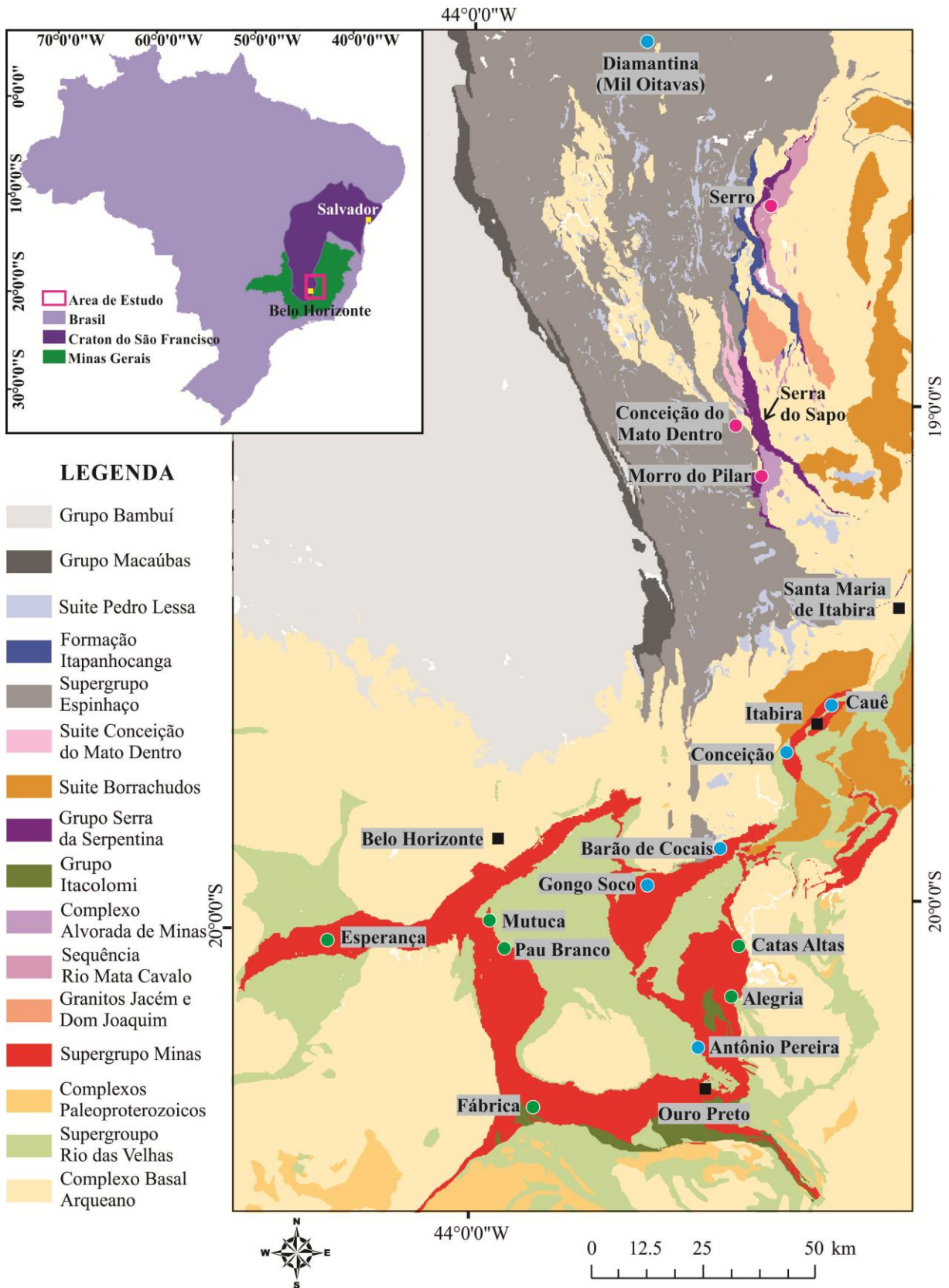


Figura 1.1. Mapa Geológico mostrando a localização da SEM e do QF e suas principais litologias (Knauer & Grossi-Sad 1997, CPRM 2004, Lobato *et al.* 2005). Os círculos ressaltam os depósitos citados neste trabalho: verde = depósitos de ferro do Supergrupo Minas (QF); azul = depósitos de Au-PGE; rosa = depósitos de ferro do Grupo Serra da Serpentina (SEM).

Nos veios de Jacutinga de origem hidrotermal (Olivo 1994, Cabral 2006), que cortam os itabiritos do Supergrupo Minas, a hematita na forma de especularita é um mineral essencial associado ao quartzo em quantidades variáveis. Fluidos aquo-salinos em especularita da Jacutinga de Gongo Soco apresentaram temperaturas de homogeneização total de aproximadamente 160 °C e salinidades entre 9,5 e 11,6% p/p NaCl_{eqv} (Cabral 2006). Lüders *et al.* (2005) também estudaram IF na Jacutinga e encontraram nessas soluções H₂O, CO₂, e proporções variáveis de Cl, SO₄, Na, K, Fe, Ca, Mg, Br, Li e Sr. Considerando os altos teores de SO₄, Lüders *et al.* (2005) sugerem que, para a formação dos minerais presentes na Jacutinga, fluidos metamórficos devem ter reagido com horizontes ricos em evaporitos durante a ascensão. Para justificar essa proposta, esses autores baseiam-se nas proporções de cátions e ânions presentes nos fluidos, notadamente SO₄²⁻, Cl⁻, Na⁺, Br⁻ e Li⁺.

As IF nos cristais de especularita do Grupo Serra da Serpentina (Lima 2009) apresentam algumas coincidências em termos de salinidade, temperatura e composição (ex. Na, K, Ca, Mg, Sr, Li), com as hematitas especularíticas estudadas por Lüders *et al.* (2005) na Jacutinga de Itabira e Gongo Soco, no QF (Figura 1.1). Os elementos Cu, Mg e Sb também foram detectados nos fluidos da especularita (Lima *et al.* 2009).

Olivo (1994) propõe que, os veios de Jacutinga apresentam um forte controle estrutural em zonas de cisalhamento dúctil que permitiram a percolação de fluidos hidrotermais de alta temperatura e altamente oxidados. Sugere ainda que, as rochas arqueanas da sequência vulcano-sedimentar subjacente (Supergrupo Nova Lima) podem representar a fonte dos metais. Ainda de acordo com Olivo (1994), estas condições físico-químicas permitiram que o Pd e o Au fossem transportados como complexos clorados ao tempo em que a deposição teria ocorrido quando estes fluidos percolaram as camadas do itabirito dolomítico.

A existência de fluidos aquo-carbônicos em minerais presentes nos pegmatitos de Santa Maria de Itabira (Marciano *et al.* 1994, Bilal *et al.* 1998, Rios *et al.* 2003, Newman 2009), localizados nas proximidades das formações ferríferas de Itabira e Sul do Espinhaço (Figura 1.1), nos leva a inferir uma possível participação de fluidos pegmatíticos na gênese da especularita. Coincidentemente com as observações de Lüders *et al.* (2005) e Lima *et al.* (2009) nas inclusões de especularita, podem ser igualmente encontrados nos fluidos pegmatíticos teores elevados em Cl, SO₄, Ca, K, Fe, Li e Br (Masoudi & Yardley 2005). Isto é reforçado pelos estudos mineralógicos desenvolvidos por Marciano *et al.* (1994) nos pegmatitos de Santa Maria de Itabira, que demonstram a presença de minerais de K, Ca, Na, Mg, Cu e provavelmente Sb. Interessante observar que esses pegmatitos são

de idade Brasileira, a mesma idade proposta por Lüders *et al.* (2005) e Olivo *et al.* (2011), para os veios de Jacutinga de Gongo Soco e Itabira.

1.2. OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho foi estabelecer comparações entre os fluidos hidrotermais responsáveis pela mineralização em Fe e Au-PGE do Supergrupo Minas no QF e do Grupo Serra da Serpentina na SEM. Foram realizadas comparações em termos composicionais e físico-químicos entre fluidos aprisionados em cristais de especularita (e quartzo associado) de diferentes depósitos e também o estudo detalhado da assinatura geoquímica das diferentes gerações de óxido de ferro do depósito de Esperança (QF). Estes estudos permitiram conhecer com detalhe os fluidos responsáveis pelos processos de mineralização associados aos dois principais eventos orogênicos que afetaram a região e contribuem para aprimorar os modelos genéticos até então existentes. Foram determinados os papéis dos fluidos na geração dos corpos de minérios de ferro e Jacutinga formados em diferentes idades, condições de metamorfismo e deformação.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conhecer com detalhe os fluidos responsáveis pelos processos de mineralização.
- Determinar o papel das soluções na geração dos diferentes tipos de minérios de ferro e Jacutinga formados em diferentes condições de metamorfismo e deformação.
- Estabelecer se existe relação genética entre as mineralizações de Fe e Au-PGE.
- Estabelecer comparações entre os fluidos do Supergrupo Minas no QF e do Grupo Serra da Serpentina na SEM.
- Contribuir para aprimorar os modelos genéticos existentes.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ARCABOUÇO GEOLÓGICO

2.1.1. Quadrilátero Ferrífero

A área do Quadrilátero Ferrífero (QF) compreende a porção nordeste do Cinturão Mineiro (Teixeira & Figueiredo 1991) localizado na porção meridional do Cráton do São Francisco (Almeida 1977) em Minas Gerais, que é uma unidade geotectônica cercada por cinturões orogênicos de idade Brasiliana (0,6 a 0,8Ga) vergentes para seu interior (Silva *et al.* 2002). Sua estrutura quadrangular foi definida por Dorr (1969) pelo arranjo de sinclinais, com os metassedimentos Paleoproterozóicos do Supergrupo Minas separados por estruturas antiformais e domos com terrenos Arqueanos e rochas cristalinas Proterozóicas (Figura 1.1).

O cinturão Serra do Espinhaço, por sua vez, é a faixa orogênica Pré-Cambriana mais extensa do território brasileiro, apresentando mais de 1200km de extensão no sentido N-S (Knauer 2007), indo desde Belo Horizonte até o norte do estado da Bahia (Figura 1.1). Limita o sudeste do Cráton do São Francisco e se amalgama com a Faixa Araçuai ao nordeste (Almeida-Abreu 1995).

O cinturão de dobras e empurrões da Serra do Espinhaço é um sistema tectônico compressivo de tendência N-S e vergência para W (Alkmim *et al.* 2006) que delinea a borda leste do Cráton do São Francisco (Figura 1.1). Este cinturão é parte do domínio oeste do orógeno Neoproterozóico do Araçuai, um dos muitos orógenos Brasilianos (Brito Neves *et al.* 2014) que se desenvolveram durante a formação do Supercontinente oeste Gondwana (Pedrosa-Soares *et al.* 2001, Cordani *et al.* 2003, Alkmim *et al.* 2006).

O embasamento da região é formado pelas rochas graníticas Arqueanas (2,66 a 2,87Ga) do Complexo Basal (Bastos Neto 1982, Grossi-Sad *et al.* 1989, 1997). No Quadrilátero Ferrífero afloram ainda o *greenstone belt* Arqueano do Supergrupo Rio das Velhas, a sequência plataformar Paleoproterozóica do Supergrupo Minas, a sequência metassedimentar Paleoproterozóica do Grupo Itacolomi e os metassedimentos siliciclásticos Paleo a Mesoproterozóicos do Supergrupo Espinhaço (Figuras 1.1 e 2.1).

Os terrenos granito-gnáissicos são constituídos por trondjemito-tonalito-granodiorito (TTG) gnaisses consolidados entre 3,4 a 2,9Ga que, posteriormente, foram intrudidos por granitóides no

Neoarqueano e Paleoproterozóico (Teixeira *et al.* 1996, Baltazar & Zucchetti 2007). Essas rochas representam a maior porção das rochas cristalinas do Embasamento (Noce *et al.* 1998, Lobato *et al.* 2001, Baltazar & Zuchetti 2007) que constituem os conhecidos domos ou complexos Bonfim, Belo Horizonte, Caeté, Bação e Santa Barbara (Carneiro 1992, Noce 1995, Lobato *et al.* 2001).

A sequência do Supergrupo Minas é subdividida em quatro grupos, da base para o topo (Figura 2.1): Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (Dorr 1969).

O Grupo Caraça é dividido nas formações Moeda e Batatal. A Formação Moeda, constituída principalmente por quartzitos, é sobreposta pela Formação Batatal, que é composta de filitos derivados de rochas sedimentares e metavulcânicas, quartzitos (*metacherts*), e rochas carbonáticas (Rosière *et al.* 2008). Idades U-Pb para os zircões detríticos dos quartzitos da Formação Moeda, na base do Grupo Caraça (Noce 1995, Machado *et al.* 1992, 1996), sugerem o início da deposição entre aproximadamente 2600 Ma a 2520Ma (Renger *et al.* 1994).

O Grupo Itabira que cobre o Grupo Caraça está subdividido nas Formações Cauê e Gandarela que gradam entre si tanto vertical quanto lateralmente. A Formação Cauê é definida por uma única camada de formação ferrífera (FF), com aprox. 250 a 300m de espessura, e hospeda os principais corpos de minério de ferro de alto teor da região (Rosière *et al.* 2008). A Formação Gandarela tem uma espessura máxima de 500m conforme estimado por Renger *et al.* (1994), com rochas carbonáticas além de filitos, metaconglomerados sin-transformacionais e camadas de formação ferrífera.

A idade de deposição do Grupo Itabira foi limitada por Babinski *et al.* (1995), que datou rochas carbonáticas estromatolíticas da Formação Gandarela, em 2419 +/- 19Ma (dados de isócrona Pb-Pb). Baseados nesse limite, os autores sugerem idade de deposição para as FF entre 2520 e 2420Ma. Recentemente, Cabral *et al.* (2012a) determinaram uma idade de 2655 ± 6Ma para a deposição da formação ferrífera do Grupo Itabira (U-Pb em zircões de rochas metavulcânicas). Em contrapartida, Sanglard (2013) dataram grãos de monazita em equilíbrio textural com os corpos de minério de ferro de alto teor obtendo uma idade de 2034 ± 11Ma (U/Pb – SHRIMP).

O Grupo Piracicaba, constituído pelas formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro, é separado das rochas do Grupo Itabira por uma marcante discordância erosiva. Esse grupo é composto por meta-arenitos ricos em Fe com seixos de FFB e metaconglomerados intercalados com metapelitos, filitos carbonáticos, *metachert*, mármores e itabiritos (Door 1964, Garcia *et al.* 1988, Rosière *et al.* 2008).

O Grupo Sabará também é separado do Grupo Piracicaba por uma discordância erosiva e é constituído por uma sequência que inclui metagrauvascas, filitos carbonosos, metadiamectitos, metaconglomerados, FFB, e rochas metavulcânicas félsicas a intermediárias. Este grupo é considerado, por Renger *et al.* (1994) e Alkmim & Marshak (1998), como tendo sido depositado durante a orogênese Transamazônica (~2,1 a 2,0Ga).

O Grupo Itacolomí, de idade de 2,1Ga (U/Pb em zircão detrítico – Machado *et al.* 1992, 1996), é constituído por quartzitos, meta-arcósios e meta conglomerados com seixos de FFB e está depositado de forma discordante sobre as unidades do Supergrupo Minas.

2.1.2. Serra do Espinhaço Meridional

O Grupo Serra da Serpentina que aflora na borda leste da Serra do Espinhaço Meridional (SEM) foi dividido por Rolim *et al.* (2016) em Formação Meloso e Formação Serra do Sapo (Figura 2.2). De acordo com esses autores, a Formação Meloso é constituída por metassedimentos pelíticos. O contato desta formação com a Formação Serra do Sapo é transicional, caracterizado por um aumento gradual na quantidade de minerais de ferro até que a rocha se transforma em FFB (Rolim *et al.* 2016).

Na Formação Serra do Sapo (Almeida-Abreu *et al.* 1989) predominam sedimentos químicos com as formações ferríferas na base e dolomitos no topo. Ainda segundo Rolim *et al.* (2016), o contato entre a Formação Serra do Sapo e as rochas da base do Grupo Itapanhoacanga é brusco e marcado por uma discordância erosiva. O Grupo Itapanhoacanga é composto por metapsamitos e metaruditos cobertos por uma camada de formação ferrífera.

Almeida-Abreu (1995) divide o Supergrupo Espinhaço em duas unidades maiores: o Grupo Guinda e o Grupo Conselheiro Mata. O Grupo Guinda (Knauer 1990) representa a maior parte das rochas atualmente aflorantes na SEM (Almeida-Abreu & Renger 2002). Este Grupo é composto da base para o topo (Almeida-Abreu & Renger 2002) por: Formação São João da Chapada; Formação Sopa-Brumadinho e Formação Galho do Miguel (Figura 2.2). O Grupo Conselheiro Mata (Dossin *et al.* 1985) é compreendido pelas formações Santa Rita, Córrego dos Borges, Córrego da Bandeira, Córrego Pereira, e Rio Pardo Grande (Almeida-Abreu 1995, Almeida-Abreu & Renger 2002). Diques de diabásio datados em 120Ma (K/Ar) ocorrem cortando todas as rochas pré-cambrianas da região (Silva *et al.* 1995).

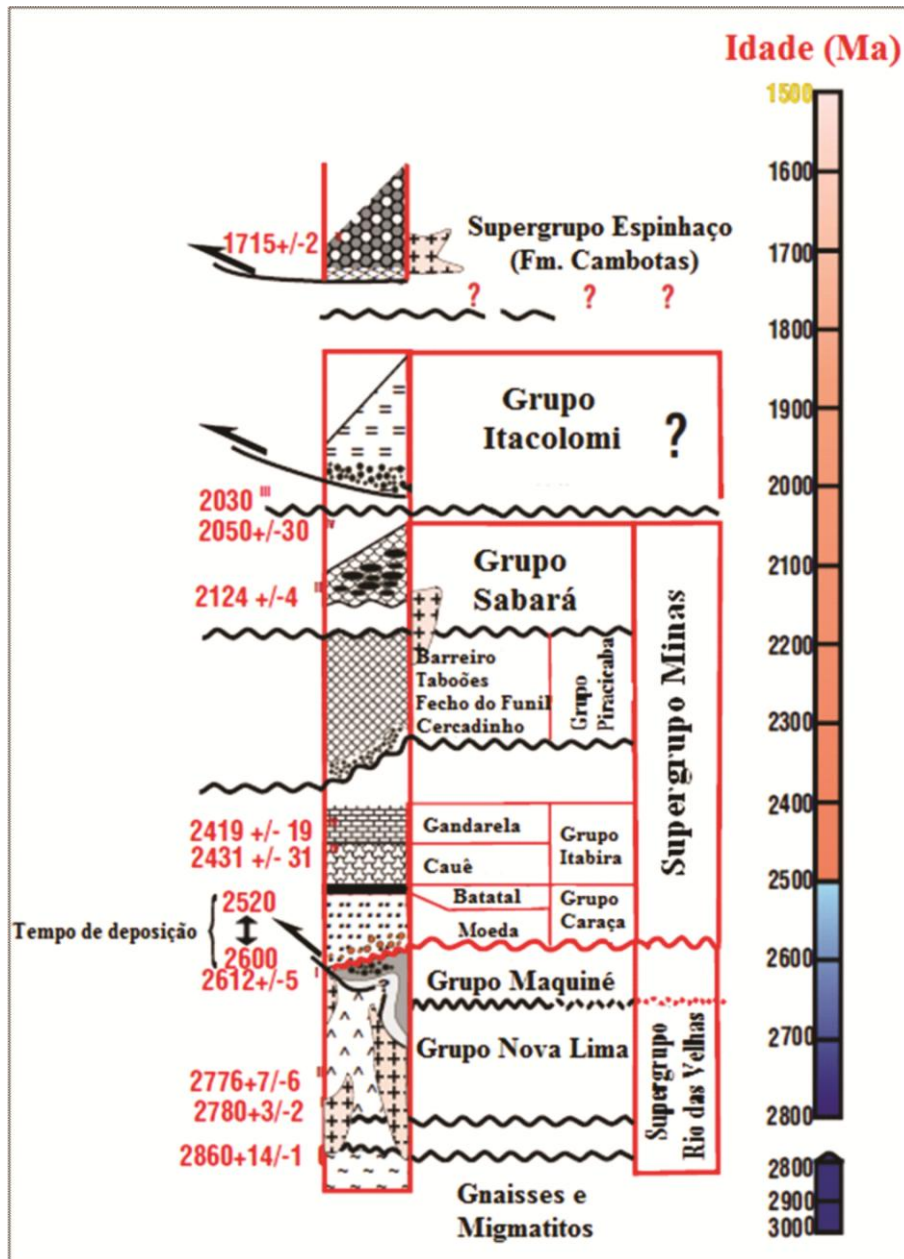


Figura 2.1. Coluna estratigráfica do QF (modificado de Rosière *et al.* 2008).

De acordo com Alkmim & Marshak (1998) a abertura da Bacia Minas ocorreu entre 2,6Ga e 2,4Ga, enquanto que, Almeida-Abreu & Renger (2002) propõem que o vulcanismo associado à abertura da Bacia Espinhaço teve início em aproximadamente 1750Ma durando até, pelo menos, 1715-1700Ma. No entanto, a deposição da sequência de Formações Ferríferas do Grupo Serra da Serpentina teria ocorrido no período de 1,99 e 1,67Ga (Rolim & Rosière 2011), anterior à abertura do rift Espinhaço.

As formações ferríferas do Supergrupo Minas, no QF, foram afetadas principalmente por dois eventos orogênicos (Trompete *et al.* 1992, Chemale Jr. *et al.* 1994, Alkmim & Marshak 1998, Rosière *et al.* 2001), primeiramente pelo evento Transamazônico (2,1 a 1,8Ga) durante o Paleoproterozóico e, por último, pela orogenia Neoproterozóica a Cedo-Paleozóica Brasileira (0,7 a 0,45Ga). Já as formações ferríferas do Grupo Serra da Serpentina na SEM foram principalmente afetadas pela orogenia Brasileira. Os efeitos causados por estes dois eventos são responsáveis pelo arranjo tectônico estrutural nestas unidades e podem estar diretamente relacionados aos processos de mineralização.

Supergrupo Espinhaço	G. Conselheiro Mata	Fm. Rio Pardo Grande	Metapelitos, subordinadamente meta-arenitos, dolomitos puros.
		Fm. Córrego Pereira	Meta-arenitos puros a micáceos, localmente pelitos
		Fm. Córrego Bandeira	Metapelitos e meta-arenitos
		Fm. Córrego dos Borges	Meta-arenitos puros o micáceos, localmente brechas/conglomerados quartzíticos.
		Fm. Santa Rita	Metapelitos e subordinadamente Meta-arenitos
	G. Guinda	Fm. Galho do Miguel	Meta-arenitos puros
		Fm. Sopa-Brumadinho	Meta-arenitos, metaconglomerados polimíticos, metapelitos e localmente metabrechas quartzíticas de matriz pelítica, filitos hematíticos e xistos verdes.
		Fm. São João da Chapada	Meta-arenitos, localmente, conglomerados e brechas; filitos hematíticos
	Grupo Itapanhoacanga	Fm. Canjica	Formações Ferríferas
		Fm. Jacém	Quartzito de grão fino a médio
Fm. Serra de São José		Quartzitos, níveis de quartzo-sericita-xisto e lentes de metaconglomerados	
Fm. Lapão		Metaconglomerados polimíticos e quartzitos grossos a médios	
Grupo Serra da Serpentina	Fm. Serra do Sapo	Formações ferríferas e dolomitos	
	Fm. Meloso	Metassedimentos pelíticos	
Suite ultramáfica Alvorada de Minas			
Complexo Basal			

Figura 2.2. Resumo da estratigrafia da Serra do Espinhaço Meridional baseado em Almeida-Abreu (1995) e Rolim *et al.* (2016).

2.2. FORMAÇÕES FERRÍFERAS BANDADAS

As Formações Ferríferas Bandadas (FFB) têm sido muito importantes para os estudos sobre a história antiga da Terra, devido à sua estreita relação com a concentração de oxigênio (Harnmeijer 2003). A maioria dos modelos sobre a gênese de depósitos de ferro é influenciada pela natureza da atmosfera no momento de sua formação e, mais especificamente, pela presença ou ausência de oxigênio na atmosfera (Law *et al.* 2002, Canfield 2005).

As formações ferríferas sedimentares hospedam importantes depósitos de minério de ferro de alto teor em todo o mundo (Figura 2.3a). A precipitação dessas formações aconteceu durante o Pré-cambriano com a principal ocorrência durante o Arqueano ao Paleoproterozóico (3,8 a 1,8Ga) reaparecendo no Neoproterozóico (0,8 a 0,6Ga – Figura 2.3b).

Dois grupos de sedimentos ferruginosos são considerados de acordo com suas características texturais: Formações Ferríferas Bandadas (FFB) dominantes do Arqueano ao Paleoproterozóico e Formações Ferríferas Granulares (FFG) mais comuns durante o Paleoproterozóico (Gross 1980, Bekker *et al.* 2010).

Vários autores (eg. James 1954, Gross 1980, Trendall 1983, Klein & Beukes 1992) definiram as FFB como rochas sedimentares de origem química, finamente bandadas ou laminadas, compostas por 15% ou mais de ferro onde as camadas de minerais de ferro são comumente intercaladas por camadas de *chert*. Os minerais diagenéticos da FFB são em geral: *chert*, jaspe, magnetita, hematita, greenalita, stilpnomelano, minesotaita, carbonatos (dolomita, calcita, siderita e ankerita) e ribequita (James 1966, Harnmeijer 2003). Já as FFG são definidas por Gross (1965, 1973, 1980) como *ironstones* com camadas oolíticas de chamosita-siderita-goetita, quantidades apreciáveis de argila e constituintes detríticos.

Emanações hidrotermais e descargas de fumarolas próximas a centros vulcânicos ao longo de áreas com fraturas profundas e alto gradiente termal na crosta têm sido considerados como a principal fonte de ferro (Fe^{2+}), sílica e outros metais constituintes das FF (James 1954, Goodwin 1973, Gross 1973, Konhauser *et al.* 2007). O *chert* é normalmente interpretado como sendo o precipitado primário (Maliva *et al.* 2005), enquanto outros modelos interpretam que este pode ter sido produto de decomposição de silicatos durante a diagênese. Entretanto, a fonte da sílica permanece controversa e a proposta mais aceita é de uma origem vulcânica, embora alguns autores (Hamade *et al.* 2003) considerem uma origem continental.

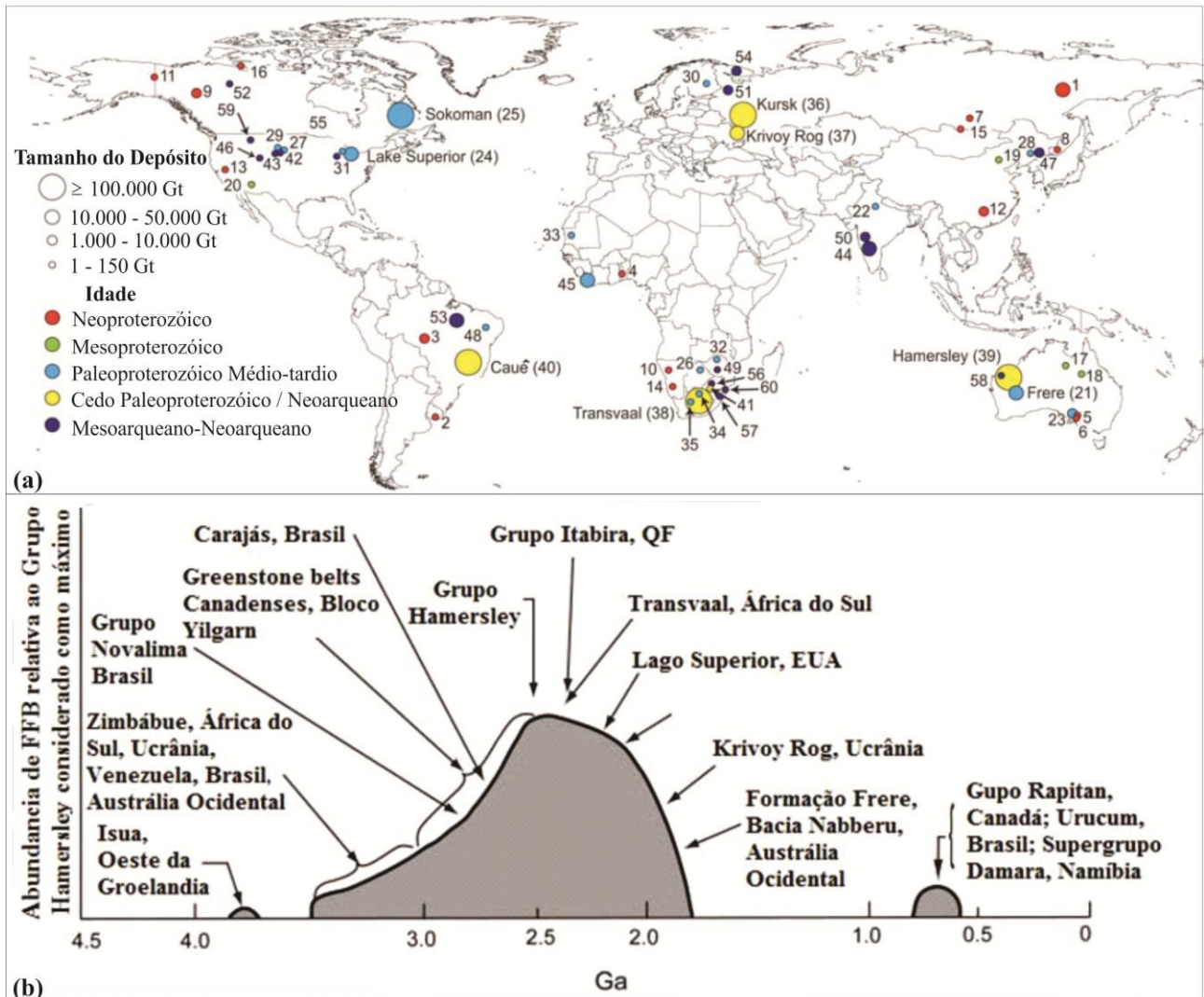


Figura 2.3. (a) Mapa ilustrando a ocorrência geral de formações ferríferas no mundo (modificado de Bekker *et al.* 2010). 1 = Formação Maly Khinghan, 2 = Formação Yerbel, 3 = Grupo Jacadigo, 4 = Grupo Bisokpabe, 5 = Holowilena Ironstone, 6 = Formação ferrífera Braemar, 7 = Formação Yamata, 8 = Formação Lake Khanka, 9 = Formação Rapitan, 10 = Formação Chuos, 11 = Grupo Upper Tindir, 12 = Formação Fulu, 13 = Formação Kingston Peak, 14 = Formação Numees, 15 = Formação Mugar, 16 = Formação Aok, 17 = Formações Corcoran and McMinn, 18 = Formação Mullera, 19 = Formação ferrífera Chuanlinggou, 20 = Formação ferrífera Pike's Peak, 21 = Formação Frere, 22 = Grupo Alwar, 23 = Grupo Hutchison, 24 = Lake Superior, 25 = Formação ferrífera Sokoman, 26 = Formação Shoshong, 27 = Formação Rochford, 28 = Grupo Liaohe, 29 = Formação Estes, 30 = Formação ferrífera Pääkkö, 31 = Formação Glen Township, 32 = Grupo Lomagundi, 33 = Grupo Ijil, 34 = Formação ferrífera Hotazel, 35 = Formação Timeball Hill, 36 = Supergrupo Kursk, 37 = Supergrupo Krivoy Rog, 38 = Transvaal, 39 = Hamersley, 40 = Formação Cauê, 41 = Formação Penge Iron, 42 = Formação ferrífera Benchmark, 43 = Formação ferrífera Nemo, 44 = Formação Mulaingiri, 45 = Nimba, 46 = Formação ferrífera Atlantic City, 47 = Anshan, 48 = Caldeirão belt, 49 = Formação ferrífera Manjeri, 50 = Grupo Bababudan, 51 = Gimola, 52 = Grupo Central Slave Cover, 53 = Carajás, 54 = Formação Olenegorsk, 55 = Grupo Steep Rock, 56 = Grupo West Rand, 57 = Supergrupo Pongola, 58 = Formação Cleaverville, 59 = Suíte metamórfica Indian Creek, 60 = Grupo Moodies. (b) Diagrama esquemático mostrando a abundância das FFB em função do tempo geológico e os principais depósitos no mundo (modificado de James 1954). O Grupo Hamersley é considerado como o ponto máximo.

A formação de estruturas bandadas foi atribuída ao fato de que fluidos hidrotermais teriam parado de chegar ao campo de deposição temporariamente devido a mudanças na circulação do oceano (Konhauser *et al.* 2002), ou por períodos de quietude hidrotermal (Morris 1993). Neste cenário, a magnitude e a frequência da atividade hidrotermal controlaram a espessura relativa destas camadas de ferro e *chert*.

Gross (1980), baseado nas características do ambiente deposicional e dos tipos de rochas associados, define três principais tipos de FFB: Algoma, Lago Superior e Rapitan (Figura 2.4).

As sequências Arqueanas do tipo Algoma são típicas de ambientes de bacia profunda próximas a centros vulcânicos, com folhelhos, grauvacas, sequências turbidíticas e vulcânicas. As sequências do tipo Lago Superior (Proterozóicas) são encontradas em ambientes de plataformas continentais e estão frequentemente associadas com dolomitos, quartzitos, folhelho negro e rochas vulcanogênicas em menor extensão.

A transição entre os tipos Algoma e Lago Superior foi gradual, no sentido de que as FFB do tipo Algoma ainda estavam precipitando em alguns continentes ao mesmo tempo em que as do tipo Lago Superior estavam iniciando sua deposição nas bacias de Hamersley e Transvaal (Clout & Simonson 2005). Esta transição entre FFB do tipo Algoma para uma mais extensa, do tipo Lago Superior, em aproximadamente 2,6Ga, aparentemente reflete o primeiro aparecimento de ambientes de plataforma continental extensa. Margens continentais proporcionam repositórios maiores e mais uniformes do que terrenos vulcânicos, e depósitos plataformais estáveis de vários tipos aumentam dramaticamente em tamanho durante o Neoarqueano (Clout & Simonson 2005).

De acordo com Clout & Simonson (2005), a expansão da plataforma continental reflete em um aumento no crescimento da crosta continental e elevação no nível do mar no Neoarqueano, embora o aumento no tamanho médio das FFB não possa ser completamente explicado como produto de uma transformação tectônica. Um aumento na abundância das FFB, primeiro nas FF do tipo Algoma até as do tipo Lago Superior e então para outras mais recentes, indica que elas foram depositadas progressivamente em águas mais rasas. Isto envolve uma diminuição da profundidade que pode refletir mudanças na química atmosférica e/ou da água do mar.

Existe um consenso de que a aparentemente abrupta interrupção na deposição das FF no Paleoproterozóico reflete mudanças na química da atmosfera e da hidrosfera (Knoll 2003, Canfield 2005). A mobilidade do Fe dissolvido em águas profundas foi dramaticamente reduzida por aproximadamente 1,9Ga. Um modelo para isto envolve um maior aumento no nível de sulfetos do

que de oxigênio dissolvido para limitar a solubilidade do Fe em oceanos Proterozóicos profundos (Canfield 1998, Anbar & Knoll 2002, Arnold *et al.* 2004).

No Neoproterozóico as FF são novamente parte da história geológica. Essas formações estão intimamente relacionadas a depósitos glacio-marinhos e podem estar intercaladas com depósitos de Mn (Beukes & Klein 1992, Klein & Ladeira 2004); são conhecidas como FFB do tipo Rapitan e as regiões típicas de sua ocorrência são Rapitan no Canadá e Urucum no Brasil. Em ambas as formações, Rapitan e Urucum, o único óxido de ferro presente é hematita.

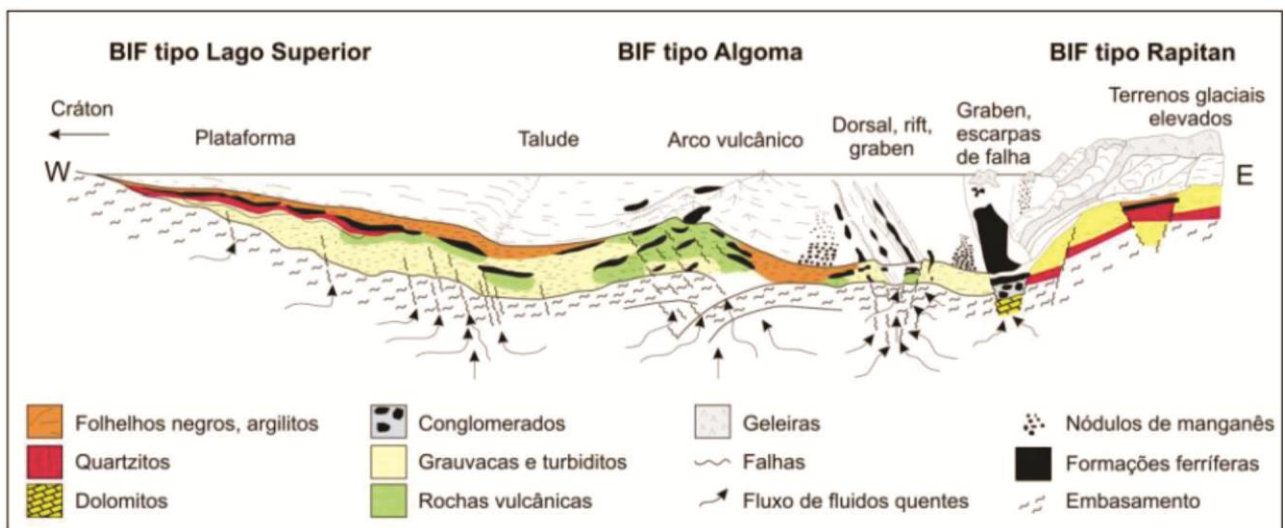


Figura 2.4. Esquema mostrando os ambientes tectônicos associados aos três diferentes tipos de FFB (modificado de Gross 1980 e Silveira Braga 2012).

Um dos mais significantes resultados de Klein & Beukes (1989) em seu trabalho geoquímico sobre a transição entre as fácies carbonato-folhelho nas FF é que estas parecem ter tido as diferentes litologias depositadas em uma coluna de água zonada ou estratificada. Uma dessas massas de água estaria perto da costa e teria características físico-químicas determinadas por uma atividade orgânica primária, enquanto a outra estaria em um sistema com mar aberto e *inputs* hidrotermais onde as águas profundas seriam a principal fonte de Fe e provavelmente de sílica, ambos originados de fontes hidrotermais. Em contraste, a superfície da água deveria ser livre de Fe em solução e as taxas de oxigênio e carbono na interface entre as águas superficial e profunda foram responsáveis pelas diferentes fácies de FFB (Beukes *et al.* 1990). Klein & Beukes (1989) sugerem, considerando

a geoquímica dos elementos terras raras (ETR) e parâmetros sedimentológicos, um sistema de deposição estratificada para o Supergrupo Transvaal, África do Sul.

2.2.1. Geoquímica das Formações Ferríferas Bandadas

O conteúdo de ferro nas FFB de acordo com Klein (2005) é de aproximadamente 20% a 40% e o de SiO₂ é de 34% a 56%. Os óxidos CaO e MgO ocorrem em aproximadamente 1,75% a 9,0% e 1,20% a 6,70% respectivamente. Enquanto MnO geralmente apresenta menor conteúdo, entre 0,1% a 1,15% e o Al₂O₃ apresenta 0,09% a 1,8%. Esses elementos aparecem normalmente como reflexo da composição de carbonatos e silicatos presentes na rocha (Klein 2005).

Desde a década de 60, a distribuição de elementos terras raras (ETR) nas FFB Precambrianas tem sido discutida na literatura porque reflete a distribuição dos ETR na água do mar contemporânea e fornece informações sobre as condições físico-químicas durante a precipitação das FFB (Bau & Möller 1993).

Baseado no fato de que as FFB Arqueanas apresentam notável anomalia positiva de Eu (normalizado a *North American Shale Composite* - NASC), alguns autores (eg. Fryer 1977, Graf Jr. 1978, Fryer *et al.* 1979, Derry & Jacobsen 1990, Danielson *et al.* 1992, Kato *et al.* 1998) concluem que o oceano Arqueano foi controlado por grandes quantidades de soluções hidrotermais. As FFB do tipo Lago Superior apresentam uma diminuição na intensidade dessa anomalia positiva de Eu sugerindo uma diminuição no *input* de fluido hidrotermal durante este período (Figura 2.5). De acordo com Bau & Möller (1993), essa diminuição na intensidade da anomalia de Eu normalmente é resultado de uma redução da temperatura das soluções hidrotermais, refletindo a diminuição da temperatura do manto superior.

A anomalia de Ce reflete condições de oxi-redução, devido à redução do Ce⁴⁺ para Ce³⁺, e esse processo é rápido o suficiente para responder a mudanças súbitas do ambiente. Entretanto, a ausência de uma anomalia de Ce pode ser causada pelas condições menos oxidantes do oceano Médio-Arqueano quando comparado com o oceano moderno (Bau & Möller 1993). A aparente anomalia de Ce observada na Figura 2.5 não é interpretada como verdadeira por Klein (2005), uma vez que um ambiente oxidante seria incompatível com os dados químicos e mineralógicos até então existentes.

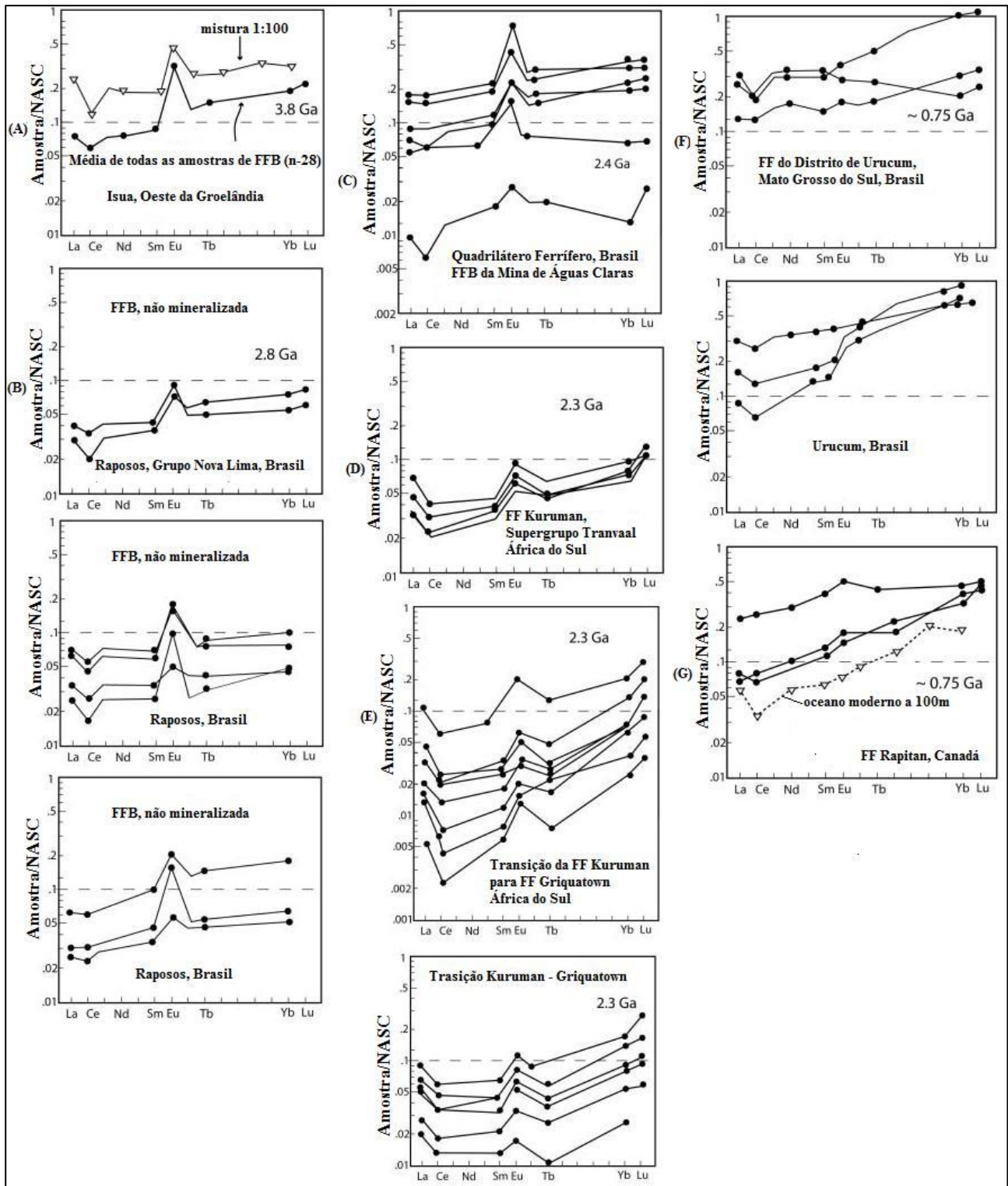


Figura 2.5. Espectros multielementares de elementos terras raras (ETR), normalizado com NASC, para FFB Precambrianas de várias idades (modificado de Klein 2005).

As FF mostram um padrão de ETR empobrecido em ETR leves (ETRL), normalizado para NASC, que se assemelha com o padrão para água do mar abaixo de 100 m de profundidade. A

principal diferença entre os *spidergrams* (Figura 2.5) para FFB e água do mar é a anomalia de Eu pronunciada nas FFB (Klein & Beukes 1989).

As FF Neoproterozóicas do tipo Rapitan apresentam características muito diferentes que podem ser observadas nas Figuras 2.5f e 2.5g. Essas amostras são empobrecidas em ETRL e em geral perdem a anomalia de Eu, perfil muito semelhante às águas oceânicas modernas. A partir disso, Klein (2005) concluiu que a fonte dos metais (Fe, Mn e Si) é provavelmente de origem hidrotermal profunda, mas que o componente hidrotermal parece ser muito mais diluído do que no caso das formações Precambrianas.

2.2.2. As Formações Ferríferas do Supergrupo Minas

O termo itabirito (Eschwege 1822, Hagemann *et al.* 2008) é aplicado a FF metamórficas da Formação Cauê, embora o mesmo seja ainda utilizado para denominar rochas similares na África Ocidental e outras regiões do Brasil, apresentando variedade de tipos mineralógicos e texturais. As características dos diferentes tipos de itabirito dependem da sua composição primária, do grau metamórfico, do grau de alteração hidrotermal e da deformação. A estrutura acamadada é geralmente herdada de um sedimento “primário”, embora seja comumente obliterada por transposição e diferenciação metamórfica, dando origem a uma foliação tectono-metamórfica definida por quartzo, carbonato e óxidos de ferro. O aumento da intensidade da deformação em condições dúcteis resulta na recristalização sintectônica de especularita, que forma palhetas orientadas na foliação com o desenvolvimento de uma trama cristalográfica preferencial (Rosière *et al.* 2001).

Dorr & Barbosa (1963) e Dorr (1964, 1965, 1969) distinguem diferentes fácies mineralógicas de itabirito no QF, incluindo quartzo itabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfíbolítico. Quartzo itabirito é o mais comum, com alternância de níveis de quartzo e óxido de ferro. O itabirito dolomítico apresenta a mesma textura finamente bandada com bandas de dolomita e óxidos de ferro, além de algum quartzo. Calcita, talco, clorita e anfíbolios estão presentes em proporção variada. O aumento de proporção de anfíbolios dá origem ao itabirito anfíbolítico, descrito exhaustivamente por Guild (1957), Gair (1962), Dorr & Barbosa (1963), Pomerene (1964), Wallace (1965), Reeves (1966), Simmons (1968), Moore (1969), Maxwell (1972) e Pires (1995). Itabiritos dolomíticos gradam vertical e lateralmente para quartzo itabiritos, assim como para as variedades anfíbolíticas.

Nos itabiritos do QF o principal óxido de ferro é a hematita que ocorre em diferentes formas, como martita, hematita granoblástica e especularita, indicando diferentes gerações de óxidos e extremamente relacionadas com o grau de metamorfismo e deformação (Rosière *et al.* 2001). Indícios de existência de magnetita são observados pela presença de kenomagnetita (Kullerud *et al.* 1969), que ocorre geralmente como relictos dentro dos cristais de hematita (Rosière & Chemale Jr. 2000).

2.2.3. As Formações Ferríferas do Grupo Serra da Serpentina

As formações ferríferas da borda leste da Serra do Espinhaço Meridional (SEM) afloram principalmente em três localidades: Morro do Pilar, Serra da Serpentina e Serra do Sapo (Figura 1.1).

Segundo Rolim *et al.* (2016), essas FFB são em geral compostas por bandas de quartzo e óxidos de ferro, principalmente hematita, especularita e, localmente, magnetita. Seus teores médios de ferro total chegam a 32,5% e quando intemperizadas podem atingir 43,86% Fe. Alguns corpos ricos, de composição especularíticas e de origem hidrotermal, ocorrem associados a falhas de empurrão e têm teores médios de 66,93% de Fe (Rolim & Rosière 2011). Essas FFB são consideradas do Tipo Lago Superior devido à associação lito-estratigráfica e ambiente de deposição.

Embora alguns autores (Pflug 1965, Pflug *et al.* 1980, Dossin *et al.* 1990) considerem que, possivelmente, a sequência clasto-química que compreende as FFB da SEM seria correlata ao Supergrupo Minas do QF, outros trabalhos corroboram com a ideia de que o Supergrupo Minas é mais velho (Almeida 1977, Costa & Inda 1982, Dossin *et al.* 1984, entre outros). Em trabalho recente, Rolim & Rosière (2011) limitam a idade de deposição do Grupo Serra da Serpentina entre 1,99 e 1,67Ga (U/Pb – SHRIMP), estabelecendo portanto, que não existe relação cron-estratigráfica com o Supergrupo Minas.

2.3. METALOGÊNESE

2.3.1. O Minério de Ferro de Alto Teor

As províncias de Hamersley na Austrália, QF e Carajás no Brasil, Transvaal na África do Sul, além das diversas e pouco estudadas províncias na Índia (Goa, Rajahra, Noamundi etc.) representam as maiores acumulações desse elemento ou de qualquer outro na crosta terrestre. Os depósitos de cada província contêm mais de um bilhão de toneladas de óxido de ferro, o que representa um enriquecimento de 13.000 vezes a média da abundância crustal de ferro (50gramas/ton – Goldschmidt, 1954).

Os minérios de ferro associados às formações ferríferas possuem aproximadamente 64% de ferro total e podem conter arranjos dos minerais: magnetita/martita/maghemita; hematita/especularita; goethita e outros hidróxidos. São chamados de minérios de alto teor aqueles que possuem concentração de ferro superior a 60%.

Segundo Clout & Simonson (2005), modelos para o enriquecimento da FFB para o minério de ferro de alto grau se enquadram, em geral, em três categorias:

- Processos Cedo Sin-genético e Diagenético (Lascelles 2002):

Extensivas interseções de FFB livre de *chert* com enriquecimento superficial em hematita foram descobertas em Mt. Gibson indicando duas possíveis rotas para a formação do minério enriquecido: 1) substituição hidrotermal do *chert* por carbonato, ou 2) ausência deste durante a deposição ou subsequente perda de *chert* durante a diagênese antes da litificação.

Em resumo, segundo o autor a formação ferrífera teria sido depositada como uma “lama” e, durante a diagênese ou litificação, separada em *chert* e óxido de ferro devido à diferença de densidade. Após essa separação, teria havido uma compactação da rocha formando uma camada espessa sem ou com pouco *chert* e a alteração desta teria levado a formação do minério. Alternativamente o mesmo autor levanta a hipótese de precipitação primária de silicatos e subsequente decomposição desses minerais em SiO₂ e óxidos de Fe durante a diagênese. Para as

FFB com *chert*, o autor sugere que antes do processo de alteração o *chert* teria sido substituído por carbonato e somente depois por processos de alteração e oxidação teria ocorrido o enriquecimento.

- Modelo de Enriquecimento Supergênico ou Paleo-supergênico (Dorr 1964, Morris 1985, 1993):

Os modelos supergênicos propõem que o minério seria um concentrado residual formado a partir da lixiviação da ganga na formação ferrífera por circulação profunda de água subterrânea, mas não implica que seja um processo de lateritização (Morris 1993). Segundo Morris (1985), esse modelo supergênico teria, como primeira etapa, fluidos meteóricos afetando as FFB por simultânea oxidação da magnetita para martita e substituição do quartzo por goethita. E em uma segunda etapa, o metamorfismo teria alterado a martita e a goethita para hematita microlamelar (Webb *et al.* 2002).

- Modelo de Enriquecimento Hipogênico/Hidrotermal (Door 1965, Beukes 1986, Hagemann *et al.* 1999, Gutzmer *et al.* 2002):

Neste modelo a mineralização invariavelmente ocorre associada com falhas normais recentes (Taylor *et al.* 2001). A formação do minério pode ser atribuída à lixiviação de sílica (*chert*) ou carbonato das formações ferríferas e recristalização de outras fases minerais ferríferas como especularita e martita. Pode ter havido alguma mobilização de ferro no sistema, como é indicado pela substituição de bandas de *chert* por hematita sem significativa perda de volume (Beukes *et al.* 2003) e também pela existência de veios ricos em óxidos de ferro cortando o itabirito e/ou as rochas encaixantes. Entretanto, a maior parte do enriquecimento pode ser considerada como ocorrendo por lixiviação de sílica, compactação e um aumento na porosidade (Taylor *et al.* 2001). Esse modelo também pode incluir uma modificação posterior do minério de alto teor por um evento supergênico, aumentando assim o teor do minério (Clout & Simonson 2005).

Entretanto, na maioria dos grandes depósitos, o enriquecimento em Fe parece polifásico, envolvendo lixiviação de minerais de ganga (Taylor *et al.* 2001, Hagemann *et al.* 2005), mas também com remobilização de Fe, formando-se diversas gerações de óxidos de Fe que registram estágios distintos de enriquecimento conforme documentado por Rosière & Rios (2004) para o QF.

Como em diferentes depósitos do mundo (Barley *et al.* 1999, Taylor *et al.* 2001, Dalstra & Guedes 2004, Hagemann *et al.* 2005), no Supergrupo Minas corpos maciços de magnetita, como os encontrados nos depósitos de Jangada e Córrego do Feijão, são atribuídos a um estágio precoce, comumente associado à metassomatismo carbonático. No segundo estágio de mineralização ocorre oxidação da magnetita e formação de martita e hematita que, no Supergrupo Minas, é observado em todos os depósitos localizados no domínio ocidental tais como Feijão, Mutuca e Pico. A conversão em martita tanto pode ser atribuída ao aumento da fugacidade de oxigênio quanto à queda da temperatura do fluido hidrotermal, provavelmente por lixiviação de Fe^{2+} da magnetita (Rosière *et al.* 2008).

O crescimento sin-deformacional de cristais placóides (especularita) e tabulares representam uma terceira geração, especialmente abundante em regiões de alta deformação interna formando corpos tabulares xistosos, controlados por zonas de cisalhamento como nos depósitos a leste do QF (Conceição, Fazendão e Andrade) e na Serra da Serpentina (Rosière & Rios 2004).

2.3.1.1. Principais Tipos de Minério de Ferro de Alto Teor

Os minérios de ferro associados a formações ferríferas podem ser subdivididos de acordo com sua consistência física em compacto e friável; por sua composição mineralógica em “azul”, compostos principalmente por hematita, e “marrom” compostos por goethita e outros hidróxidos de Fe (Rosière *et al.* 2008). Uma descrição detalhada das características destes minérios de acordo com as características físicas é dada a seguir e imagens ilustrativas podem ser observadas na Figura 2.6:

- Minério Compacto: pode variar de maciço ou bandado a xistoso. A variedade maciça é densa e a bandada é mais porosa. As duas apresentam coloração azul e são compostas por hematita, martita, kenomagnetita e em menor quantidade specularita. No minério bandado a distribuição destes minerais imitam a estrutura da FFB (Figuras 2.6a e 2.6b).
- Minério Xistoso: são principalmente desenvolvidos em domínio de alta deformação e são controlados por falhas de empurrão e transcorrentes, com o desenvolvimento de xistosidade em zonas de cisalhamento e também no plano axial de dobras. Exibem textura lepidoblástica com specularita (Figura 2.6c). Não são observados em todos os depósitos do mundo.

- Minério Friável: podem apresentar relictos de bandamento, aparecer brechados, ou pulverulentos e aparentemente desprovidos de estrutura interna (Figura 2.6b). Não são muito diferentes mineralogicamente do minério compacto. Podem apresentar goethita.
- Minério Friável (macio) a Compacto Cimentado por Goethita (Minério Marrom): contem teor de Fe variável e consideráveis quantidades de goethita e hidróxidos de Fe. São formados por processos supergênicos de hidratação/lixiviação dos minerais da ganga (Figura 2.6d).

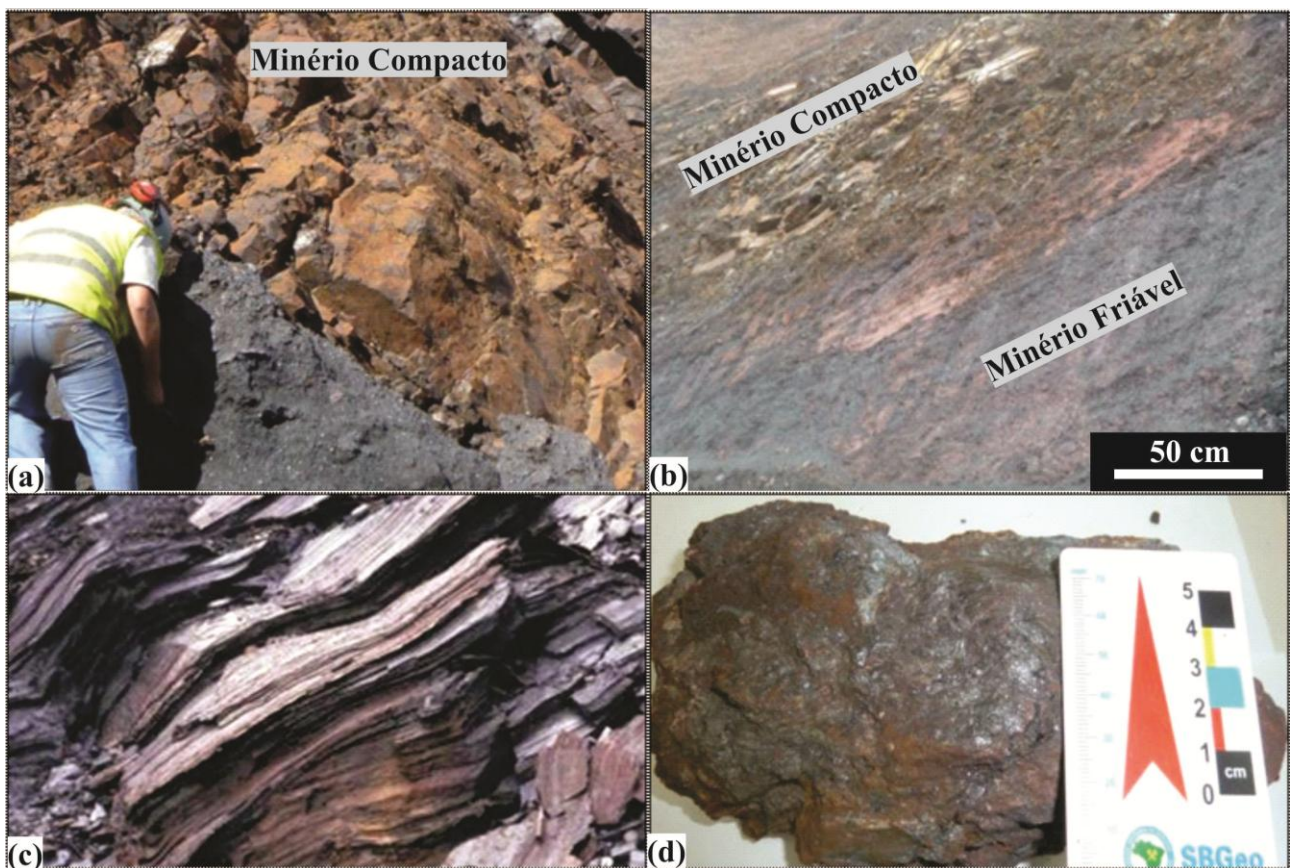


Figura 2.6. Aspecto textural dos diferentes tipos de minério de ferro de alto teor classificados de acordo com Rosière *et al.* (2008). (a) Minério compacto, Mina Casa de Pedra (QF); (b) Lente de minério compacto dentro do minério friável, Mina de Pau Branco (QF); (c) Minério xistoso, Mina de Conceição, QF (Rosière *et al.* 2008); (d) Minério friável a compacto cimentado por goethita (supergênico), Depósito de Catas Altas, (QF).

2.3.2. Jacutinga

A gênese dos depósitos de elementos do grupo da platina (PGE) ainda não é bem definida principalmente pela existência de uma grande variedade de estilos de mineralização, mas depósitos associados a intrusões máfica-ultramáficas são comuns e de maior importância (Maier 2005).

Maier (2005) descreve a existência de oito estilos diferentes de depósitos PGE sendo um deles classificado como hidrotermal. Esse autor ressalta que somente poucos casos são documentados onde o processo hidrotermal seria o principal fator responsável pela mineralização, dentre eles estando os depósitos brasileiros do QF (Jacutinga, MG) e de Serra Pelada (PA). Em geral as ocorrências hidrotermais de PGE estão relacionadas a remobilizações desses elementos de origem magmática que se precipitam em zonas de cisalhamento ou falhas associadas a intrusões máfica-ultramáficas.

A mineralização de Au-PGE, conhecida como Jacutinga, ocorre como veios e/ou zonas de cisalhamento que cortam itabiritos alterados hidrotermalmente, e parecem ser restritas ao leste do QF (Figuras 2.7 e 2.8). A Jacutinga é formada principalmente por hematita (especularita), quartzo, magnetita (\pm goethita), filossilicatos claros (talco, flogopita e caulinita) e óxido de manganês, com menor quantidade de turmalina, apatita e monazita (Henwood 1871, Hussak 1904, Olivo *et al.* 1995, Cabral 1996, 2006, entre outros).

Segundo Hussak (1906):

Como Jacutinga devem ser considerados os depósitos em forma de núcleos e faixas, no itabirito; sempre estreitos e que se caracterizam por um enorme teor de ouro, que em geral falta ao resto do itabirito; por completa ausência de pirita e; pela ocorrência de núcleos, ora talcosos, ora puramente argilosos, acompanhado de pirolusito pulverulento. (Hussak 1906).

No século XIX os depósitos do tipo Jacutinga mais importantes eram Gongo Soco, Bananal, Cata Preta, Maquiné e Itabira (Figura 2.8). Entretanto, existem muitos outros depósitos menores ao longo de todo o leste do QF (Galbiatti *et al.* 2007).

Diversos autores sugerem que a mineralização é controlada por estruturas dúcteis, como estiramento mineral e eixos de dobras (ex. Leão de Sá & Borges 1991, Olivo 1994, Olivo *et al.* 1995), mas Galbiatti *et al.* (2007) consideram que a geometria e o *plunge* dos corpos de minério são controlados por estruturas rúpteis.



Figura 2.7. Veio de Jacutinga cortando o Itabirito dobrado na Mina de Gongo Soco (Cabral 2006).

De acordo com Cabral (1996, 2006), o ouro da Jacutinga ocorre como partículas livres ou como inclusões em hematita especular, pirolusita ou goethita. Dois estágios de mineralização aurífera hidrotermal são propostos por este autor: um estágio inicial síncrono à formação da hematita especular e talco; e outro como uma deposição em baixa temperatura, associada à goethita e pirolusita. Esse enriquecimento final é atribuído a processos supergênicos.

Um ambiente hidrotermal oxidante e ácido é assumido com base na existência de hematita especular e caulinita por Cabral (1996). Nas condições do tampão hematita-magnetita, espera-se que o ouro seja transportado como complexos clorados e que um mecanismo de deposição eficiente se processe quando o fluido reage com magnetita e promove sua oxidação para hematita, precipitando ouro.

Recentemente Cabral *et al.* (2015a), obtiveram uma idade de $495,6 \pm 2,2\text{Ma}$ para cristais de monazita encontrados em um veio de Jacutinga na Mina de Conceição (distrito de Itabira) no QF. Estes autores inferem que a Jacutinga pode ser um fenômeno localmente restrito de um sistema hidrotermal mais amplo que teria desempenhado um papel importante no enriquecimento do itabirito para formação dos corpos de minério de ferro de alto teor no QF.

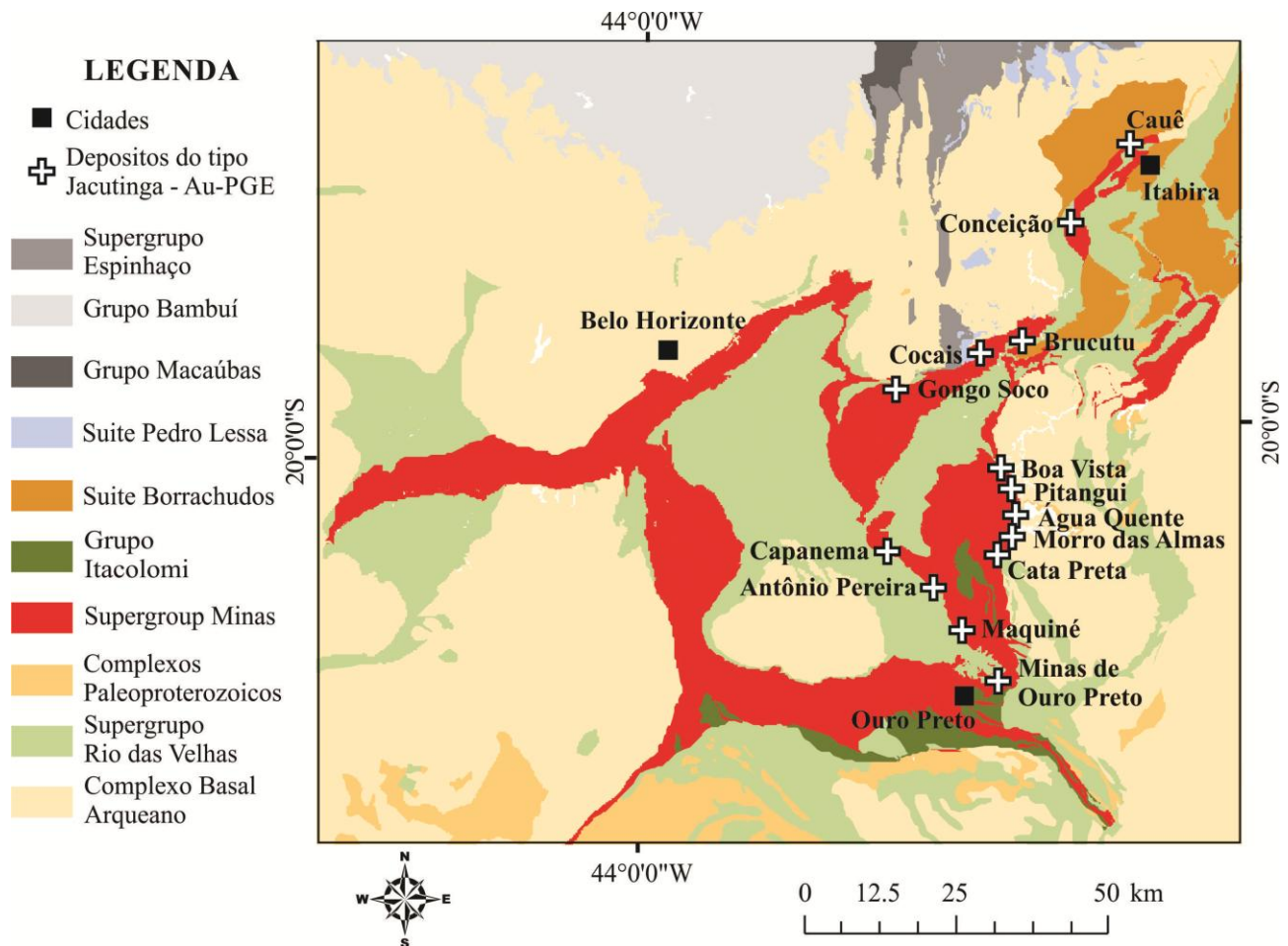


Figura 2.8. Mapa geológico simplificado do QF mostrando as principais ocorrências de Jacutinga (Cabral 1996, CPRM 2004, Lobato *et al.* 2005, Galbiatti *et al.* 2007).

Olivo *et al.* (1995) também propõem um mecanismo para transporte e deposição do ouro paladiado, onde em condições de alta temperatura e elevada fugacidade de oxigênio, esses elementos teriam sido transportados como complexos clorados e depositados em resposta a um aumento do pH. Propõem ainda que a Jacutinga seria resultado da alteração do itabirito dolomítico.

2.3.3. Resumo dos Eventos e Processos Associados à Mineralização de Fe e Au-PGE em Minas Gerais.

A Tabela 2.1 resume os eventos geológicos, processos e as hipóteses metalogenéticas associados aos processos de mineralização em ferro e ouro paladiado no QF e SEM encontrados na literatura.

Tabela 2.1. Resumo dos dados existentes na literatura relacionados com a gênese das mineralizações de ferro e Au-PGE no QF e SEM.

Idade (Ga)	Evento	Principal(is) Ocorrência(s) Mineral(is)	Rocha Hospedeira	Grau Metamórfico T(°C)	Processos associados	Referências
2,5–2,4	Deposição das Formações Ferríferas do Supergrupo Minas	Óxido de ferro + <i>chert</i> ou carbonatos	-	Anfibolito (Leste QF) Xisto verde (Oeste QF)	Deposição química em plataforma continental.	Babinsk <i>et al.</i> (1991, 1995), Rosière & Rios (2004), Rosière <i>et al.</i> (2008)
2,2 – 1,9	Enriquecimento em ferro QF (A)	Hematita/magnetita; Dolomita rica em ferro	Itabirito	Anfibolito	Hidrotermal sin-metamórfico, com fluidos de baixa salinidade.	Alkmim & Marshak (1998), Rosière & Rios (2004), Rosière <i>et al.</i> (2008)
	Enriquecimento em ferro QF (B)	Magnetita → martita → hematita I (porosa)	Itabirito	Anfibolito (Leste QF) Xisto verde (Oeste QF)	Fluidos de alta fO_2 e baixa temperatura.	Rosière & Rios (2004), Rosière <i>et al.</i> (2008)
	Enriquecimento em ferro QF (C)	Hematita II (granular)	Itabirito	Xisto verde (Oeste QF)	Fluidos de baixa a média salinidade que lixiviaram Mg, Ca e CO ₂ do itabirito dolomítico.	Rosière & Rios (2004)
1,99 - 1,67 (Zr detriticos)	Deposição do Grupo Serra da Serpentina (SEM)	Óxido de ferro + <i>chert</i>	-	Alto xisto verde a baixo anfibolito	Bacia intra-cratônica, faminta e sem atividade tectônica sin-deposicional.	Rolim & Rosière (2011), Rolim <i>et al.</i> (2016)

Continuação da Tabela 2.1. Resumo dos dados existentes na literatura relacionados com a gênese das mineralizações de ferro e Au-PGE no QF e SEM.

Idade (Ga)	Evento	Principal(is) Ocorrência(s) Mineral(is)	Rocha Hospedeira	Grau Metamórfico T(°C)	Processos associados	Referências
~0.5 –Muscovita, Hornblenda e Biotita (Ar/Ar)	Formação dos depósitos do tipo Jacutinga (QF)	Au-PGE + especularita e/ou quartzo	Itabirito	Alto xisto verde a anfíbólito / >500°C	<ul style="list-style-type: none"> • Evento de resfriamento prolongado, sugestivo de soerguimento e erosão seguindo espessamento tectônico. • Segundo evento de deformação associado com a mineralização e remobilização de ouro. 	Olivo <i>et al.</i> (2011)
0.6 (U-Pb hematita – Inclusões fluidas – ouro paladiado)				<660°C	<ul style="list-style-type: none"> • Fluidos mineralizantes teriam lixiviado rochas evaporíticas e interagido com as rochas cristalinas do embasamento. • Fluidos: salinos, contendo SO₄²⁻ e de moderada a altas temperaturas. • Au-Pd-Pt lixiviados das rochas arqueanas. • Condições oxidantes e metais transportados como complexos clorados. 	Lüders <i>et al.</i> (2005), Cabral (2006)
0,8 – 0,5	Formação dos veios de quartzo- especularita	Especularita e quartzo	Itabirito e corpos de minério	Anfíbólito (Leste QF) Xisto verde (Oeste QF)	<ul style="list-style-type: none"> • Fluidos hidrotermais de composição não determinada, precipitados em falhas, fraturas e/ou zonas de cisalhamento. 	Rosière & Rios (2004), Rosière <i>et al.</i> (2008)
?	Enriquecimento em ferro do Grupo Serra da Serpentina	Hematita, especularita e subordinada magnetita	Itabirito	Alto xisto verde a baixo anfíbólito	<ul style="list-style-type: none"> • Minério formado a profundidades de 750 m e 1500 m em duas fases diferentes • Fluidos do sistema aquo-salino H₂O-NaCl-FeCl₂ e salinidade média de 17% eq. NaCl para a primeira fase de mineralização. • Fluidos do sistema aquo-salino H₂O-NaCl-KCl (possivelmente com MgCl₂) durante a segunda fase de mineralização. 	Lima (2009), Rolim & Rosière (2011), Rolim <i>et al.</i> (2016)

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. AMOSTRAGEM

Foram realizados 9 trabalhos de campo em diferentes regiões e minas do QF e SEM (Figura 3.1) visando à caracterização geológica, seleção e coleta de amostras. Além dos trabalhos de campo, algumas amostras relevantes para este trabalho foram gentilmente cedidas pelos geólogos: Francisco Javier Rios, Carlos Alberto Rosière, Henrile Meireles, Alexandre R. Cabral e V. Lüders.

As Tabelas 3.1 e 3.2 detalham o número de amostras coletadas por área assim como suas respectivas origens. Foram coletadas 6 amostras de furo de sondagem, 45 de afloramentos, e mais 8 cedidas por geólogos colaboradores deste trabalho, totalizando 59 amostras.

Tabela 3.1. Relação da quantidade e origem das amostras coletadas.

Localização	Área (abreviatura)	nº de amostras	Descrição do local de amostragem
Leste QF	Catas Altas (CA)	6	Afloramentos de minério de ferro próximos da cidade de Catas Altas.
	Alegria (AL)	10	Coletadas dentro da mina de Alegria.
	Barão de Cocais (BC)	9	Zona de cisalhamento onde no passado já foi extraído Au-paladiado, localizado próximo à mina de Brucutu.
Oeste QF	Pau Branco (PB)	8	Coletadas em afloramentos de corpo de minério dentro da mina de Pau Branco.
	Esperança (ES)	6	Amostras do furo de sondagem F24 da mina de Esperança.
	Mutuca (MT)	1	Afloramento de itabirito na beira da estrada próximo a entrada da mina da Mutuca.
Borda leste da SEM	Morro do Pilar (MP)	9	Afloramento de itabirito, minério de ferro e milonito, na beira da estrada próxima a cidade de Morro do Pilar.
	Conceição do Mato Dentro (CM)	2	Afloramento de minério de ferro cortado por veios de quartzo com especularita na beira da estrada próxima a cidade de Conceição do Mato Dentro.

Tabela 3.2. Relação das amostras cedidas para a realização deste trabalho.

Localização	Área (abreviatura)	Descrição	Cedidas por
Leste QF	Conceição (JA)	Jacutinga encontrada dentro da mina de Conceição em Itabira	Carlos A. Rosière
Leste QF	Antônio Pereira (AP)	Seixo de quartzo que corta a Jacutinga (rolado de afloramento).	Carlos A. Rosière
Leste QF	Gongo Soco (GS)	Fragmento de veio de quartzo com Au visível recuperado na planta de minério de ferro por concentrador gravimétrico Knelson.	Alexandre R. Cabral
Leste QF	Itabira (IT)	Grãos de especularita associada à Jacutinga. Mesma amostra utilizada no trabalho Lüders <i>et al.</i> 2005.	V. Lüders
Leste QF	Fábrica (FB)	Grãos de especularita. Mesma amostra utilizada no trabalho Lüders <i>et al.</i> 2005.	V. Lüders
Oeste QF	Esperança (ES)	Minério de ferro compacto cortado por veio de quartzo com especularita.	Henrile Meireles
SEM	Morro da Ferrugem (FE)	Minério de ferro especularítico.	Francisco J. Rios
SEM	Serro (SR)	Itabirito com especularita e quartzo. Furo de sondagem.	Vassily Rolim

3.2. PETROGRAFIA

Os equipamentos utilizados nas análises petrográficas foram os microscópios ópticos Leica DMRXP e Leica 4500, ambos pertencentes ao Laboratório de Inclusões Fluidas e Metalogênese (LIFM) do Serviço de Tecnologia Mineral (SETEM) do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN).

3.3. GEOQUÍMICA DE ROCHA TOTAL

As análises de rocha total foram realizadas pelo Acme Analytical Laboratories LTD. Os elementos maiores foram analisados por ICP-ES (*Inductive Coupled Plasma - Emission Spectrometry*) seguida da fusão a metaborato/tetraborato de lítio e diluição por digestão nítrica. A perda por ignição (LOI - *Loss on ignition*) foi feita pela diferença em peso depois da ignição a 1000°C e as análises de C e S total por Leco. Os elementos traço foram analisados por ICP-MS (*Inductive Coupled Plasma - Mass Spectrometry*) após a decomposição que é similar à realizada para elementos maiores e, em adição uma parte da amostra é separada e digerida com água-régia para análise de elementos preciosos e metais base. O elemento B foi analisado por fusão de Na₂O₂ e

para algumas amostras foram analisados adicionalmente os elementos Au, Pt e Pd também por ICP-ES.

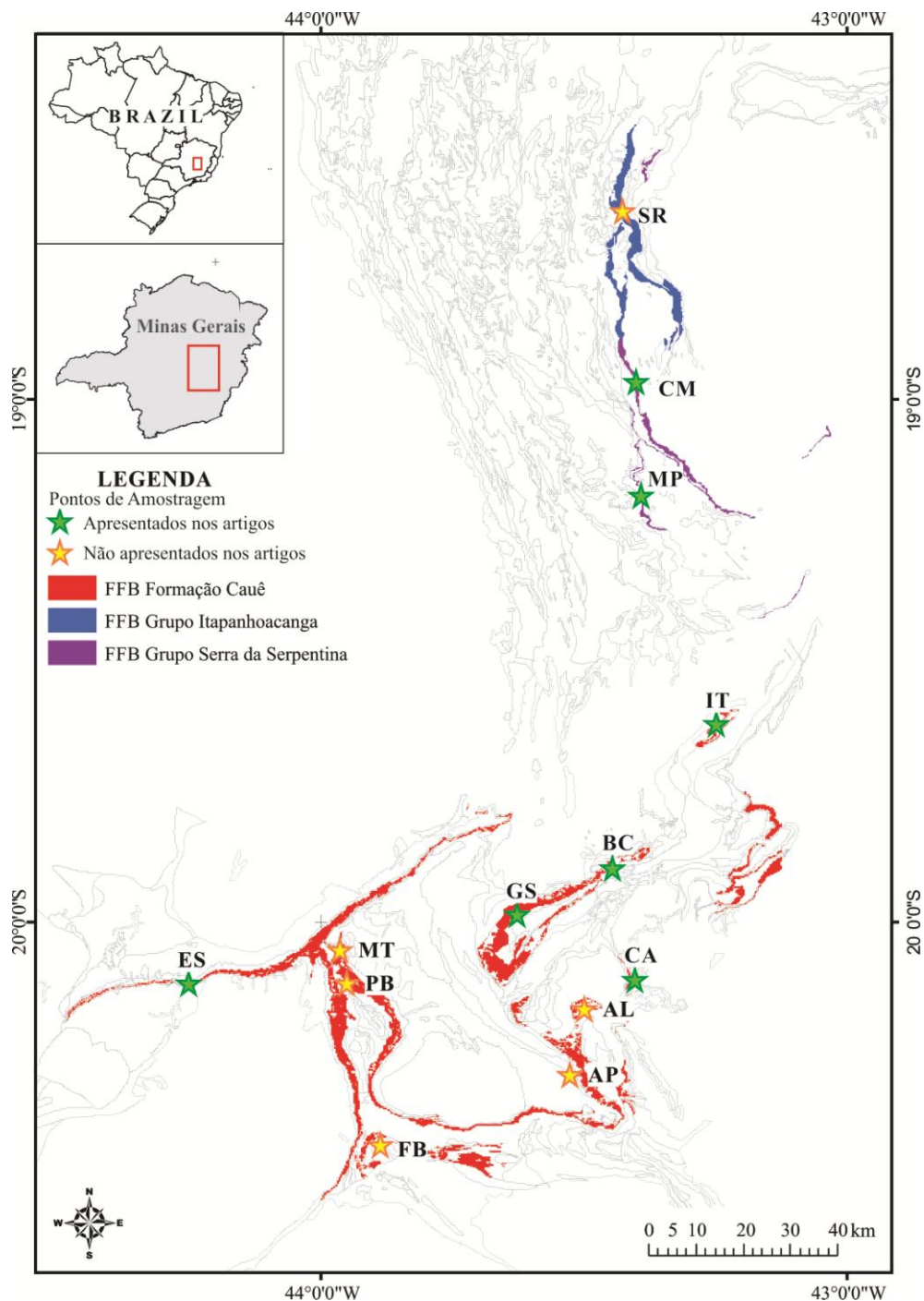


Figura 3.1. Mapa geológico simplificado da área de estudo, destacando as áreas de amostragem. ES – Esperança; MT – Mutuca; PB – Pau Branco; FB – Fábrica; AP – Antônio Pereira; AL – Alegria; CA – Catas Altas; GS – Gongo Soco; BC – Cocais; IT – Itabira; MP – Morro do Pilar; CM – Conceição do Mato Dentro; SR – Serro.

3.4. ESTUDOS DE INCLUSÕES FLUIDAS: Convencional e Infravermelho

Durante o crescimento ou fraturamento de um mineral, porções minúsculas do fluido no qual este processo esteja ocorrendo, podem ficar aprisionadas, dando origem a inclusões fluidas (IF). O estudo destas IF é de grande importância, pois permite determinar as condições físico-químicas reinantes durante a cristalização, recristalização ou em eventos metamórficos posteriores à formação dos minerais que as contêm (Roedder 1984).

A petrografia fornece informações importantes como a morfologia das IF e das fases sólidas nelas presentes, número de fases existentes, diferentes razões entre as fases, cores das fases líquidas e gasosas, índices de refração e birrefringência assim como informações relevantes sobre o modo de ocorrência das IF no mineral e a sua classificação genética em primárias, secundárias ou pseudo-secundárias podem ser obtidas (Roedder 1984, Fuzikawa 1985).

Durante a microtermometria, variações da temperatura provocam mudanças de fases nas substâncias presentes nas IF. O modo como estas mudanças ocorrem e suas respectivas temperaturas fornecem informações sobre a composição química e a densidade dos fluidos, e as temperaturas e pressões mínimas de formação das inclusões poderão também ser determinadas (Roedder 1984, Fuzikawa 1985).

Alguns minerais escuros, como a hematita, sob luz na frequência do visível, comportam-se como opacos em decorrência da absorção de fótons durante as transições eletrônicas nos orbitais moleculares. Essa opacidade com relação à luz visível é observada devido a transições *band-gap* que estão relacionadas à energia mínima necessária para excitar um elétron desde o estado atômico ligado na rede (banda de valência) até um estado livre (deslocado), tornando-o livre para se mover (Richards & Kerrich 1993). Quando a energia dos fótons é menor do que a mínima requerida para essa transição eletrônica, a luz não é absorvida e o mineral comporta-se como transparente nesse comprimento de onda (Richards & Kerrich 1993). O valor mínimo de energia para absorção (*band gap energy*) é atingido para alguns minerais na faixa do infravermelho, o que ocorre devido ao fato de a radiação infravermelha possuir menor energia do que a luz visível (Campbell *et al.* 1984). Isso possibilita que minerais originalmente opacos (sob luz visível) como a hematita se tornem transparentes, permitindo que estudos de IF sejam realizados.

Para os estudos de IF foram utilizados os microscópios petrográficos Leica DMRXP, Olympus BX51 e a platina microtermométrica Linkam FTIR600 do LIFM/CDTN. Durante os trabalhos de IF

no *Institute of Geochemistry and Petrology (IGP)* do *Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH-Zürich)* foram utilizados os microscópios Olympus BX60, Nikon Eclipse E600 Pol e a platina Linkam THMSG600.

Durante as análises de IF em hematitas foram utilizados os sistemas de infravermelho disponíveis no LIFM/CDTN que consistem dos mesmos microscópios e platina citados acima acoplados às câmeras específicas para infravermelho, Sony Exwave HAD B&W e QUICAM fast 1394 da QIMAGINGTM. Também foi utilizado, no período de pesquisa na Suíça, o sistema de infravermelho da Universidade de Genebra que consiste de um microscópio Olympus BX51 equipado com as câmeras de infravermelho Olympus XM10, Hamamatsu C2400 e uma platina microtermométrica Linkam.

Foram utilizados para calibração os padrões Syn Flinc[®]: NaCl-H₂O (temperatura eutética -21,2°C), KCl-H₂O (temperatura eutética -10,7°C), H₂O (ponto de fusão 0,0°C e crítico 374,1°C) e CO₂ (ponto de fusão -56,6°C).

No estudo microscópico e microtermométrico foram utilizadas como referência as metodologias de trabalho sugeridas por Roedder (1984), Shepperd *et al.* (1985), Richards & Kerrich (1993), Goldstein & Reynolds (1994), Lüders & Ziemann (1999), Bailly *et al.* (2000) e Rosière & Rios (2004).

3.5. ESPECTROSCOPIA RAMAN

A espectroscopia Raman é uma metodologia não destrutiva que pode ser utilizada para identificar qualitativa e quantitativamente os componentes moleculares em IF como sólidos, líquidos, gases e também íons poliatômicos. Permite a análise de amostras muito pequenas, de até 1µm, o que não é possível pelas metodologias convencionais (Frezzoti *et al.* 2012).

O efeito Raman foi previsto por Smekal (1923) e demonstrado por Raman (1928). Resumidamente, ele ocorre devido ao espalhamento inelástico da luz monocromática pela matéria em um de seus estados (sólido, líquido e gasoso) uma vez que a luz espalhada por cada composto contem radiações com frequências diferentes da luz incidente (Frezzoti *et al.* 2012).

O efeito ocorre porque uma molécula possui diferentes níveis de energia vibracionais e, quando a luz visível incide, esta induz a transições para níveis de energia virtuais, que não são estáveis e a luz é liberada instantaneamente como radiação de espalhamento (Frezzoti *et al.* 2012).

Esta técnica tem sido amplamente utilizada em estudos de IF para reconhecimento de fases gasosas (por exemplo, CO₂, CH₄, H₂S, N₂), sólidos de saturação e espécies iônicas (como SO₄²⁻, CO₃²⁻; Roedder & Bodnar 1997).

As análises de espectrometria Raman foram realizadas no Laboratório de Espectroscopia Raman do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). O espectrômetro Jobin Yvon/Horiba LABRAN-HR800 com laser He-NE (632,8nm) acoplado ao microscópio Olympus BX-41 foi utilizado para obtenção dos espectros Raman em IF. Os espectros foram adquiridos com uma potência de laser de 8mW incidindo numa área de 1µm² da amostra. O tempo de aquisição foi de 20s, e para aumentar a razão sinal/ruído, o número de aquisições foi de 30 vezes.

3.6. ESPECTROMETRIA DE MASSA COM PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO POR ABLAÇÃO À LASER (LA-ICP-MS)

A Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado por Ablação à Laser (LA-ICP-MS) é uma técnica para análise química de elementos traços em minerais e estudos composicionais de suas IF, pois combina a alta resolução espacial das sondas a laser com elevada sensibilidade, baixos limites de detecção e capacidade para análises multi-elementares (Allan *et al.* 2005).

Em resumo, a amostra é carregada através do laser e transportada pelo gás de arraste (argônio) para o interior do ICP onde os íons são criados e acelerados. Os íons entram então no espectrômetro de massa onde são separados por sua razão massa/carga, utilizando para isso quadrupolos, campos magnéticos, etc. Sendo finalmente encaminhados a um detector que converte os sinais obtidos em espectros (Longerich & Diegor 2001).

Os baixos *backgrounds* e a alta sensibilidade dos equipamentos de ICP-MS proporcionam limites de detecção muito baixos, de até 1 a 10µg.g⁻¹ em 40µm de ablação para alguns elementos (Günther *et al.* 1997).

Para análises de LA-ICP-MS em algumas amostras da Mina de Esperança (QF) foi utilizado o sistema disponível no Laboratório de Química e ICP instalado no Instituto de Geociências (IGC) da Universidade de São Paulo (USP). Esse sistema utiliza um espectrômetro ICP-MS quadrupolo, ELAN 6100 DRC, Perkin Elmer/SciexTM e um sistema de ablação a laser New Wave, modelo UP-213 A/F com super célula. O NIST-610 foi utilizado como padrão externo e como padrão de controle de qualidade foi utilizado o BHVO-2G que apresenta maior teor de FeO_(total) (~11,3%) do que o primeiro. Os resultados obtidos foram processados com o programa Glitter (Access Macquarie LTDA), desenvolvido por GEMOC National Key Center, Macquarie University.

O sistema de LA-ICP-MS, instalado no IGP do ETH-Zürich, foi utilizado durante as análises de IF em quartzo e especularita do QF e SEM. Este sistema consiste em um feixe de laser ArF excimer (Compex 110, Lambda Physik) de comprimento de onda na região do ultravioleta (193nm), uma objetiva comum UV-visível acoplada a um microscópio petrográfico com luz refletida e transmitida, combinado com um ICP-MS Elan 6100 DRC quadrupolo da Perkin Elmer (Günther *et al.* 1997, Heinrich *et al.* 2003).

A energia do laser variou de 20 a 30J/cm², a frequência do laser foi 10Hz, o diâmetro do feixe foi variável, He (1,1l/min) foi utilizado como gás de arraste e H₂ (5ml/min) como gás auxiliar. O *dwell time* foi de 10ms para quase todos os elementos, com exceção dos elementos S (12ms), Au (60ms), Cl (25ms) e Br (80ms) durante as análises de IF.

Como padrão externo foi utilizado o NIST610 em todas as análises e, para as análises de Cl/Br em IF de quartzo, um padrão adicional de escapolita (Sca-17) se fez necessário, uma vez que os teores desses elementos no NIST610 são muito baixos (Seo *et al.* 2011). Para tratamento dos dados obtidos foi utilizado o software SILLS versão 1.3.2 desenvolvido por Murray Allan (Universidade de Leeds, Reino Unido), Marcel Guillong e Dimitri Meier (ETH-Zurique, Suíça) seguindo a metodologia descrita em Guillong *et al.* (2008).

CAPÍTULO 4. CARACTERÍSTICAS DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS E MINÉRIOS

4.1. MINERALOGIA

De maneira geral o principal óxido de ferro constituinte das rochas estudadas é a hematita que pode ser encontrada em três variedades distintas: granoblástica (granular), microlamelar e especularita (Figura 4.1). Relictos de kenomagnetita também são aparentes, indicando que houve oxidação de magnetita previamente existente para formação de martita. A Figura 4.1 ilustra a sequência de formação das diferentes gerações de óxido de ferro e a descrição de todas as amostras estudadas está disposta no Anexo 1.

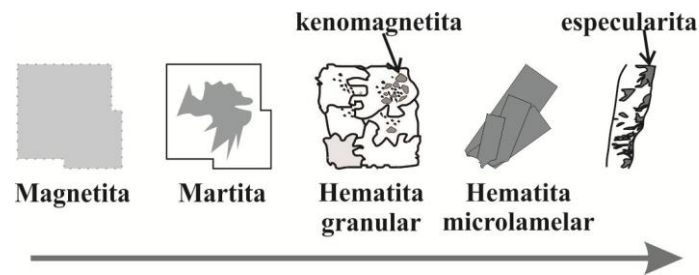


Figura 4.1. Sequência genética de formação dos diferentes tipos de óxidos de ferro encontrados nas amostras estudadas.

4.1.1. Características dos Óxidos de Ferro nas Rochas dos Depósitos de Ferro do Supergrupo Minas, QF

Dentre os depósitos do oeste do QF, somente na mina de Esperança (ES) foi possível amostrar os itabiritos dolomítico (ID – Figura 4.2) e quartzoso (QI – Figura 4.3) que são as rochas encaixantes do minério de alto teor. O ID é cortado por veios hidrotermais milimétricos e centimétricos compostos predominantemente de quartzo, carbonato e especularita (Figuras 4.2a e 4.2b). O QI é cortado por veios milimétricos de quartzo e talco (Figura 4.3a). Em ambos os tipos de itabirito, o principal óxido de ferro é a hematita granoblástica com relictos de kenomagnetita (Figuras 4.2c, 4.2d, 4.3b, 4.3c, 4.3d).

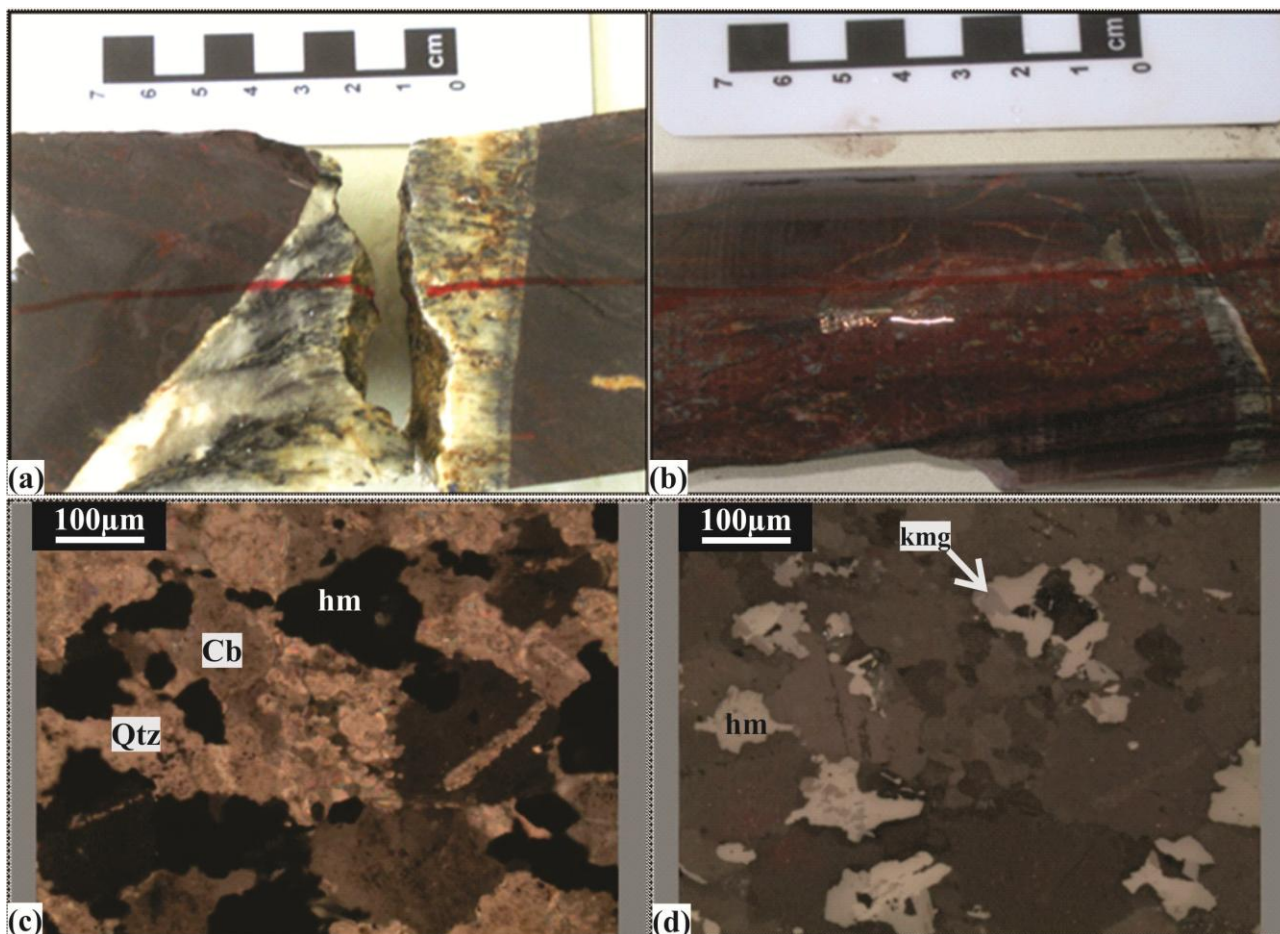


Figura 4.2. (a) e (b) Fotografia do itabirito dolomítico cortado por veio fibroso, depósito de Esperança, furo de sondagem F24, profundidade 249m. (a) Amostra ES02. (b) Amostra ES08. (c e d) Fotomicrografias ilustrando o aspecto textural das amostras em lâmina petrográfica. (c) Detalhe dentro do bandamento do ID mostrando grãos de hematita/martita, dolomita e quartzo. Luz transmitida e nicóis paralelos, amostra ES02. (d) Detalhe do bandamento do ID ressaltando a presença de relictos de kenomagnetita nos cristais de hematita/martita, luz refletida e nicóis cruzados, amostra ES02. hm = hematita/martita; kmg = kenomagnetita; Qtz = quartzo; Cb = carbonato.

Ainda em Esperança, foram descritos dois tipos distintos de minério de ferro de alto teor, um friável e brechado (Figura 4.4) e o outro compacto (Figura 4.5). O minério friável e brechado possui clastos de hematita, martita e especularita e, na matriz, hematita microlamelar e hidróxidos de ferro (Figura 4.4).

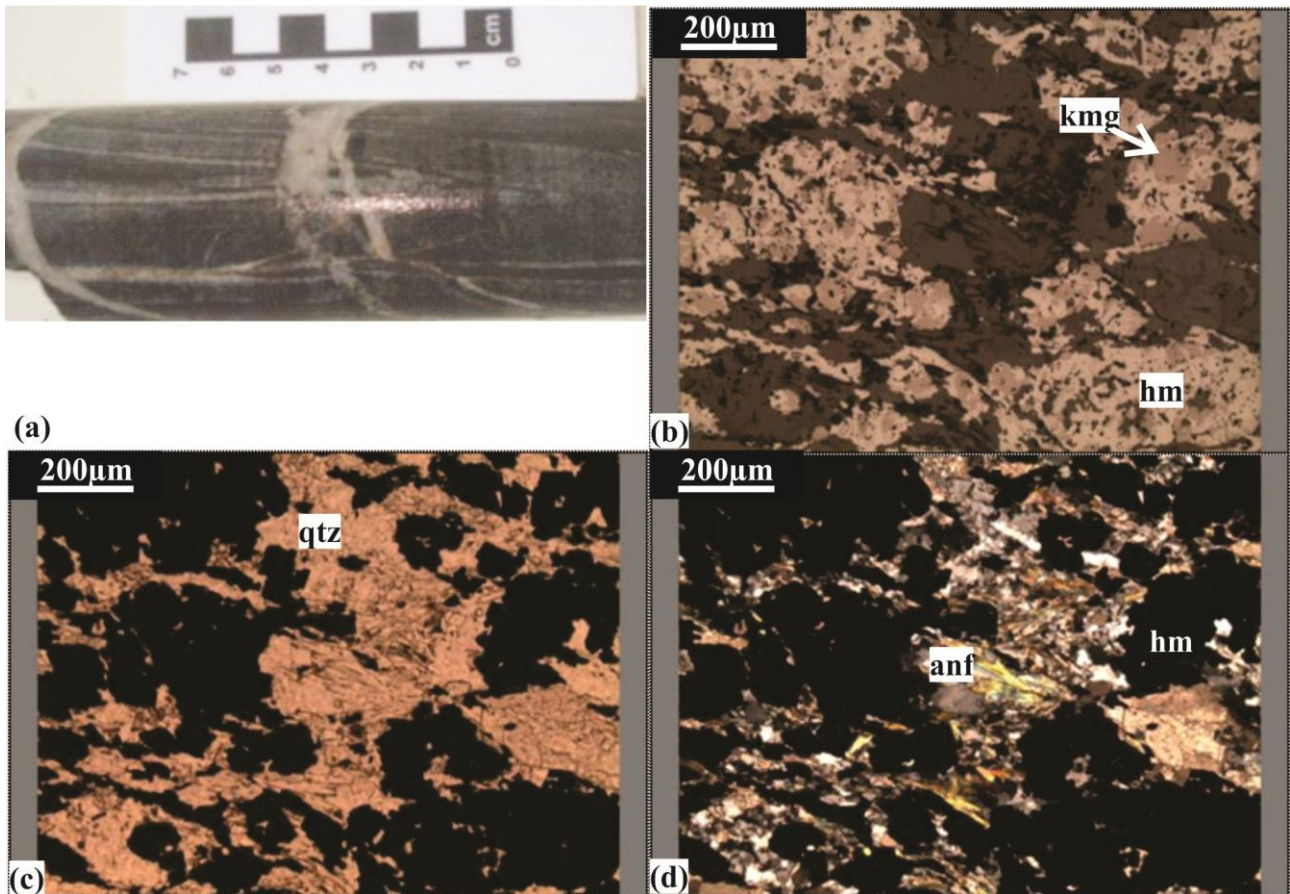


Figura 4.3. (a) Itabirito quartzoso dobrado e cortado por veios de talco e quartzo, mina de Esperança, amostra ES07. (b, c e d) Fotomicrografias da mesma amostra mostrando a hematita com relictos de kenomagnetita, quartzo e anfíbólio. (b) Luz refletida e nicóis cruzados, (c) Luz transmitida e nicóis paralelos e (d) Luz transmitida e nicóis cruzados. kmg = kenomagnetita; hm = hematita; qtz = quartzo; anf = anfíbólio.

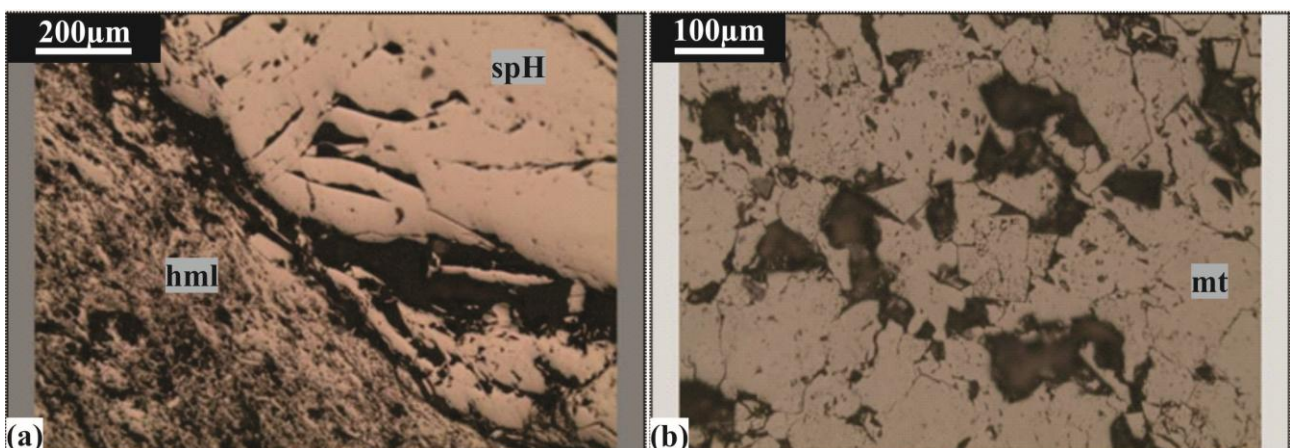


Figura 4.4. (a e b) Fotomicrografias do minério friável e brechado da mina de Esperança ressaltando suas diferentes texturas, ambas sob luz refletida e nicóis paralelos. (a) Clasto de especularita em contato com matriz fina de hematita microlamelar, ES03. (b) Cristais granoblásticos subédricos de martita, ES03. hml = hematita microlamelar; mt = martita; spH = especularita.

O minério compacto é uma rocha composta principalmente de martita com relictos de kenomagnetita (Figura 4.5). Duas amostras desse tipo de minério foram estudadas no depósito de Esperança: (i) amostra ES06, além de martita, apresenta localmente cristais de hematita microlamelar e especularita disseminados, e cristais grossos de especularita são encontrados preenchendo *vugs* (Figuras 4.5a e 4.5b); (ii) amostra ES09, é composta por cristais de hematita/martita granoblástica que por vezes apresentam relictos de kenomagnetita e é cortada por veio de quartzo com especularita (Figuras 4.5c e 4.5d).

No depósito de Pau Branco (PB), também no oeste do QF, minérios de alto teor compacto e friável com características petrográficas similares aos de Esperança foram observados (Figura 4.6a). Também se observam veios de quartzo-especularita cortando essas rochas e lentes de especularita ocorrem preenchendo fraturas e *vugs* (Figura 4.6b).

Na mina de Alegria (AL), região leste do QF, foram amostrados itabiritos quartzosos (Figura 4.7a) e minérios de ferro de alto teor compacto, friável e xistoso. Magnetita martitizada é o principal, quando não o único, óxido presente no itabirito quartzoso desta região.

Os minérios de alto teor compacto e friável/brechado também são petrograficamente semelhantes àqueles observados no depósito de Esperança. O minério de alto teor xistoso por sua vez é uma rocha composta principalmente por hematita microlamelar (especularita fina) marcando a xistosidade da rocha (Figura 4.7b).

Em Catas Altas (CA), também no leste do QF, foram coletadas amostras de minérios de ferro de alto teor compactos semelhantes aos demais descritos anteriormente e, que são cortados por veios de quartzo-especularita e/ou possuem cristais de especularita preenchendo seus planos de fratura e *vugs* (Figura 4.8).

4.1.1.1. *Especularita e Veios Hidrotermais*

Em Esperança, veios discordantes de quartzo-especularita-carbonatos são encontrados cortando o itabirito dolomítico (Figura 4.9). Neles os cristais são em geral de granulação média a grossa, alongados perpendicularmente a parede do veio. O carbonato é o mineral predominante e ocorre normalmente em cristais de granulação grossa. O quartzo aparece na maioria das vezes no centro do veio e associado à especularita. A especularita é fibrosa e cristaliza sintaxialmente perpendicular à parede do veio aparentando acompanhar a banda de óxido do itabirito e penetrando

no veio. Observam-se também cristais de granulação grossa de clorita principalmente no contato entre o veio e a rocha.

Também em Esperança, a amostra ES09 de minério compacto é cortada por veio preenchido por cristais fibrosos de especularita com crescimento sintaxial e quartzo. O contato entre o veio e o minério é brusco, porém os cristais sintaxiais de especularita aparentam crescer a partir da martita do minério (Figura 4.10).

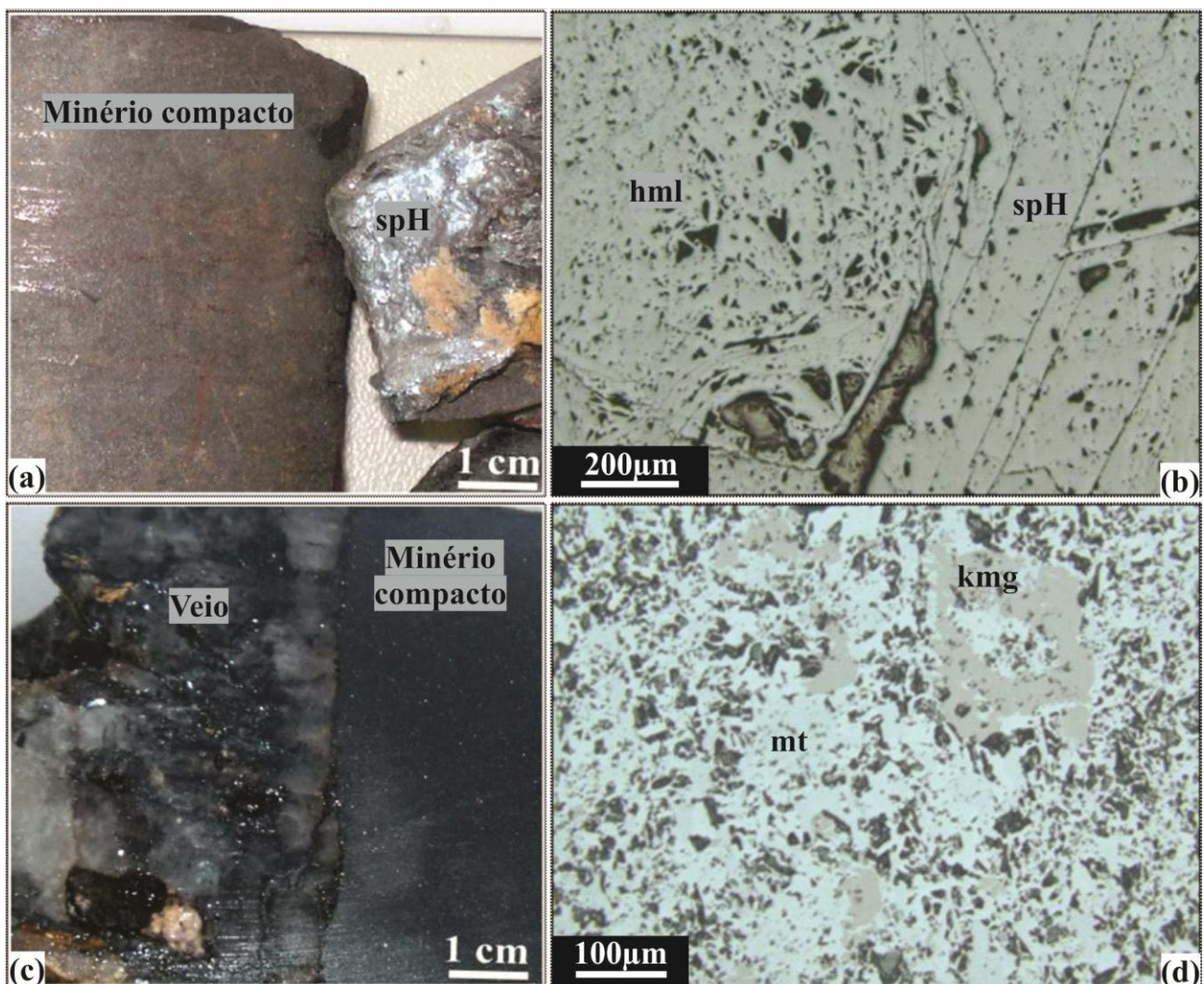


Figura 4.5. (a e c) Imagens das amostras dos minérios compactos de Esperança. (a) Amostra ES06, minério compacto com especularita preenchendo *vugs*, furo de sondagem F24, Profundidade 70 m. (c) Amostra ES09, minério compacto cortado por veio de quartzo com especularita. (b e d) Fotomicrografias mostrando as principais texturas das amostras de minério compacto de Esperança. Ambas as imagens com luz refletida e nicóis paralelos. (b) Amostra ES06 da mina de Esperança mostrando com detalhe os agregados de hematita microlamelar e especularita. (d) Amostra ES09 mostrando a textura dos cristais de martita-kenomagnetita. hml = hematita microlamelar; mt = martita; spH = especularita; kmg = kenomagnetita.



Figura 4.6. (a) Afloramento na mina de Pau Branco mostrando corpo de minério compacto dentro do minério friável. (b) Detalhe mostrando lente de especularita dentro do corpo de minério de Pau Branco.

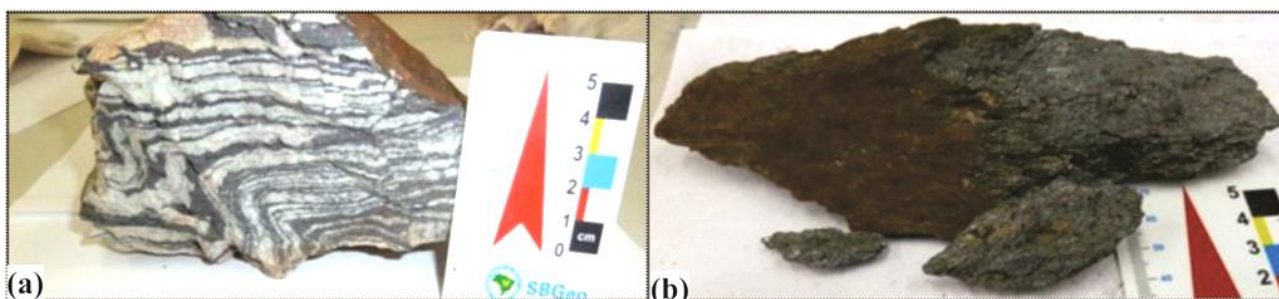


Figura 4.7. (a) Itabirito quartzoso dobrado AL01 da mina de Alegria (b) Minério de ferro xistoso, especularítico, amostra AL03, mina de Alegria.

Nos depósitos de Fábrica, Pau Branco, Catas Altas e Alegria, veios de quartzo-especularita que cortam o minério de ferro de alto teor foram amostrados (Figura 4.8). Esses veios são em geral semelhantes entre si, o quartzo é leitoso e bastante fraturado, e a especularita de granulação grossa a muito grossa. Nenhum outro mineral é observado e o contato com o minério é sempre brusco. Em Mutuca veios semelhantes são observados cortando o itabirito quartzoso.

Além de serem encontrados nos veios, cristais bem desenvolvidos de especularita ocorrem em lentes (Figura 4.6b) e/ou preenchendo planos de fraturas e *vugs* (Figura 4.8) dentro dos minérios de alto teor nos depósitos de Esperança, Pau Branco, Casa de Pedra e Catas Altas.

4.1.2. Características dos Óxidos de Ferro nas Rochas dos Depósitos de Ferro do Grupo Serra da Serpentina, SEM

As rochas amostradas do Grupo Serra da Serpentina são semelhantes petrograficamente às daquelas do Supergrupo Minas. O quartzo itabirito (QI) é uma rocha bandada, com intercalações de quartzo e hematita. A amostra de QI de Serro (SR01) possui planos preenchidos por cristais de granulação grossa de especularita que parecem marcar o sentido da foliação (Figura 4.11).

O minério de alto teor xistoso encontrado em Morro do Pilar (MP), no Morro da Ferrugem (FE) e em Conceição do Mato Dentro (CM; Figura 4.12) é composto principalmente por hematita microlamelar (especularita fina) marcando a xistosidade da rocha. Em Morro do Pilar o minério de alto teor friável é composto predominantemente por hematita microlamelar e localmente apresenta cristais de especularita. Minério de alto teor compacto foi amostrado também em Morro do Pilar sendo uma rocha composta principalmente por hematita granular e microlamelar. A amostra MP07 possui relictos das bandas quartzosas e a MP09 possui cristais de especularita preenchendo planos de fratura (Figura 4.13).

4.1.2.1. Especularita e Veios Hidrotermais

O QI de Morro do Pilar é cortado por veios de quartzo leitoso sem especularita e muito fraturado (Figura 4.14a). Entretanto, os minérios de alto teor compacto de Morro do Pilar (Figuras 4.14b e 4.14c) e o xistoso de Conceição do Mato Dentro (Figura 4.12c) são cortados por veios muito fraturados contendo quartzo leitoso e cristais de especularita de granulação grossa. Cristais de especularita de granulação grossa são encontrados também preenchendo zonas de fraqueza dos minérios xistoso e compacto em Morro do Pilar (Figura 4.13b). Todos esses veios são concordantes com a foliação das rochas.

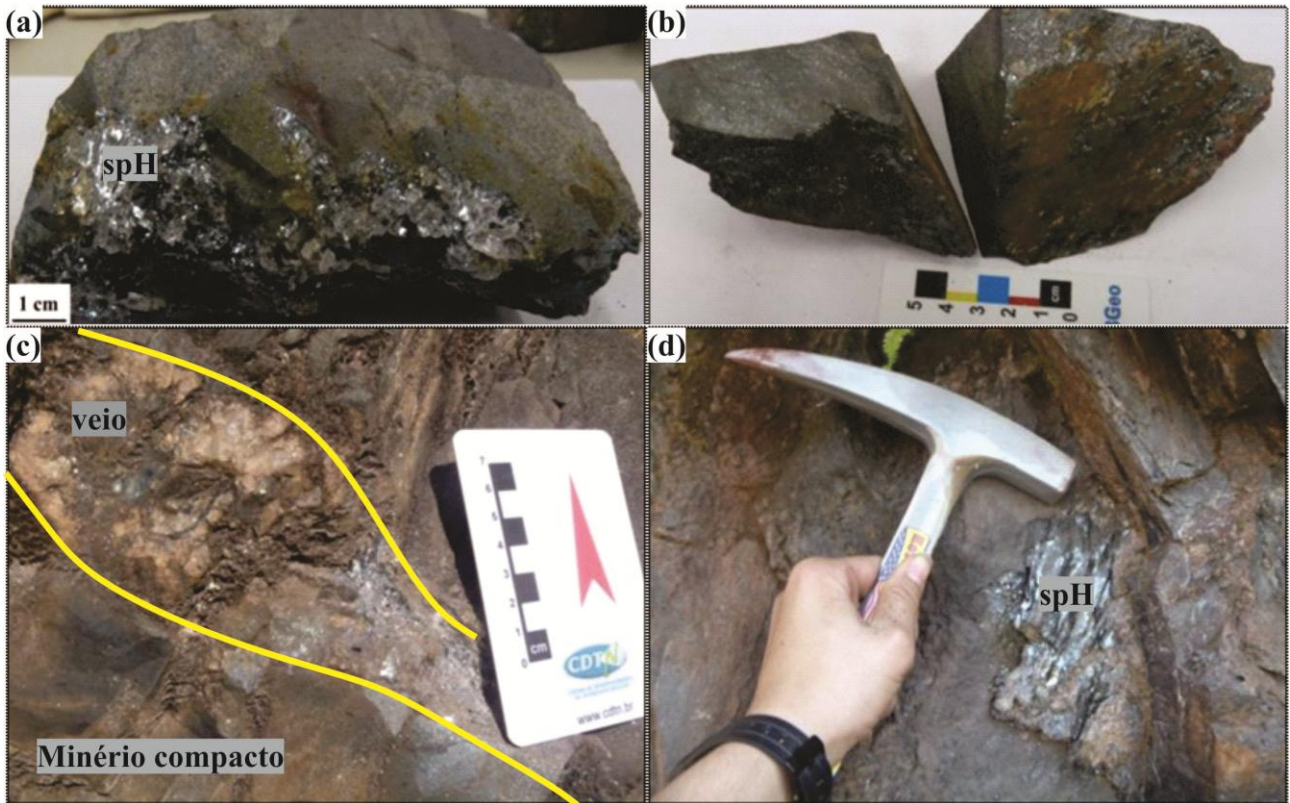


Figura 4.8. (a) Amostra CA02, minério compacto que apresenta bandamento incipiente com relictos de quartzo, cortada por veio de quartzo com especularita. (b) Amostra CA06, minério compacto de granulação fina com especularita em plano de fratura. (c) Detalhe em afloramento de veio de quartzo-especularita cortando o minério compacto de (a). (d) Detalhe em afloramento de cristais de especularita preenchendo plano de fratura no minério compacto (b). Todas as amostras de Catas Altas.

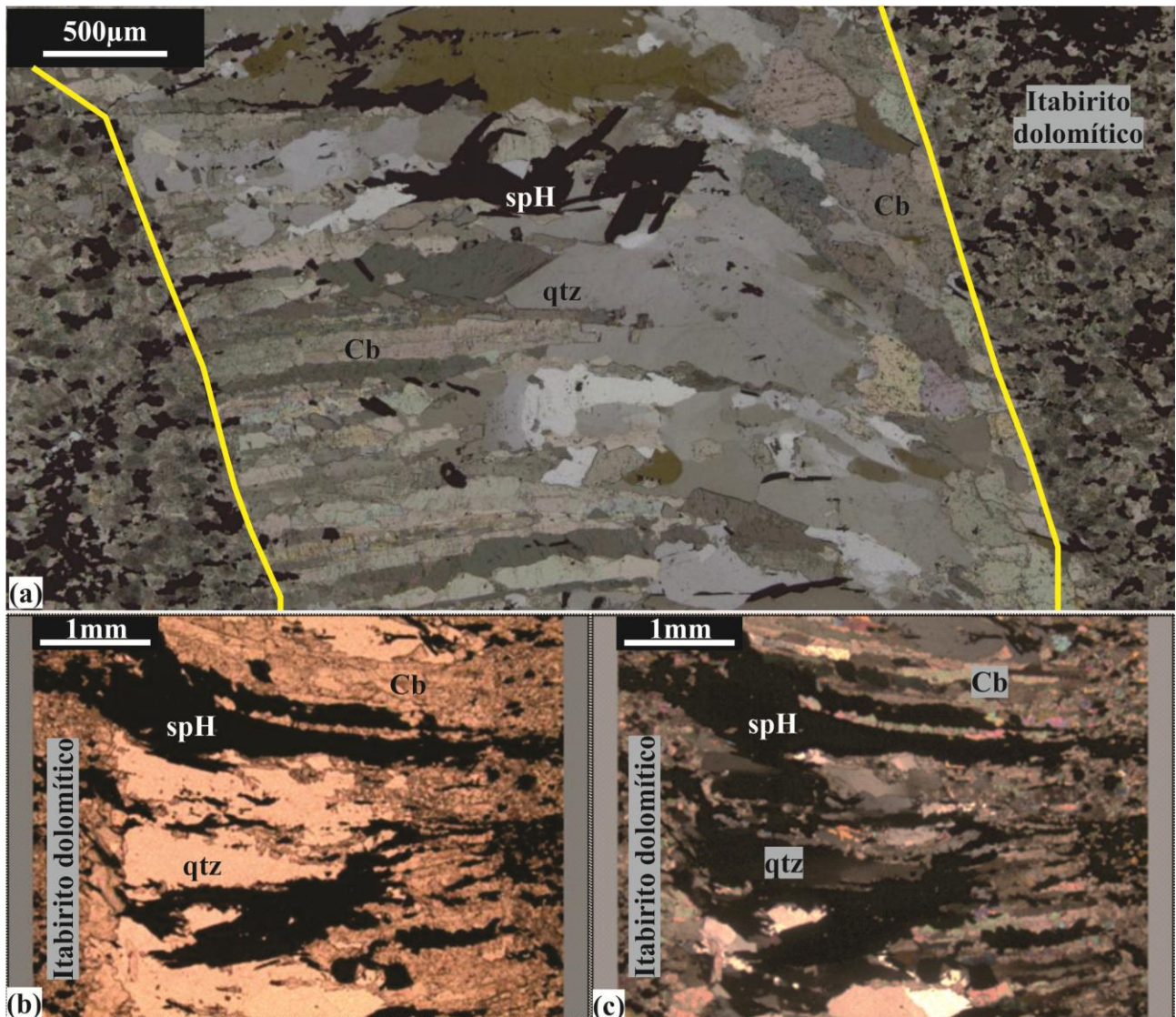


Figura 4.9. (a) Fotomicrografia panorâmica da amostra ES02 onde pode ser observado o contato do veio de quartzo-especularita-carbonatos com a rocha (ID). (b e c) Detalhe do veio da amostra ES08 mostrando a continuidade dos cristais sintaxiais de especularita para dentro do veio, (b) luz transmitida e nicóis paralelos. (c) luz transmitida e nicóis cruzados. spH = especularita; Cb = carbonatos; qtz = quartzo.

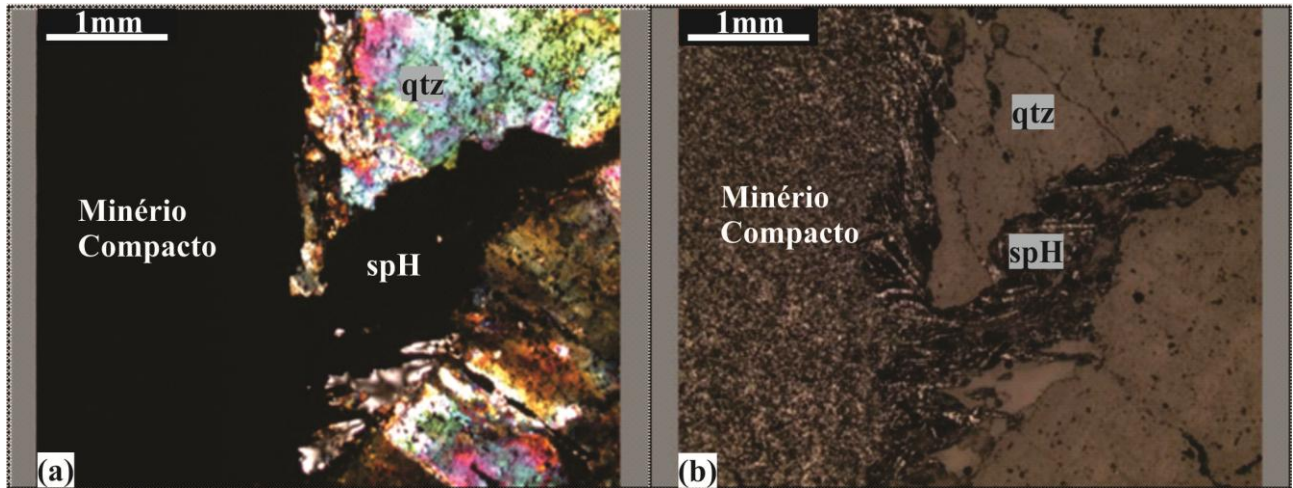


Figura 4.10. Fotomicrografias mostrando a relação de contato entre o minério compacto ES09 com o veio de specularita-quartzo. (a) Luz transmitida e nicóis cruzados. (b) Luz refletida e nicóis paralelos. spH = specularita; qtz = quartzo.



Figura 4.11. Imagem da amostra de itabirito quartzoso de Serro, SR01. (a) Observam-se as bandas da rocha truncadas por faixas de specularita. (b) Observação da superfície da amostra com destaque para os cristais de specularita de granulação grossa.

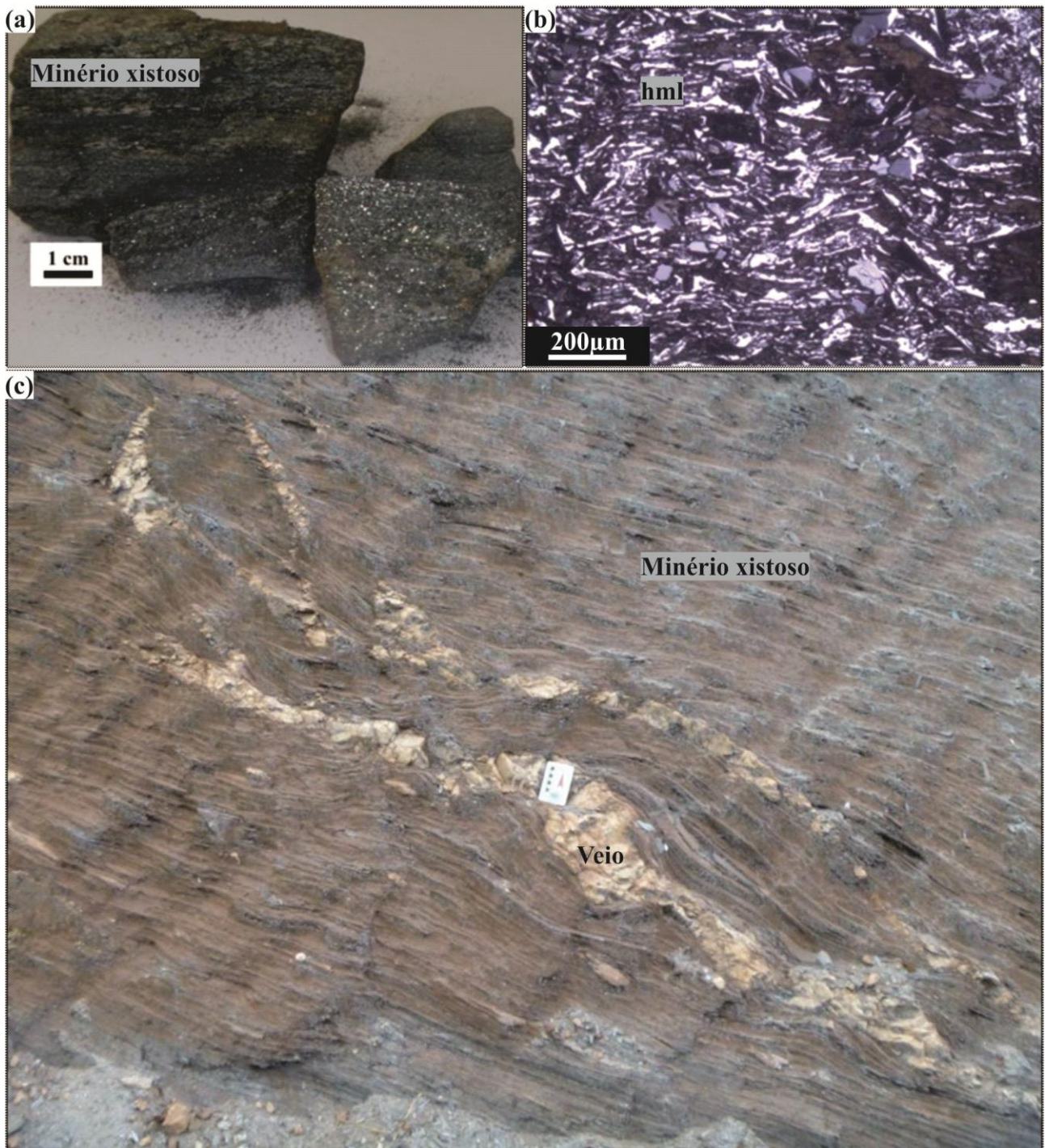


Figura 4.12. (a) Minério de ferro xistoso de Morro do Pilar, MP06. (b) Fotomicrografia mostrando a textura granoblástica e lepidoblástica do minério xistoso, amostra FE01 do Morro da Ferrugem. (c) Afloramento de minério xistoso cortado por veios boudinados de quartzo com especularita concordante com a foliação, corte de estrada Conceição do Mato Dentro.

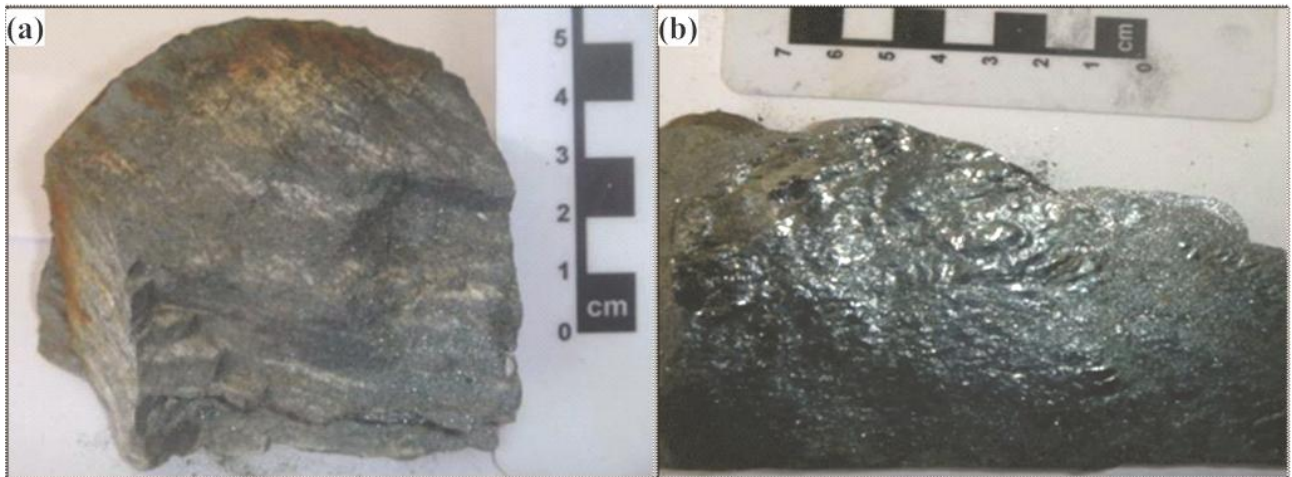


Figura 4.13. (a) Minério compacto de Morro do Pilar apresentando relictos de quartzo e bandamento, amostra MP07. (b) Detalhe dos cristais de especularita em plano de fratura no minério compacto da amostra MP09 de Morro do Pilar.



Figura 4.14. (a) Afloramento de itabirito quartzoso cortado por veio de quartzo, Morro do Pilar. (b) Afloramento de minério de ferro de alto teor compacto cortado por veio de quartzo leitoso com especularita, Morro do Pilar. (c) Amostra do veio de quartzo-especularita mostrado em (b).

4.1.3. Características dos Óxidos de Ferro nas Rochas dos Depósitos do Tipo Jacutinga, QF

Na região de Barão de Cocais, próximo à mina de Brucutu, a amostragem foi realizada em uma galeria contendo uma zona de cisalhamento de onde, no passado, foi extraído o Au-PGE da Jacutinga (Figura 4.15). A rocha ferrífera que constitui a zona de cisalhamento está encaixada em um itabirito quartzoso e faz contato direto em uma das suas bordas com uma rocha aqui denominada hematita-magnetito que possui forte magnetismo. Todas estas litologias são cortadas por veios de quartzo leitoso com especularita (Figura 4.15).



Figura 4.15. Imagem da zona de cisalhamento de Barão de Cocais mostrando o contato com o minério compacto e detalhes dos veios de quartzo e especularita que a cortam.

O hematita-magnetito apresenta bandamento preservado e é composto basicamente por kenomagnetita, hematita/martita e hematita microlamelar (Figura 4.16), possuindo uma coloração avermelhada característica da presença de hidróxidos de ferro como goethita e limonita. É granoblástica e apresenta alguns cristais subédricos preservando a estrutura da magnetita.

Observam-se sinais de martitização e também cristais de limonita e goethita preenchendo interstícios da rocha.

A rocha característica da zona de cisalhamento é uma rocha ferrífera e se encaixa na definição aqui utilizada para minério de ferro de alto teor, pois é constituída basicamente de martita/kenomagnetita e hematita especular de granulação fina a média (Figura 4.17). Essa rocha é de coloração cinza escura e também preserva o bandamento, podendo estar dobrada em algumas regiões. Em alguns planos de foliação apresenta cristais de especularita de granulação grossa e é cortada por veios de quartzo com especularita. Sua textura é granoblástica e lepidoblástica possuindo cristais de especularita intercrescendo ao redor dos cristais de kenomagnetita/martita (Figura 4.17).

Uma amostra de Jacutinga foi coletada na mina de Conceição. É uma rocha muito friável que contem predominantemente hematita microlamelar, caulinita e talco (Figura 4.18). Goethita e quartzo podem estar associados. Alguns cristais de martita ainda preservam a estrutura da magnetita com sinais de inclusões minerais diminutas no núcleo. Os minerais transparentes são principalmente caulinita e quartzo sendo a foliação marcada pela orientação dos cristais de especularita e caulinita. Em algumas porções da lâmina observa-se uma tonalidade avermelhada devido à ocorrência de hidróxidos de Fe.

Em Gongo Soco foram amostrados fragmentos de veio de quartzo que corta o itabirito com cristais finos de especularita e Au visível (Figura 4.19). Nesta amostra observa-se associação de Au com especularita, quartzo, Pd e oxi-hidróxidos de Mn-Pb com mercúrio (Figuras 4.19b, 4.19c e 4.19d). O fragmento foi recuperado na planta de minério de ferro por concentrador gravimétrico Knelson.

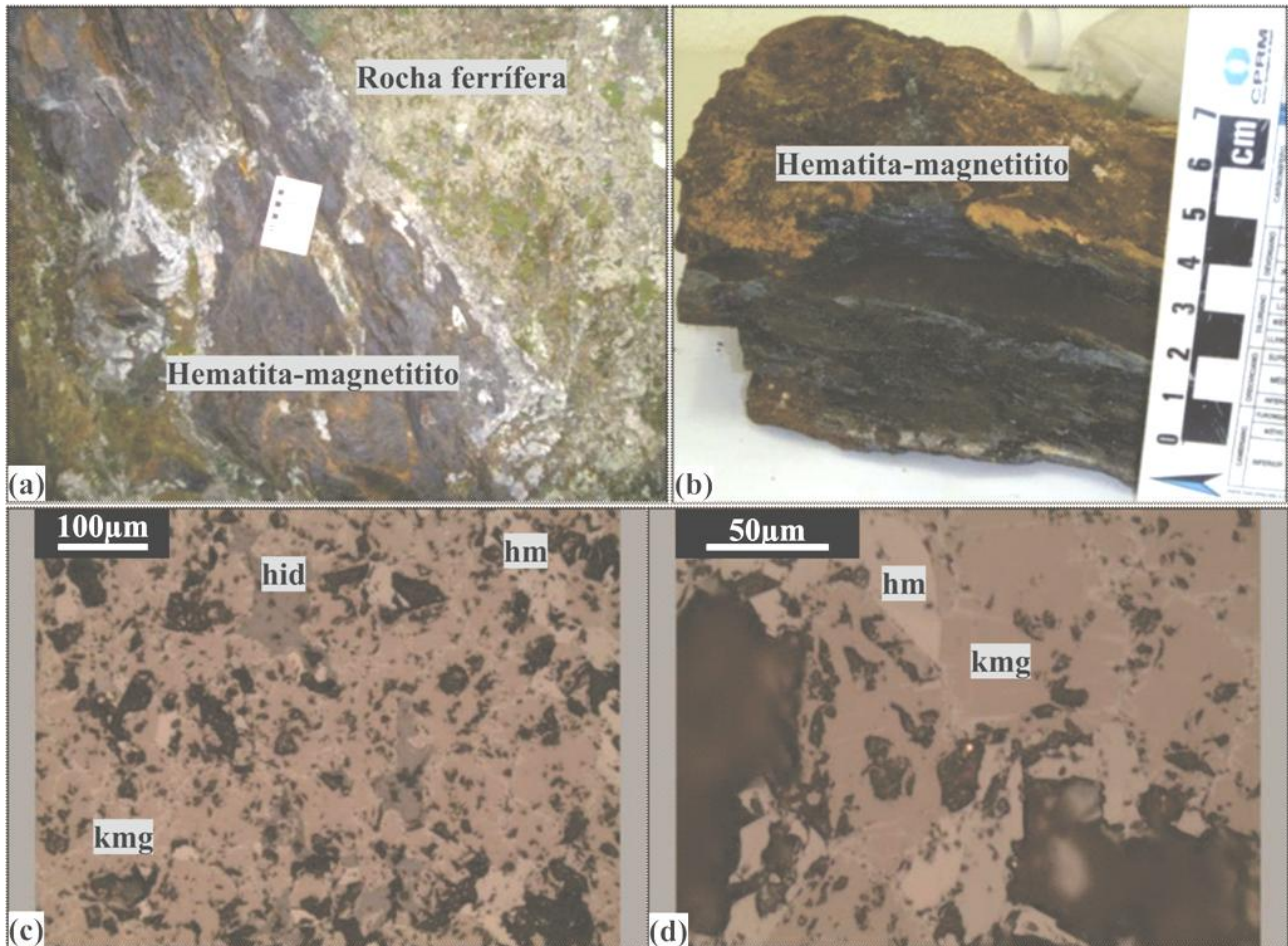


Figura 4.16. (a) Detalhe do contato entre o hematita-magnetitito e a zona de cisalhamento. (b) Aspecto macroscópico do hematita-magnetitito de Barão de Cocais, amostra BC06. (c e d) Fotomicrografias mostrando a principal textura do hematita-magnetitito. (c) Mostra que a rocha é principalmente composta por magnetita/kenomagnetita com cristais de hematita e de hidróxido nos interstícios. (d) Detalhe mostrando os sinais de martitização da magnetita para formar hematita. hid = hidróxido de ferro; hm = hematita; kmg = kenomagnetita.

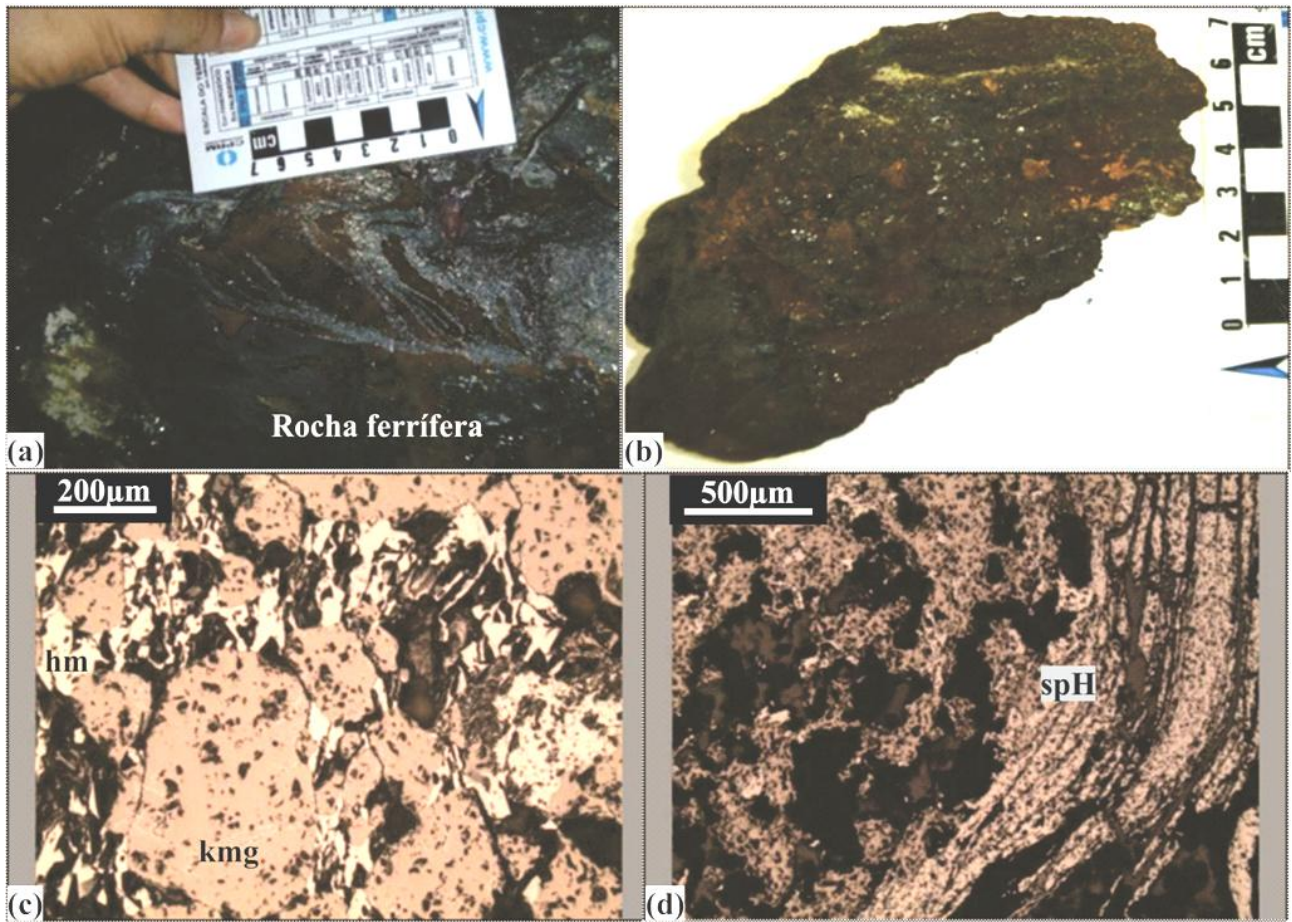


Figura 4.17. (a) Aspecto macroscópico da rocha ferrífera da zona de cisalhamento de Barão de Cocais onde o Au-PGE foi extraído. (b) Amostra de mão da rocha. (c e d) Fotomicrografias da rocha ferrífera encontrada na zona de cisalhamento em Cocais, ambas com luz refletida e nicóis paralelos. hm = hematita; kmg = kenomagnetita; spH = specularita.

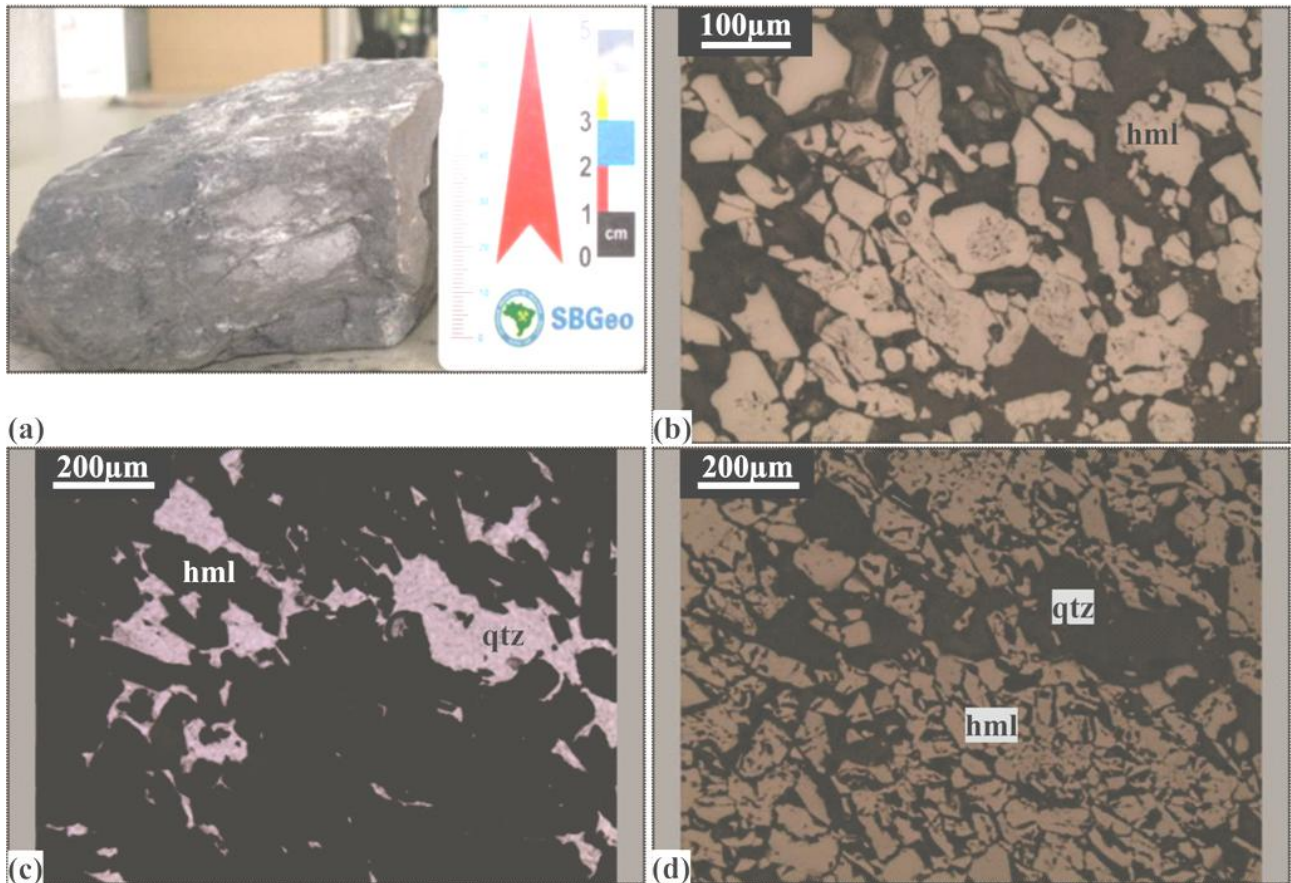


Figura 4.18. (a) Aspecto macroscópico da amostra de Jacutinga da mina de Conceição (Itabira). (b a d) Fotomicrografias da mesma amostra mostrando seus principais aspectos texturais. (b, d) Luz refletida e nicóis paralelos. (c) Luz transmitida e nicóis paralelos. hml = hematita microlamelar; qtz = quartzo.

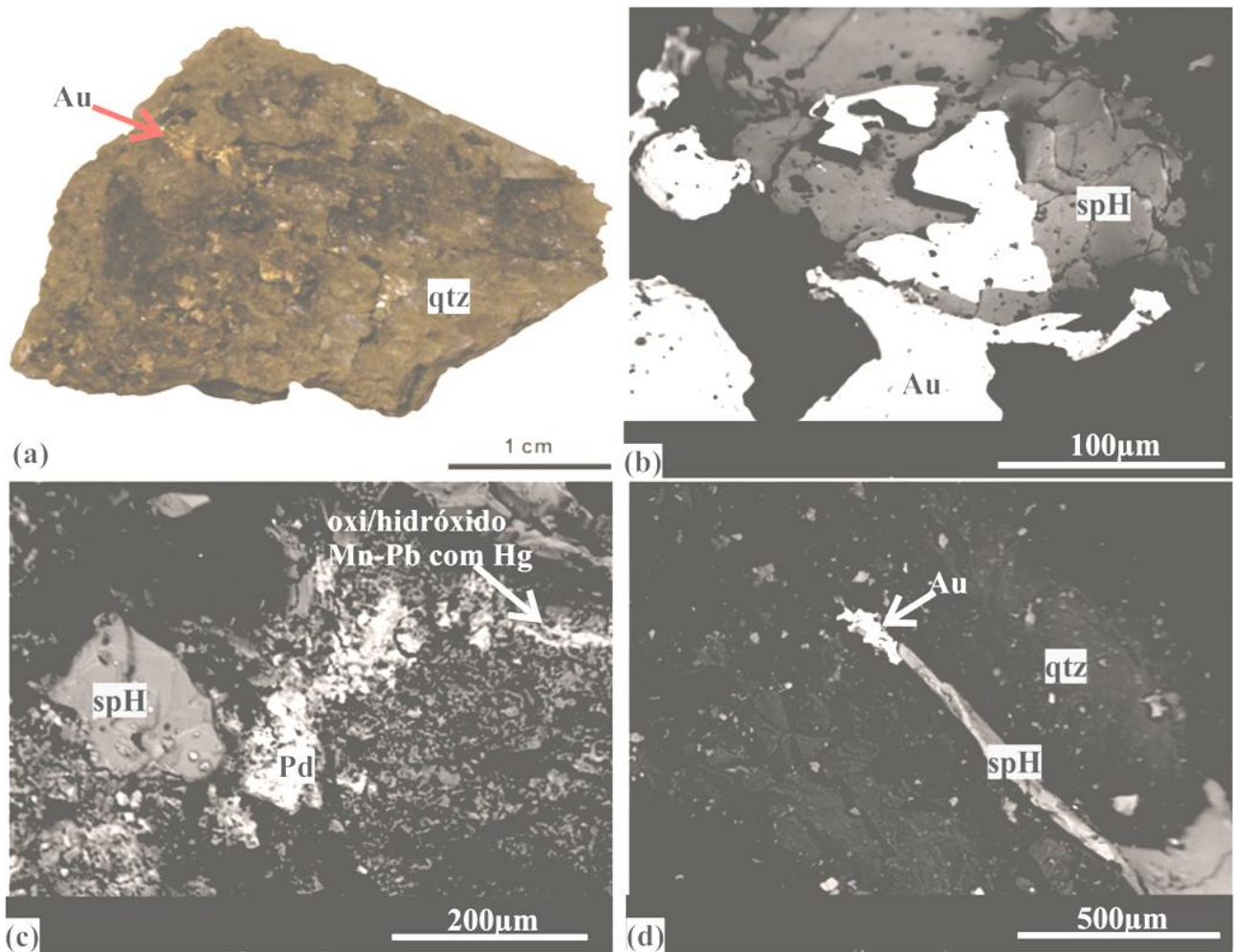


Figura 4.19. (a) Fragmento de quartzo de veio com Au visível extraído da mina de Gongo Soco (QF). (b-d) Imagens de elétrons retroespalhados mostrando com detalhe a associação mineral encontrada no veio. spH = especularita; qtz = quartzo.

4.2. CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS DAS ROCHAS ANALISADAS

4.2.1. Elementos Maiores

Três amostras de itabirito, sendo uma de QI do depósito de Alegria (AL01), uma de QI (ES07) e outra de ID (ES08) do depósito de Esperança e pertencentes ao Supergrupo Minas (QF), foram analisadas (Figura 4.20a). Os dados de elementos maiores destas três amostras de itabirito e seus respectivos limites de detecção (LD) são encontrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Geoquímica dos elementos maiores para amostras selecionadas de quartzo itabirito e itabirito dolomítico do QF.

%p/p	LD	Itabirito Quartzoso		Itabirito Dolomítico
		AL01	ES07	ES08
SiO ₂	0,01	58,90	68,19	2,31
Al ₂ O ₃	0,01	0,37	<LD	0,69
Fe ₂ O ₃	0,04	40,04	22,75	42,04
MgO	0,01	0,06	2,84	10,94
CaO	0,01	0,03	2,46	16,49
Na ₂ O	0,01	<LD	<LD	<LD
K ₂ O	0,01	<LD	<LD	<LD
TiO ₂	0,01	0,02	<LD	0,03
P ₂ O ₅	0,01	0,03	0,10	0,11
MnO	0,01	0,19	0,10	0,62
Cr ₂ O ₃	0,002	0,003	0,004	0,003
LOI	-5,10	0,30	3,50	26,50
Total	0,01	99,94	99,90	99,76
TOT/C	0,02	<LD	1,03	7,91
TOT/S	0,02	0,04	0,06	<LD

LD = Limite de Detecção.

A amostra AL01 possui, em termos de elementos maiores, uma química de rocha total muito similar à reportada por Spier *et al.* (2007) para amostras de quartzo itabirito no QF, com 58,9% de SiO₂ e 40,04% de Fe₂O₃ sendo que os demais óxidos contribuem juntos com aproximadamente 0,7%.

A amostra ES07, por sua vez, apresenta um conteúdo em sílica um pouco mais elevado (68,19%) e de Fe_2O_3 mais baixo (22,75%) além de CaO e MgO mais significativos (2,46% e 2,84% respectivamente). A grande quantidade de sílica juntamente com os óxidos de cálcio e magnésio é indicativa da composição petrograficamente observada dessa rocha, uma vez que esta possui quantidade significativa de anfibólio (possivelmente tremolita). A perda por ignição (LOI), que é de 0,30% para AL01 e de 3,50% para ES07, também reforça esta afirmação.

A composição do itabirito dolomítico da amostra ES08 também é similar a da literatura (Spier *et al.* 2007) com 16,49% CaO, 10,94% MgO, 42,04% Fe_2O_3 , 2,31% SiO_2 , 0,69% Al_2O_3 e 0,62% MnO. Na_2O , K_2O , P_2O_5 , TiO_2 , e Cr_2O_3 são menores do que 0.5%. O LOI, entretanto, é elevado, 26,50% e o C total é de 7,91.

Foram analisadas amostras de minério de ferro de alto teor do Supergrupo Minas e do Grupo Serra da Serpentina (Figuras 4.20c, 4.20d e 4.20e). Essas rochas foram divididas em três grupos de acordo com suas características texturais em minério compacto, xistoso e friável. Outras três amostras associadas à mineralização de Au-PGE do QF e que possuem alto teor de ferro estão aqui descritas (Figura 4.20b). Os resultados obtidos para todas essas amostras assim como os respectivos LD encontram-se detalhados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

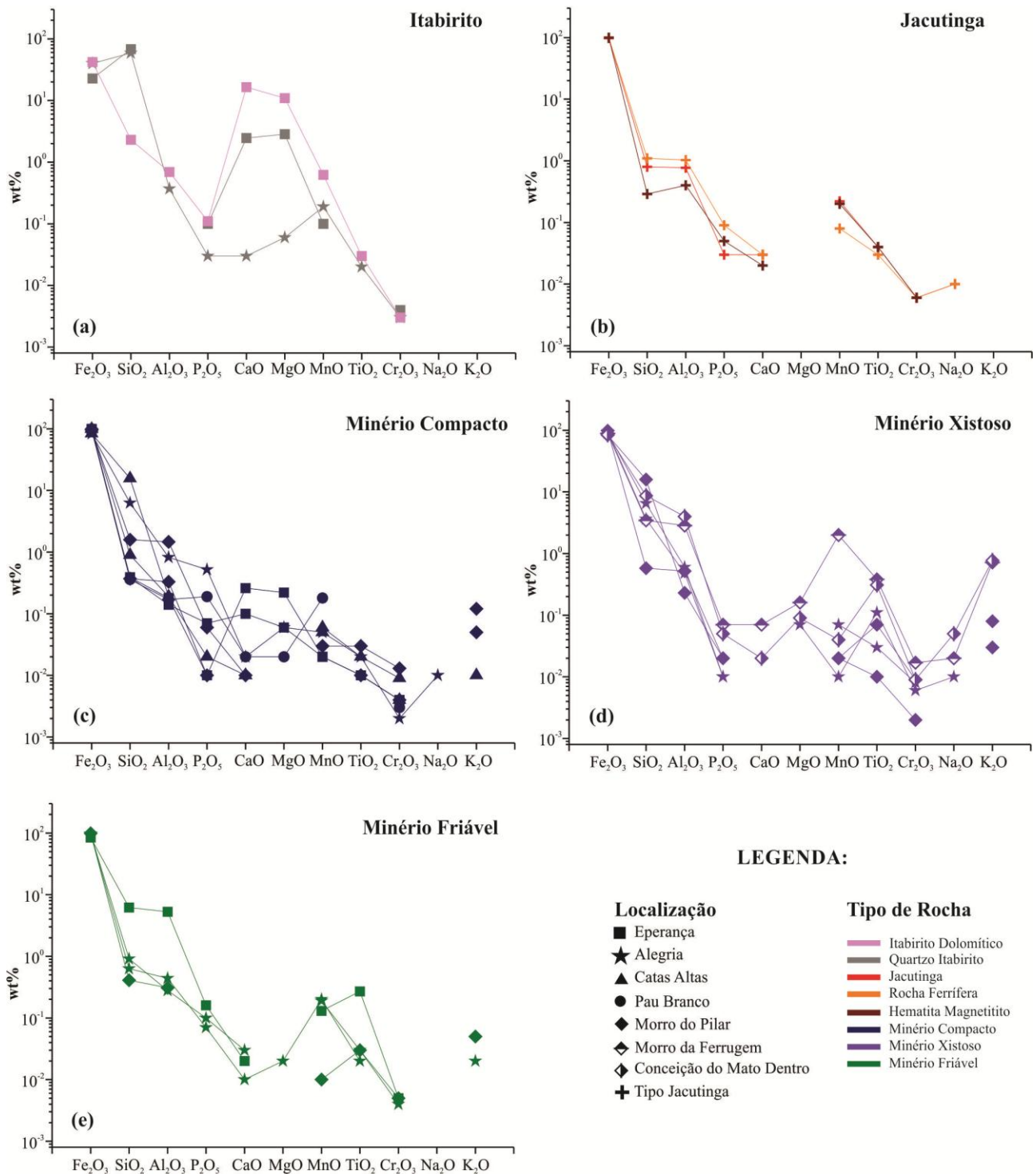


Figura 4.20. Diagramas *spider* mostrando a composição determinada por análise de rocha total em termos de elementos maiores para as rochas estudadas.

Tabela 4.2. Geoquímica dos elementos maiores para amostras selecionadas de minério de ferro de alto teor compacto, xistoso e friável do QF e da SEM.

%p/p	LD	Minério Compacto								Minério Xistoso						Minério Friável			
		AL07	CA02	CA06	ES06	ES09	PB05	MP07*	MP09*	AL03	AL06	FE01*	MP05*	MP06*	CM01*	AL02	AL05	ES03	MP08*
SiO₂	0,01	6,26	15,60	0,90	0,39	0,39	0,36	1,59	0,37	6,49	3,62	3,46	0,58	15,83	8,68	0,91	0,63	6,17	0,41
Al₂O₃	0,01	0,82	0,19	0,19	0,14	0,18	0,17	1,46	0,33	0,60	0,48	2,83	0,52	0,23	3,97	0,28	0,44	5,29	0,31
Fe₂O₃	0,04	83,37	83,67	98,73	99,64	98,45	94,83	95,36	98,84	91,72	95,10	88,71	98,21	83,02	84,54	95,90	96,67	84,26	98,86
MgO	0,01	0,06	<LD	<LD	0,06	0,22	0,02	<LD	<LD	<LD	0,07	0,16	<LD	<LD	0,09	<LD	0,02	<LD	<LD
CaO	0,01	0,02	0,01	0,01	0,10	0,26	0,02	0,01	<LD	<LD	<LD	0,07	<LD	<LD	0,02	0,03	0,01	0,02	<LD
Na₂O	0,01	0,01	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,01	0,02	<LD	<LD	0,05	<LD	<LD	<LD	<LD
K₂O	0,01	<LD	0,01	<LD	<LD	<LD	<LD	0,12	0,05	<LD	<LD	0,72	0,08	0,03	0,77	<LD	0,02	<LD	0,05
TiO₂	0,01	0,02	0,02	<LD	0,01	0,01	<LD	0,03	0,01	0,03	0,11	0,38	0,07	0,01	0,31	0,03	0,02	0,27	0,03
P₂O₅	0,01	0,52	0,02	<LD	0,07	0,01	0,19	0,06	0,01	0,01	0,01	0,07	0,02	0,02	0,05	0,10	0,07	0,16	<LD
MnO	0,01	0,05	0,06	0,05	0,02	0,02	0,18	0,03	<LD	0,07	0,01	2,00	0,02	0,02	0,04	0,19	0,20	0,13	0,01
Cr₂O₃	0,002	0,002	0,009	0,004	0,004	0,004	0,003	0,013	0,004	0,008	0,006	0,017	0,009	0,002	0,009	0,004	N.D	0,005	0,005
LOI	-5,10	8,90	0,40	0,10	-0,50	0,40	4,20	1,30	0,40	1,10	0,50	1,40	0,40	0,80	1,30	2,60	1,90	3,60	0,30
Total	0,01	99,98	99,99	99,98	99,97	99,97	99,97	99,95	99,98	99,98	99,97	99,87	99,96	99,98	99,82	99,97	99,98	99,92	99,96
TOT/C	0,02	0,05	0,08	<LD	<LD	0,10	0,03	<LD	<LD	<LD	<LD	0,03	<LD	<LD	<LD	0,03	0,02	<LD	<LD
TOT/S	0,02	0,04	0,05	0,04	0,06	<LD	<LD	0,02	<LD	<LD	0,06	0,03	<LD	<LD	0,08	0,05	0,06	<LD	<LD

LD = Limite de Detecção. *Amostras da SEM.

As amostras de minério de ferro de alto teor, as amostras associadas à mineralização de Au-PGE de Barão de Cocais (rocha ferrífera, BC03 e hematita-magnetito, BC06) e a Jacutinga (JA01) da mina Conceição possuem uma mineralogia muito simples (óxidos e hidróxidos de ferro). Esse fato reflete em sua química de rocha total onde apresentam um teor de Fe_2O_3 muito elevado, variando entre 83,02% e 99,71%. O conteúdo de sílica varia entre 0,29% e 15,83%, Al_2O_3 entre 0,14% e 5,29% e os demais óxidos são encontrados em valores abaixo de 0,5% com exceção do K_2O na amostra de minério xistoso FE01 que é de 0,72%. O LOI é em geral muito baixo, chegando a ser negativo para as amostras de teor de Fe mais elevado.

4.2.2. Elementos Traço

Em termos de elementos traço tanto o itabirito quartzoso quanto o itabirito dolomítico possuem baixos teores, uma vez que a maior parte dos elementos aparece com teores menores que 10 partes por milhão (ppm). As únicas exceções são B (11ppm) e V (49ppm) na amostra de itabirito quartzoso (AL01); e V (16ppm), Sr (39,9ppm), Nb (13ppm) e Ba (23ppm) no itabirito dolomítico (ES08). Esses teores são similares aos obtidos por Spier *et al.* (2007) para os mesmos tipos de rochas no QF. Todos os dados para elementos traço nestas rochas podem ser observados na Tabela 4.4 e alguns elementos foram plotados no diagrama da Figura 4.21a.

Não foi observada variação significativa nos teores de elementos traço dos diferentes tipos de minério de ferro de alto teor e nem das amostras associadas ao Au-PGE (Figura 4.21). Comparando os dados com os resultados obtidos por Spier *et al.* (2008) em minérios de alto teor do QF, os resultados obtidos não são muito diferentes notando-se, no entanto, diferenças significativas em alguns elementos.

Por exemplo, Ga varia de <0,5ppm a 12,10ppm; Rb de <0,1ppm a 23,7ppm; Nb de 1,1ppm a 30,3ppm e Hf de <0,1ppm a 13ppm. Observa-se também que algumas amostras apresentam concentrações significativamente elevadas de certos elementos como:

- Minério compacto de Alegria (AL07) que possui B igual a 466ppm;
- Minérios xistosos da SER, FE01 e CM01, que têm Zr em concentrações de 344,6ppm e 501,7ppm respectivamente;

- Sn no minério compacto (ES06) e no minério friável (ES03) de Esperança que é de 34ppm e 20ppm respectivamente;
- Minério compacto de Conceição do Mato Dentro (CM01) com Ba igual a 566ppm.

Todos os resultados obtidos nas análises destas amostras encontram-se nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6.

Tabela 4.3. Geoquímica dos elementos maiores para amostras associadas à mineralização de Au-PGE do QF.

%p/p	LD	Jacutinga	Rocha Ferrífera	Hematita-magnetito
		JA01	BC03	BC06
SiO ₂	0,01	0,80	1,10	0,29
Al ₂ O ₃	0,01	0,77	1,03	0,40
Fe ₂ O ₃	0,04	97,44	98,86	99,71
MgO	0,01	<LD	<LD	<LD
CaO	0,01	0,03	0,03	0,02
Na ₂ O	0,01	0,01	0,01	<LD
K ₂ O	0,01	<LD	<LD	<LD
TiO ₂	0,01	0,04	0,03	0,04
P ₂ O ₅	0,01	0,03	0,09	0,05
MnO	0,01	0,22	0,08	0,20
Cr ₂ O ₃	0,002	0,006	0,006	0,006
LOI	-5,10	0,60	-1,20	-0,70
Total	0,01	99,97	99,99	99,99
TOT/C	0,02	<LD	<LD	<LD
TOT/S	0,02	<LD	<LD	<LD

LD = Limite de Detecção.

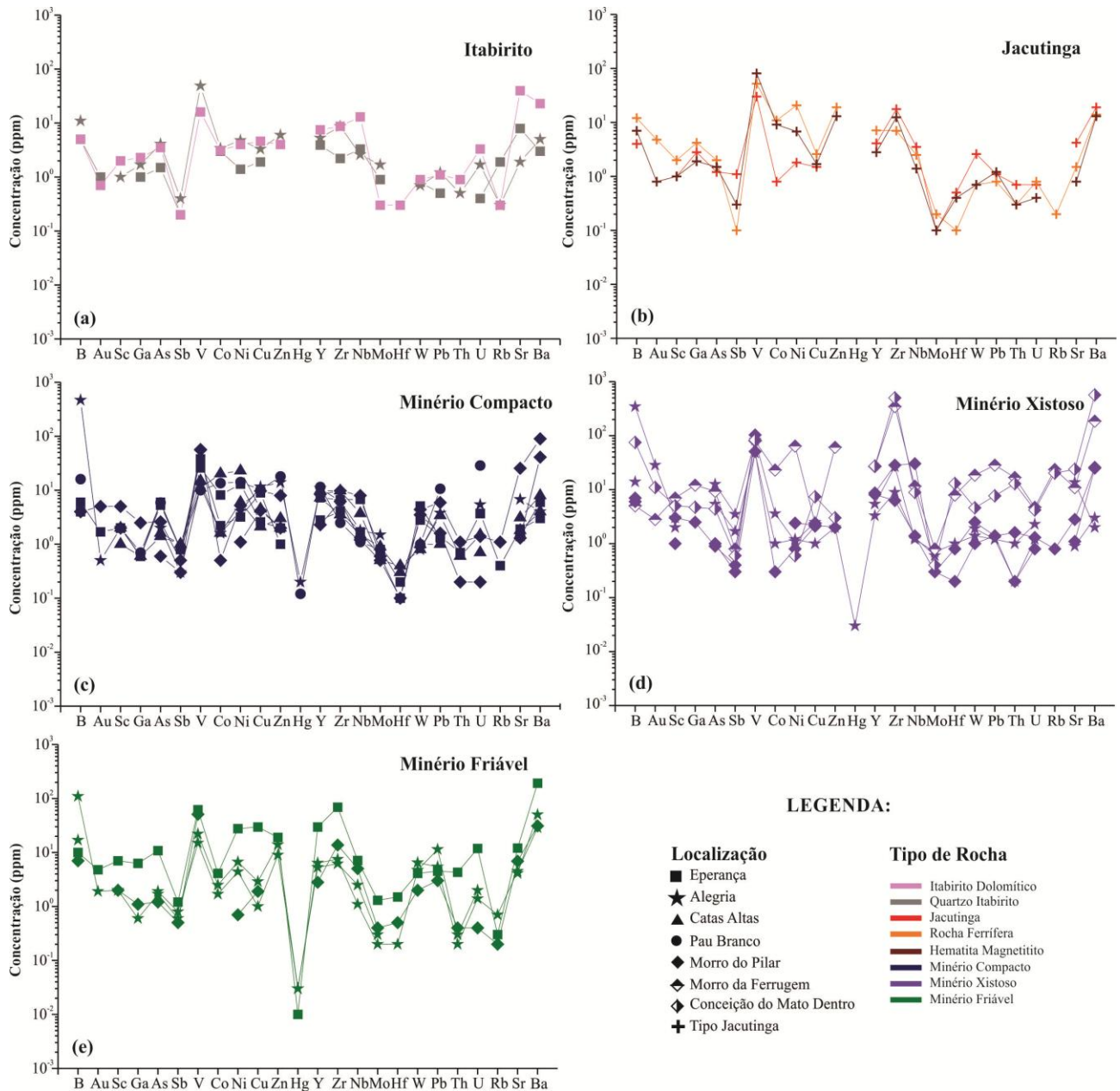


Figura 4.21. *Spidergram* com os conteúdos em ppm de alguns elementos traço das amostras estudadas. *Au em partes por bilhão (ppb). (a) Itabiritos. (b) Rochas associadas à mineralização do tipo Jacutinga. (c) Minérios compactos. (d) Minérios xistosos. (e) Minérios Friáveis.

Tabela 4.4. Resultados geoquímicos de elementos traço analisados para as amostras de itabirito quartzoso e itabirito dolomítico do QF.

ppm	LD	Itabirito Quartzoso		Itabirito Dolomítico
		AL01	ES07	ES08
Be	1,00	1,00	<LD	1,00
B	3,00	11,00	5,00	5,00
Sc	1,00	1,00	<LD	2,00
V	8,00	49,00	N.D	16,00
Co	0,20	3,40	3,00	3,10
Ni	0,10	4,80	1,40	4,00
Cu	0,10	3,30	1,90	4,60
Zn	1,00	6,00	<LD	4,00
Ga	0,50	1,70	1,00	2,30
As	0,50	4,10	1,50	3,50
Se	0,50	<LD	<LD	<LD
Rb	0,10	0,30	1,90	0,30
Sr	0,50	1,90	7,90	39,90
Y	0,10	5,30	3,90	7,50
Zr	0,10	8,70	2,20	8,70
Nb	0,10	2,60	3,30	13,00
Mo	0,10	1,70	0,90	0,30
Ag	0,10	<LD	<LD	<LD
Cd	0,10	<LD	<LD	0,20
Sn	1,00	<LD	1,00	2,00
Sb	0,10	0,40	0,20	0,20
Cs	0,10	<LD	0,30	<LD
Ba	1,00	5,00	3,00	23,00
Hf	0,10	<LD	<LD	0,30
Ta	0,10	<LD	<LD	<LD
W	0,50	0,70	0,80	0,90
Au*	0,50	<LD	1,00	0,70
Hg	0,01	<LD	<LD	<LD
Tl	0,10	<LD	<LD	<LD
Pb	0,10	1,20	0,50	1,10
Bi	0,10	<LD	<LD	<LD
Th	0,20	0,50	<LD	0,90
U	0,10	1,70	0,40	3,30

LD = Limite de Detecção. *Au em ppb.

Tabela 4.5. Resultados geoquímicos de elementos traço analisados para as amostras de minério de ferro de alto teor do QF e SEM.

ppm	LD	Minério Compacto								Minério Xistoso						Minério Friável			
		AL07	CA02	CA06	ES06	ES09	PB05	MP07*	MP09*	AL03	AL06	FE01*	MP05*	MP06*	CM01*	AL02	AL05	ES03	MP08*
Be	1,00	2,00	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	2,00	<LD	<LD	<LD	1,00	1,00	4,00	<LD
B	3,00	466,00	<LD	<LD	6,00	4,00	16,00	4,00	4,00	14,00	346,00	5,00	7,00	6,00	75,00	17,00	110,00	10,00	7,00
Sc	1,00	2,00	2,00	1,00	2,00	2,00	2,00	5,00	2,00	2,00	3,00	7,00	3,00	1,00	5,00	2,00	2,00	7,00	2,00
V	8,00	12,00	15,00	11,00	26,00	38,00	10,00	57,00	56,00	48,00	83,00	80,00	103,00	51,00	83,00	22,00	15,00	62,00	51,00
Co	0,20	1,60	1,60	20,30	8,20	2,20	13,50	0,50	<LD	1,00	3,60	23,10	<LD	0,30	<LD	2,50	1,70	4,10	<LD
Ni	0,10	4,10	6,00	22,90	13,00	3,20	14,20	5,20	1,10	1,20	1,10	64,10	2,40	0,80	0,60	6,70	4,40	27,60	0,70
Cu	0,10	11,60	2,10	4,50	2,60	9,00	10,20	9,70	4,20	1,00	2,50	2,40	2,20	2,10	7,40	2,90	1,00	29,60	1,90
Zn	1,00	14,00	3,00	2,00	2,00	1,00	18,00	8,00	2,00	2,00	<LD	61,00	2,00	<LD	3,00	14,00	9,00	19,00	<LD
Ga	0,50	<LD	<LD	0,60	0,60	0,60	0,70	2,50	<LD	<LD	<LD	12,10	2,50	<LD	4,70	0,60	<LD	6,30	1,10
As	0,50	2,00	1,60	1,40	6,00	5,30	5,90	2,60	0,60	5,40	12,60	9,30	0,90	1,00	4,40	1,70	1,90	10,80	1,20
Se	0,50	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,80	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Rb	0,10	<LD	<LD	<LD	0,40	<LD	<LD	1,10	<LD	<LD	<LD	23,70	0,80	<LD	20,20	<LD	0,70	0,30	0,20
Sr	0,50	6,80	3,10	1,80	1,90	1,40	1,40	25,60	1,30	0,90	13,60	10,90	2,80	1,10	23,80	4,10	4,50	12,00	6,90
Y	0,10	10,90	9,90	7,20	7,30	2,80	11,50	8,40	2,30	3,30	5,40	26,80	8,70	8,10	27,40	6,40	5,30	29,70	2,80
Zr	0,10	6,20	9,80	3,50	6,70	4,10	2,50	9,80	6,20	9,00	26,70	344,60	28,40	6,30	501,70	7,50	6,20	69,10	13,70
Nb	0,10	1,80	3,70	1,50	6,80	1,70	1,10	8,00	1,20	1,30	1,20	11,60	30,30	1,40	8,90	1,10	2,50	7,10	5,00
Mo	0,10	1,50	0,50	0,90	0,80	0,60	0,80	0,60	0,50	0,60	0,70	0,80	0,30	0,30	0,40	0,20	0,30	1,30	0,40
Ag	0,10	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Cd	0,10	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,10	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Sn	1,00	<LD	<LD	<LD	34,00	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1,00	2,00	2,00	<LD	1,00	<LD	<LD	20,00	1,00
Sb	0,10	0,30	1,00	1,00	0,80	0,80	0,80	0,50	0,30	1,70	3,50	0,80	0,40	0,30	0,60	0,60	0,80	1,20	0,50
Cs	0,10	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,10	<LD	<LD	<LD	<LD	0,50	<LD	<LD	0,40	0,20	0,20	0,20	<LD
Ba	1,00	4,00	8,00	4,00	3,00	6,00	<LD	90,00	41,00	3,00	2,00	186,00	26,00	25,00	566,00	50,00	29,00	192,00	31,00
Hf	0,10	<LD	0,40	0,30	0,20	0,10	<LD	<LD	0,10	<LD	1,00	7,90	0,80	0,20	13,00	0,20	<LD	1,50	0,50
Ta	0,10	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,60	0,10	<LD	0,40	<LD	<LD	0,40	<LD
W	0,50	0,80	0,80	1,00	2,80	5,10	1,00	4,40	3,50	1,90	1,40	18,60	2,50	1,00	4,60	4,70	6,50	4,10	2,00
Au**	0,50	0,50	<LD	<LD	1,70	<LD	<LD	5,00	<LD	<LD	28,50	2,80	<LD	<LD	11,00	<LD	1,90	4,80	<LD
Hg	0,01	0,20	<LD	<LD	<LD	<LD	0,12	<LD	<LD	0,03	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,03	0,03	0,01	<LD
Tl	0,10	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,10	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,10	<LD	<LD
Pb	0,10	3,80	3,40	1,00	1,40	1,30	10,60	5,90	1,60	1,20	1,20	28,50	1,40	1,40	7,70	11,40	5,40	4,50	3,00
Bi	0,10	<LD	<LD	<LD	0,10	0,30	<LD	<LD	<LD	<LD	0,20	0,30	<LD	<LD	0,30	<LD	<LD	1,20	<LD
Th	0,20	<LD	0,60	<LD	0,70	<LD	<LD	1,10	0,20	0,20	1,00	16,80	1,60	0,20	12,90	0,30	0,20	4,30	0,40
U	0,10	5,40	1,50	0,70	3,70	3,70	28,60	1,40	0,20	1,20	2,30	4,70	1,30	0,80	4,20	2,00	1,40	11,90	0,40

LD = Limite de Detecção. *Amostras da SEM. **Au em ppb.

Tabela 4.6. Resultados das análises de geoquímica de rocha total em termo dos elementos traço para amostras associadas à mineralização de Au-PGE do QF.

ppm	LD	Jacutinga	Rocha Ferrífera	Hematita-magnetitito
		JA01	BC03	BC06
Be	1,00	<LD	4,00	<LD
B	3,00	4,00	12,00	7,00
Sc	1,00	1,00	2,00	1,00
V	8,00	30,00	52,00	81,00
Co	0,20	0,80	10,90	9,10
Ni	0,10	1,80	20,70	6,80
Cu	0,10	1,50	2,60	1,70
Zn	1,00	<LD	19,00	13,00
Ga	0,50	2,80	4,20	1,90
As	0,50	1,20	2,00	1,50
Se	0,50	<LD	<LD	<LD
Rb	0,10	<LD	0,20	<LD
Sr	0,50	4,20	1,50	0,80
Y	0,10	4,10	7,10	2,80
Zr	0,10	17,60	7,00	12,40
Nb	0,10	3,50	2,50	1,40
Mo	0,10	0,10	0,20	0,10
Ag	0,10	<LD	<LD	<LD
Cd	0,10	<LD	<LD	<LD
Sn	1,00	<LD	<LD	<LD
Sb	0,10	1,10	0,10	0,30
Cs	0,10	<LD	<LD	<LD
Ba	1,00	19,00	14,00	13,00
Hf	0,10	0,50	0,10	0,40
Ta	0,10	<LD	0,10	<LD
W	0,50	2,60	0,70	0,70
Au*	0,50	<LD	4,80	0,80
Hg	0,01	<LD	<LD	<LD
Tl	0,10	<LD	<LD	<LD
Pb	0,10	1,10	0,80	1,20
Bi	0,10	<LD	<LD	<LD
Th	0,20	0,70	0,30	0,30
U	0,10	0,70	0,80	0,40
Au*	2,00	N.A.	16,00	3,00
Pt*	3,00	N.A.	<LD	<LD
Pd*	2,00	N.A.	<LD	<LD

LD = Limite de Detecção. N.A. = Não analisado. *ppb.

4.2.3. Elementos Terras Raras e Ítrio (ETR-Y)

Para normalização dos resultados das análises geoquímicas de rocha total para ETR-Y foram utilizados os valores fornecidos por McLennan (1989) para *Post Archean Australian Shale* (PAAS). Todos os dados obtidos durante as análises estão dispostos nas Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9. Diagramas com os dados de ETR-Y normalizados a *Post Archean Australian Shale* (PAAS) para todas as amostras analisadas são comparados na Figura 4.22 com os resultados obtidos por Spier *et al.* (2007, 2008) para rochas similares do Supergrupo Minas. As anomalias de Eu foram calculadas utilizando-se a fórmula:

$$\frac{Eu}{Eu_{PAAS}^*} = \frac{\frac{Eu}{Eu_{PAAS}}}{\left(\frac{Sm}{Sm_{PAAS}} \times \frac{Gd}{Gd_{PAAS}} \right)}$$

As anomalias de Ce, Pr e Y foram calculadas similarmente. Os graus de enriquecimento relativo de ETR leves (ETRL) em relação aos ETR pesados (ETRP) são apresentados como razões entre La/Yb, La/Sm e Sm/Yb.

Os somatórios dos ETR-Y (Σ ETR-Y) das amostras de QI e ID do Supergrupo Minas são baixos e similares aos observados para os mesmos tipos de rochas por Spier *et al.* (2007), sendo de 17,12ppm para o QI de Alegria (AL01); 9,31ppm para o QI ES07 e 24,12 ppm para o DI ES08, os dois últimos de Esperança. Já nos minérios de ferro e rochas associadas ao Au-PGE, como pode ser observado nas Tabelas 4.8 e 4.9, esses valores são em geral mais elevados do que aqueles obtidos por Spier *et al.* (2008) para minérios de ferro de alto teor. Destacam-se com valores significativamente mais elevados as amostras de minério compacto MP07 (129,34ppm) e minérios xistosos FE01 (67,06ppm) e CM01 (199,18ppm) do Grupo Serra da Serpentina e o minério friável de Esperança ES03 (114,77ppm) do Supergrupo Minas.

As três amostras de itabirito possuem anomalia positiva de Eu, assim como a maioria dos minérios que apresentam pelo menos uma leve anomalia positiva de Eu, com exceção das amostras de minério compacto de Morro do Pilar, MP09 ($Eu/Eu^* = 0,77$) e de Esperança, ES09 ($Eu/Eu^* = 1$), (Figura 4.22). As rochas associadas à mineralização de Au-PGE também mostram anomalias

positivas deste elemento, porém para a amostra de Jacutinga (JA01) o valor obtido é muito próximo de um ($Eu/Eu^* = 1,05$).

Tabela 4.7. Resultado das análises de rocha total de ETR-Y para as amostras de itabirito quartzoso e itabirito dolomítico do QF.

ppm	LD	Itabirito Quartzoso		Itabirito Dolomítico
		AL01	ES07	ES08
La	0,10	1,90	0,80	2,60
Ce	0,10	3,80	1,80	5,00
Pr	0,02	0,44	0,23	0,72
Nd	0,30	1,70	0,80	3,70
Sm	0,05	0,40	0,22	0,79
Eu	0,02	0,14	0,09	0,29
Gd	0,05	0,50	0,31	0,81
Tb	0,01	0,08	0,05	0,11
Dy	0,05	0,49	0,34	0,79
Y	0,10	5,30	3,90	7,50
Ho	0,02	0,14	0,08	0,20
Er	0,03	0,71	0,29	0,60
Tm	0,01	0,14	0,05	0,11
Yb	0,05	1,17	0,30	0,77
Lu	0,01	0,21	0,05	0,13
ΣETR-Y		17,12	9,31	24,12
Eu/Eu*_{PAAS}		1,47	1,62	1,71
Ce/Ce*_{PAAS}		0,96	0,97	0,84
Pr/Pr*_{PAAS}		1,02	1,13	0,98
Y/Y*_{PAAS}		1,61	1,89	1,50
(La/Yb)_{PAAS}		0,12	0,20	0,25
(La/Sm)_{PAAS}		0,69	0,53	0,48
(Sm/Yb)_{PAAS}		0,17	0,37	0,52
Sm/Yb		0,34	0,73	1,03
Y/Ho		37,86	48,75	37,50

LD = Limite de Detecção.

Somente uma amostra de minério do Grupo Serra da Serpentina (MP07) não apresenta anomalia positiva de Y, e todas as amostras de itabirito do Supergrupo Minas mostram anomalia significativa. Entretanto as rochas associadas ao Au-PGE JA01 e BC06 possuem valores para esta anomalia muito próximos de um, sendo que para este grupo de rochas somente a amostra BC03 (rocha ferrífera) apresenta anomalia de Y significativa ($Y/Y^* = 1,55$).

A Figura 4.23 (Bau & Dulsky 1996) confirma a existência de verdadeiras anomalias negativas de Ce para as seguintes amostras: minério compacto de Catas Altas (CA02, CA06); minério friável de Esperança (ES03); minério xistoso de Conceição do Mato Dentro (CM01) do Grupo Serra da Serpentina; rocha ferrífera (BC03) e hematita magnetitito (BC06) ambas associadas à mineralização do tipo Jacutinga. As amostras de minério compacto de Pau Branco (PB05) e de minério friável de Alegria (AL05) do Supergrupo Minas; e os minérios de Morro do Pilar (MP06 e MP08) e do Morro da Ferrugem (FE01) do Grupo Serra da Serpentina, no entanto possuem anomalias positivas de Ce (Figura 4.23).

A amostra ES08 de itabirito dolomítico do depósito de Esperança apresenta um padrão de ETR-Y muito similar ao valor médio obtido por Spier *et al.* (2007) para este tipo de rocha, apresentando empobrecimento dos ETRL com relação aos pesados (Figura 4.22a). Os padrões obtidos para as duas amostras de QI do Supergrupo Minas são também parecidas com o valor médio obtido por Spier *et al.* (2007) porém a amostra da mina de Alegria (AL01) mostra um enriquecimento significativamente maior em ETRP com relação aos ETRL, com $(La/Yb)_{PAAS} = 0,12$ e $(Sm/Yb)_{PAAS} = 0,17$ (Figura 4.22a).

Os padrões de ETR-Y dos diferentes tipos de minérios ferro de alto teor e das rochas associadas ao Au-PGE foram plotados nos diagramas da Figura 4.22 (b-e) e foram utilizadas para comparação as curvas das médias obtidas por Spier *et al.* (2008) para minério compacto e minério friável. No diagrama da Figura 4.22c observa-se em todas as amostras de minério compacto um empobrecimento dos ERTL com relação aos ETRP exceto para a amostra do Grupo Serra da Serpentina (MP07) na qual ocorre o contrário apresentando $(La/Yb)_{PAAS} = 4,65$. As amostras também do Grupo Serra da Serpentina, MP05 e CM01, de minério xistoso apresentam $(La/Yb)_{PAAS} \sim 1,0$ enquanto para as demais essa razão é menor que um (Figura 4.22d). A amostra de minério friável de Morro do Pilar, MP08, também apresenta comportamento anômalo com relação à razão $(La/Yb)_{PAAS}$ que é de 4,13; as demais amostras deste tipo de minério apresentam o típico empobrecimento de ETRL com relação aos ETRP (Figura 4.22e).

Tabela 4.8. Resultado das análises de rocha total de ETR-Y para as amostras dos diferentes tipos de minério de ferro de alto teor do QF e da SEM.

ppm	LD	Minério Compacto								Minério Xistoso						Minério Friável			
		AL07	CA02	CA06	ES06	ES09	PB05	MP07*	MP09*	AL03	AL06	FE01*	MP05*	MP06*	CM01*	AL02	AL05	ES03	MP08*
La	0,10	1,60	1,80	2,10	1,40	1,80	1,20	27,10	1,30	1,50	1,80	4,10	10,90	1,70	44,70	1,70	1,00	11,60	9,50
Ce	0,10	3,90	2,70	2,90	2,90	3,90	3,00	54,80	1,90	2,80	3,30	18,20	19,60	3,20	68,30	4,40	2,30	21,30	29,20
Pr	0,02	0,48	0,61	0,46	0,46	0,34	0,32	5,40	0,14	0,29	0,33	0,90	1,92	0,25	7,99	0,39	0,18	4,08	1,77
Nd	0,30	3,50	3,40	2,10	2,50	0,60	1,70	21,20	N.D	1,40	2,60	3,30	5,40	0,90	29,10	1,20	0,80	23,10	5,70
Sm	0,05	0,79	0,73	0,64	0,68	0,35	0,50	4,06	0,26	0,36	0,38	1,35	1,15	0,26	4,82	0,67	0,26	5,46	1,25
Eu	0,02	0,45	0,31	0,21	0,23	0,09	0,25	1,08	0,03	0,13	0,14	0,37	0,28	0,07	0,97	0,20	0,08	1,53	0,38
Gd	0,05	0,99	0,99	0,56	0,86	0,51	0,74	3,67	0,13	0,33	0,44	1,83	0,86	0,30	3,80	0,69	0,46	4,66	0,89
Tb	0,01	0,15	0,16	0,07	0,13	0,05	0,13	0,43	0,02	0,06	0,07	0,41	0,10	0,05	0,56	0,10	0,04	0,65	0,11
Dy	0,05	1,28	0,89	0,43	0,90	0,35	0,99	1,82	0,13	0,31	0,52	2,70	0,83	0,70	3,91	0,74	0,55	4,07	0,61
Y	0,10	10,90	9,90	7,20	7,30	2,80	11,50	8,40	2,30	3,30	5,40	26,80	8,70	8,10	27,40	6,40	5,30	29,70	2,80
Ho	0,02	0,28	0,30	0,12	0,26	0,05	0,35	0,29	0,03	0,11	0,17	0,77	0,17	0,15	0,98	0,15	0,14	1,02	0,05
Er	0,03	0,83	1,08	0,42	0,57	0,41	1,13	0,60	0,20	0,36	0,53	2,57	0,70	0,56	2,67	0,64	0,54	2,97	0,35
Tm	0,01	0,10	0,13	0,05	0,08	0,05	0,15	0,03	<LD	0,02	0,07	0,38	0,10	0,05	0,48	0,06	0,04	0,44	0,02
Yb	0,05	1,10	0,79	0,58	0,58	0,30	1,45	0,43	0,23	0,15	0,64	2,89	0,77	0,51	3,02	0,58	0,31	3,61	0,17
Lu	0,01	0,11	0,14	0,07	0,08	0,06	0,24	0,03	<LD	<LD	0,09	0,49	0,15	0,07	0,48	0,11	0,07	0,58	<LD
ΣETR-Y		26,46	23,93	17,91	18,93	11,66	23,65	129,34	6,67	11,12	16,48	67,06	51,63	16,87	199,18	18,03	12,07	114,77	52,80
Eu/Eu*_{PAAS}		2,40	1,72	1,65	1,42	1,00	1,94	1,32	0,77	1,78	1,61	1,11	1,33	1,18	1,07	1,39	1,09	1,43	1,70
Ce/Ce*_{PAAS}		1,03	0,59	0,68	0,83	1,15	1,12	1,05	1,03	0,98	0,99	2,19	0,99	1,13	0,83	1,25	1,25	0,71	1,64
Pr/Pr*_{PAAS}		0,76	1,18	1,10	1,01	1,31	0,83	0,93	-	0,86	0,66	0,68	1,10	0,87	1,05	1,00	0,78	1,08	0,81
Y/Y*_{PAAS}		1,45	1,53	2,53	1,20	1,69	1,56	0,92	2,94	1,43	1,45	1,48	1,85	1,99	1,12	1,53	1,52	1,16	1,28
(La/Yb)_{PAAS}		0,11	0,17	0,27	0,18	0,44	0,06	4,65	0,42	0,74	0,21	0,10	1,05	0,25	1,09	0,22	0,24	0,24	4,13
(La/Sm)_{PASS}		0,29	0,36	0,48	0,30	0,75	0,35	0,97	0,73	0,61	0,69	0,44	1,38	0,95	1,35	0,37	0,56	0,31	1,10
(Sm/Yb)_{PASS}		0,36	0,47	0,56	0,60	0,59	0,18	4,80	0,57	1,22	0,30	0,24	0,76	0,26	0,81	0,59	0,43	0,77	3,74
Sm/Yb		0,72	0,92	1,10	1,17	1,17	0,34	9,44	1,13	2,40	0,59	0,47	1,49	0,51	1,60	1,16	0,84	1,51	7,35
Y/Ho		38,93	33,00	60,00	28,08	56,00	32,86	28,97	76,67	30,00	31,76	34,81	51,18	54,00	27,96	42,67	37,86	29,12	56,00

LD = Limite de Detecção. *Amostras da SEM.

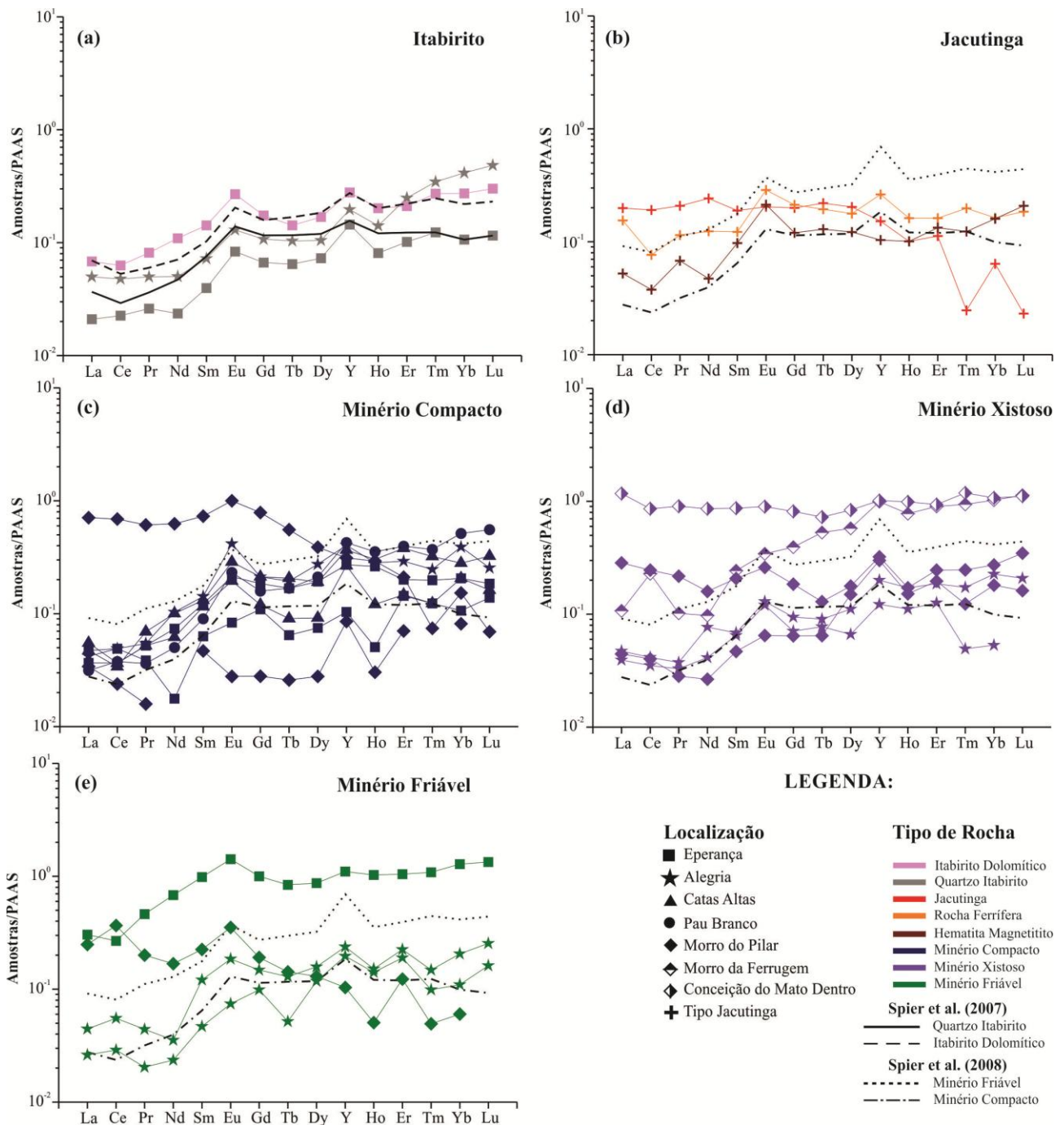


Figura 4.22. (a-e) Diagramas elementos ETR-Y baseados nos dados de rocha total das amostras comparados com a média de Spier *et al.* (2007) para os itabiritos quartzoso e dolomítico e de Spier *et al.* (2008) para o minérios compacto e friável, linhas pretas tracejadas. PAAS Normalizado (McLennan 1989). (a) Itabiritos quartzosos e dolomítico; (b) Rochas associadas ao Au-PGE; (c) Minérios compactos; (d) Minérios xistosos; (e) Minérios friáveis.

As três amostras associadas ao Au-PGE possuem a razão $(La/Yb)_{PAAS}$ distintas entre si, onde a amostra de Jacutinga JA01 apresenta um enriquecimento em ETRL com relação aos ETRP $(La/Yb)_{PAAS} = 3,12$, a amostra BC03 possui $(La/Yb)_{PAAS} \sim 1,0$ e a amostra BC06 tem $(La/Yb)_{PAAS} =$

0,33 mostrando conseqüentemente um empobrecimento dos ETRL com relação aos ETRP (Figura 4.22b).

Tabela 4.9. Resultado das análises de rocha total de ETR-Y para as amostras associadas à mineralização de Au-PGE do QF.

ppm	LD	Jacutinga	Rocha Ferrífera	Hematita-magnetitito
		JA01	BC03	BC06
La	0,10	7,60	5,90	2,00
Ce	0,10	15,20	6,10	3,00
Pr	0,02	1,84	1,01	0,60
Nd	0,30	8,20	4,20	1,60
Sm	0,05	1,05	0,68	0,54
Eu	0,02	0,22	0,31	0,23
Gd	0,05	0,93	0,99	0,56
Tb	0,01	0,17	0,15	0,10
Dy	0,05	0,95	0,83	0,57
Y	0,10	4,10	7,10	2,80
Ho	0,02	0,10	0,16	0,10
Er	0,03	0,32	0,46	0,38
Tm	0,01	0,01	0,08	0,05
Yb	0,05	0,18	0,46	0,45
Lu	0,01	0,01	0,08	0,09
ΣETR-Y		40,88	28,51	13,07
Eu/Eu* _{PAAS}		1,05	1,78	1,97
Ce/Ce* _{PAAS}		0,94	0,58	0,63
Pr/Pr* _{PAAS}		0,97	1,17	1,61
Y/Y* _{PAAS}		1,06	1,55	0,94
(La/Yb) _{PAAS}		3,12	0,95	0,33
(La/Sm) _{PASS}		1,05	1,26	0,54
(Sm/Yb) _{PASS}		2,96	0,75	0,61
Sm/Yb		5,83	1,48	1,20
Y/Ho		41,00	44,38	28,00

LD = Limite de Detecção.

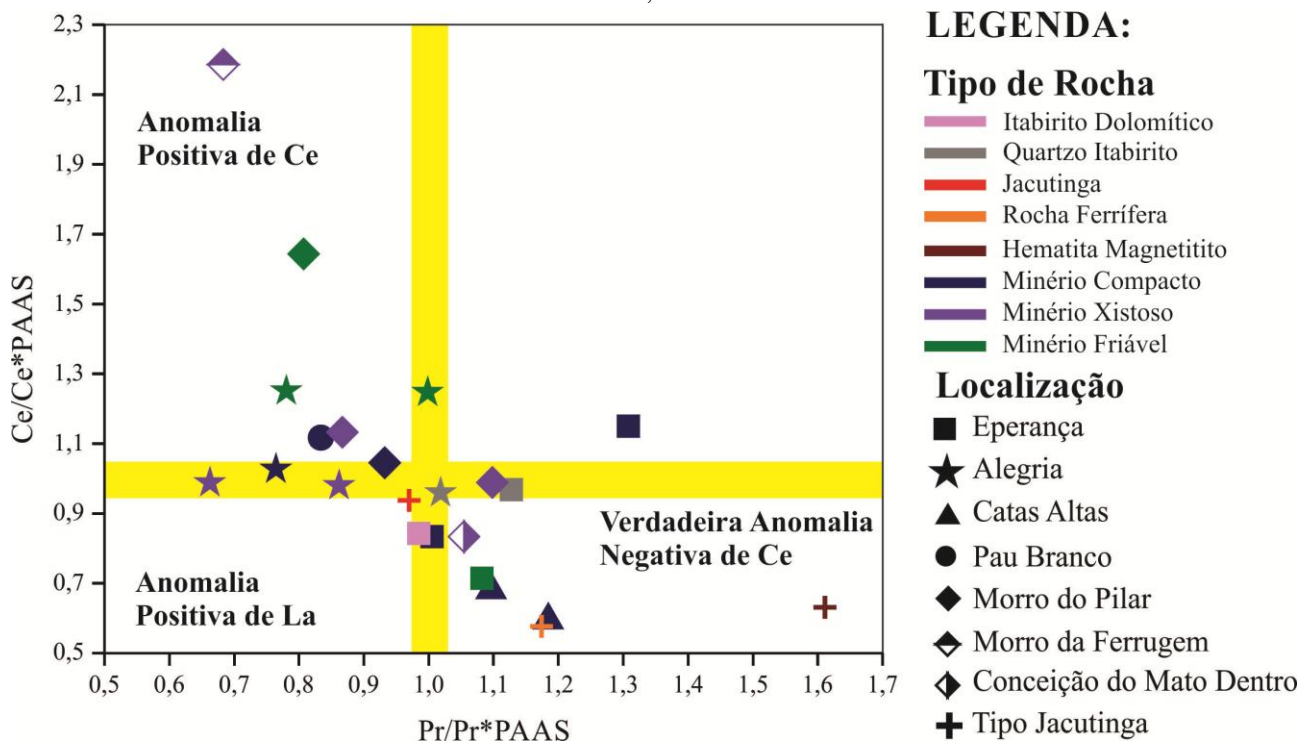


Figura 4.23. Diagrama para a identificação de anomalias de Ce e/ou de La (Bau & Dulsky 1996).

CAPÍTULO 5. MINERALIZAÇÃO EM FERRO NO SUPERGRUPO MINAS: O DEPÓSITO DE ESPERANÇA

O depósito de Esperança está localizado no domínio de baixa deformação (Rosière *et al.* 2001), oeste do QF (Figura 3.1). Neste depósito as FFB são constituídas principalmente por itabiritos dolomíticos (DI) que possuem o bandamento bem preservado e são as rochas encaixantes do minério de ferro de alto teor na região (Oliveira *et al.* 2015). As amostras coletadas para o estudo microquímico das diferentes gerações de óxido de ferro e inclusões fluidas consistem em itabirito dolomítico, minério de ferro de alto teor e veios sin-tectônicos que cortam estas rochas e estão diretamente ligados aos processos de enriquecimento e (re)mobilização de ferro ocorridos na região. Esses veios hidrotermais podem ser brevemente descritos como:

- a. Veio fibroso de carbonato-quartzo-especularita (Figura 4.9) que corta discordantemente o bandamento do itabirito dolomítico encaixante do corpo de minério de alto teor.
- b. Veio de quartzo sacaroidal com especularita cortando o minério compacto de alto teor (Figura 4.10).
- c. Cristais de especularita preenchendo zonas de fraturas e *vugs* no minério de alto teor (Figura 4.10).

Descrições petrográficas detalhadas das amostras são encontradas no Capítulo 4 e no artigo disposto abaixo (Oliveira *et al.* 2015). A metodologia utilizada é aquela descrita no item abaixo e nos Capítulos 3 e 6. Os isótopos de elementos analisados por LA-ICP-MS nas inclusões fluidas foram os mesmos descritos abaixo no artigo do Capítulo 6.

ARTIGO: "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"

Assinatura química de óxidos de ferro associados ao enriquecimento em ferro na Formação Ferrífera Bandada Cauê - Depósito de Esperança, Quadrilátero Ferrífero, Brasil: um estudo por ablação a laser ICP-MS

Lucilia Aparecida Ramos de Oliveira^{1*}, Carlos Alberto Rosière², Francisco Javier Rios³, Sandra Andrade⁴, Renato de Moraes⁴.

¹Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte (MG), Brazil. E-mail: luciliar@gmail.com

²Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte (MG), Brazil. E-mail: crosiere@gmail.com

³Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN, Belo Horizonte (MG), Brazil. E-mail: javier@cdtn.br

⁴Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo (SP), Brazil. E-mail: sandrade@usp.br; moraes@igc.usp.br

*Corresponding author

Manuscript ID: 30190. Received: 10/27/2014. Approved: 04/24/2015.

Published in: Brazilian Journal of Geology, 45(2): 193-216, June 2015.

DOI: 10.1590/23174889201500020003

ABSTRACT

Chemical signatures of iron oxides from dolomitic itabirite and high-grade iron ore from the Esperança deposit, located in the Quadrilátero Ferrífero, indicate that polycyclic processes involving changing of chemical and redox conditions are responsible for the iron enrichment on Cauê Formation from Minas Supergroup. Variations of Mn, Mg and Sr content in different generations of iron oxides from dolomitic itabirite, high-grade iron ore and syn-mineralization quartz-carbonate-hematite veins denote the close relationship between high-grade iron ore formation and carbonate alteration. This indicates that dolomitic itabirite is the main precursor of the iron ore in that deposit. Long-lasting percolation of hydrothermal fluids and shifts in the redox conditions have contributed to changes in the Y/Ho ratio, light/heavy rare earth elements ratio and Ce anomaly with successive iron oxide generations (martite-granular hematite), as well as lower abundance of trace elements including rare earth elements in the younger specularite generations.

KEYWORDS: high-grade iron ore; geochemistry; iron oxide; LA-ICP-MS analysis.

RESUMO

As assinaturas químicas dos óxidos de ferro presentes no itabirito dolomítico e no minério de ferro de alto teor do Depósito de Esperança, localizado no Quadrilátero Ferrífero, indicam que processos policíclicos envolvendo mudanças nas condições químicas e de redox são responsáveis pelo enriquecimento em ferro na Formação Cauê do Supergroup Minas. A variação nos conteúdos relativos de Mn, Mg e Sr nas diferentes gerações de óxidos de ferro encontradas no itabirito dolomítico, no minério de ferro de alto teor e nos veios de quartzo-carbonato-hematita associados à mineralização denotam uma estreita relação entre a formação do corpo de minério de ferro de alto teor e a alteração dos carbonatos. Isso indica que o itabirito dolomítico é o principal precursor do corpo de minério naquele depósito. Percolação de longa duração de fluidos hidrotermais e mudança nas condições de redox contribuíram para a alteração das razões Y/Ho, elementos terras raras leves/pesados e da anomalia de Ce com sucessivas gerações de óxido de ferro (martita-hematita granular), bem como depleção dos conteúdos de elementos traço, incluindo os elementos terras raras das gerações mais recentes de especularita.

PALAVRAS-CHAVE: minério de ferro de alto teor; geoquímica; óxido de ferro; análise por LA-ICP-MS.

5.1. INTRODUCTION

The genesis of high-grade iron ore bodies has been extensively discussed worldwide. Different processes such as hydrothermal syn-metamorphic (Guild 1953, 1957, Dorr 1965, 1969), residual supergene (Dorr 1964, Eichler 1968, Melfi *et al.* 1976), or paleo-supergene enrichment (Morris 1980, 1987, Harmsworth *et al.* 1990), and the juxtaposition of hypogene and supergene fluids (Powell *et al.* 1999, Hagemann *et al.* 1999, 2005, Taylor *et al.* 2001, Rosière & Rios 2004) are considered to be responsible for the iron enrichment. In most of the large iron deposits, Fe enrichment appears to be a multistage process involving hydrothermal leaching of gangue minerals (Taylor *et al.* 2001, Hagemann *et al.* 2005) and Fe remobilization. Rosière & Rios (2004) have documented in the Conceição Mine (Quadrilátero Ferrífero) an association of several iron oxide generations with different mineralization stages. In situ trace element geochemistry studies by Laser Ablation – Inductive Coupled Plasma – Mass Spectrometer (LA-ICP-MS) are expected to shed some light on the understanding of the mineralization processes that have led to the iron ore concentration in the Esperança deposit, located in the Quadrilátero Ferrífero. They help to trace the geochemical signature of the different iron oxide generations, to constrain the physico-chemical conditions of their formation and their compositional evolution with time (Nadoll *et al.* 2014). In this study, samples of high-grade massive ore and fibrous quartz-carbonate-specularite veins, both hosted in dolomitic itabirite, from the Esperança deposit, are examined using LA-ICP-MS. Fibrous quartz-carbonate-specularite assemblages grow upon opening of the veins and consequently offer constrains on fluid conditions at the time of fracturing during syn-kinematic mineralization (Rosière *et al.* 2001). Iron oxide microchemistry reflects the variation in the fluid composition and the prevailing physico-chemical conditions during the process thus enabling to draw important conclusions about the transformations associated with the different stages of mineralization.

5.2. GEOLOGICAL SETTING OF QUADRILÁTERO FERRÍFERO

The Quadrilátero Ferrífero district is located in the central part of Minas Gerais, southeastern Brazil (Figure 5.1), where itabirites, a metamorphic variety of Banded Iron Formation (BIF) (Hagemann *et al.* 2008, Rosière *et al.* 2008), of the Cauê BIF from the Minas Supergroup, host high-grade iron ore bodies (Fe>64wt%). The ore is comprised mainly of magnetite and martite (hematite pseudomorph after magnetite) aggregates and younger hematite crystals that display a wide variety of microstructures and textures (Rosière *et al.* 2001, 2013a, 2013b).

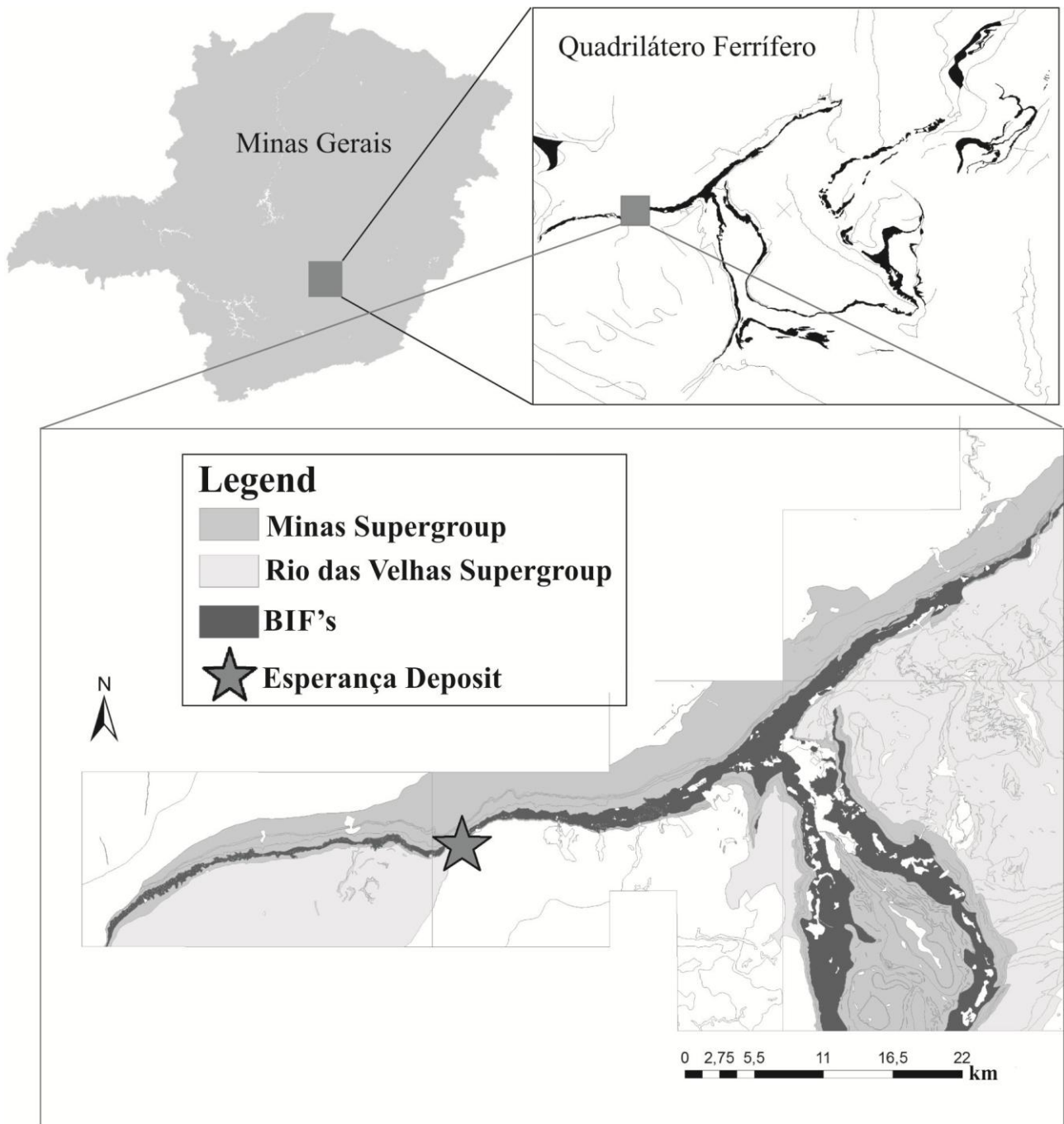


Figure 5.1. Simplified geological map of the northwestern area of the Quadrilátero Ferrífero highlighting the location of the Esperança deposit.

The platformal units of the Minas Supergroup were deposited at the SE border of the Archean São Francisco paleocontinent (Ávila *et al.* 2010) with the onset of deposition at about ~2600 to 2520Ma as indicated by U-Pb ages for detrital zircons from the basal Moeda quartzites (Machado *et al.* 1992, 1996, Renger *et al.* 1994, Hartmann *et al.* 2006). The rocks exhibit structures that are the product of two main orogenic events (Machado & Carneiro 1992, Chemale Jr. *et al.* 1994, Alkmim

& Marshak 1998, Noce *et al.* 1998, Rosière *et al.* 2001): the Transamazonian (2.1–2.0Ga) and the Pan-African/ Brasileiro (0.8–0.6Ga; Rosière *et al.* 2001). During the early Transamazonian orogeny (Rosière *et al.* 2013a), structurally controlled, high-grade martite-hematite iron ore bodies of hypogene origin formed in the Cauê BIF, as discussed by Guild (1953, 1957), Dorr (1965) and Rosière & Rios (2004). Two penecontemporaneous events developed significant folds and related faults with northeast-southwest and northwest-southeast orientations, which constrain the alignment and location of the ore bodies (Rosière *et al.* 2008).

5.3. DOLOMITIC ITABIRITE AND THE HYPOGENE ENRICHMENT OF BANDED IRON FORMATION IN THE QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Hypogene enrichment of the itabirite is the main ore-forming process in the Quadrilátero Ferrífero (Rosière & Rios 2004, Rosière *et al.* 2008). In this region, hydrothermal fluids interacted with the BIF protolith during the Transamazonian orogeny (Rosière *et al.* 2013a) resulting initially in the formation of magnetite-rich, high-grade ore bodies. Later hypogene fluids, probably modified by ancient meteoric waters, seeped through the fault zones and were responsible for the oxidation of the magnetite protore. This resulted in martite aggregates and younger precipitated and recrystallized hematite crystals (Rosière & Rios 2004). In granoblastic domains, hematite grains comprise a fabric of anhedral to subhedral grains with elongated platelets that occur as fillings in veins, voids and vugs in the interstices of martite-hematite aggregates. In schistose domains, associated with highly strained zones, platy crystals exhibit a preferred orientation with the development of a continuous foliation. The mineralogical changes during mineralization are associated with the remobilization of large amounts of dolomite, quartz, lesser iron oxide and the substantial development of veins. Mining developments beneath the water table (Spier *et al.* 2003) have shown that, although high-grade ore bodies may be hosted by quartz-rich itabirite, the dolomitic variety represents its most important protolith. Dolomitic itabirite has been observed in the Águas Claras (Spier *et al.* 2003), Esperança and other deposits in the Quadrilátero Ferrífero.

Dolomitic itabirite is one of the mineralogical facies distinguished by Dorr & Barbosa (1963) and Dorr (1964, 1965, 1969). It combines the characteristics of BIFs and marine dolostones with large amounts of iron oxides and texturally it is very similar to quartz itabirites. Spier *et al.* (2007) interpret these rocks from the Itabira Group as the product of diagenetic processes under unusual conditions at the final stages of Paleoproterozoic iron deposition. Morgan *et al.* (2013), using mineralogical investigations combined with rare earth elements behavior and trace elements

geochemistry, proposed a mixed marine-hydrothermal origin for these rocks. In contrast, Beukes *et al.* (2003), based on deep drilling and mining data, consider these rocks to be a product of hypogene alteration of quartz itabirite during carbonate metasomatism which has substituted silica by iron-rich dolomite.

5.4. ESPERANÇA DEPOSIT

The Esperança Deposit is located in the northwestern part of the Quadrilátero Ferrífero, in the western branch of the Serra do Curral Ridge, near Brumadinho, Minas Gerais (Figure 5.1). This deposit is currently being exploited by Ferrous Resources. According to internal reports, the available reserves comprise 339 million tons of high (>60% Fe) and low-grade (30–60% Fe) weathered friable dolomite-bearing ore with a production capacity of 2 million tons/year.

The regional structure is controlled by NE-SW trending folds and related thrusts, partially overlapped by a second group of NNW-SSE trending folds (Sanglard *et al.* 2011). According to these authors, the structural arrangement led to the development of open spaces and strain gradients that allowed the circulation of fluids responsible for the hypogene alteration and mineralization of the BIF.

Dolomitic itabirite exhibits a large variety of minerals, including iron oxides, quartz, dolomite/ankerite, minor calcite and silicates such as chlorite, amphiboles (cummingtonite, grunerite), stilpnomelane and talc/minnesotaite. A wedge-shaped, near-vertical, massive high-grade ore body is hosted by dolomitic itabirite. The ore body trends NE-SW and cuts the layers of the Cauê Formation narrowing with depth (Sanglard 2013). The contact between the ore body and dolomitic itabirite is sharp. The high-grade ore body comprises magnetite-martite-maghemite and hematite-specularite that grows either as xenoblastic or idioblastic crystals. The relatively small size of the ore body (~120m thickness) allows the identification of hypogene alteration zones, which include several vein generations comprising carbonate, quartz, iron oxide, minor chlorite, amphiboles, stilpnomelane and rare sulfides.

5.5. MATERIALS AND METHODS

LA-ICP-MS analyses were performed at the Chemistry and ICP Laboratory, part of the NAP GeoAnalítica Geoscience Institute, University of São Paulo (USP), using a quadrupole ICP-MS spectrometer, ELAN 6100DRC, Perkin Elmer/Sciex™, and a New Wave Laser Ablation system, model UP-213 A/F with super cell. Analytical conditions were:

- laser energy for mineral ablation 3.5J/cm²,
- laser pulse frequency 10Hz,
- ablation carrier gas was He (0.5L/min), and
- Ar at 0.5L/min for transport to the ICP, RF Power 1,300W.

The laser diameter (40 to 65µm) and the hole depth (10 to 15µm) varied depending on the size and shape of the crystal and for some analyses a spot or a raster was used. The dwell times were also variable for each element (8.3, 16.7, and 25ms).

The elements analyzed by LA-ICP-MS in all iron oxides were: Li⁷, Na²³, Mg²⁶, Al²⁷, Si²⁹, P³¹, Ti⁴⁹, V⁵¹, Cr⁵³, Fe⁵⁷, Mn⁵⁵, Co⁵⁹, Ni⁶⁰, Cu⁶³, Zn⁶⁶, Ga⁷¹, As⁷⁵, Sr⁸⁸, Y⁸⁹, Zr⁹⁰, Nb⁹³, Mo⁹⁵, Sb¹²¹, Cs¹³³, Ba¹³⁷, La¹³⁹, Ce¹⁴⁰, Pr¹⁴¹, Nd¹⁴⁴, Sm¹⁴⁷, Eu¹⁵³, Gd¹⁵⁶, Tb¹⁵⁹, Dy¹⁶¹, Ho¹⁶⁵, Er¹⁶⁶, Tm¹⁶⁹, Yb¹⁷³, Lu¹⁷⁵, Pb²⁰⁸, Bi²⁰⁹, Th²³², and U²³⁸.

The reference material (RM) Nist-610 (NIST-USA) was used as external calibration standard. Besides the low iron content in NIST-610 (458µm/g), it is considered an adequate external standard. Iron (Fe) was applied as an internal calibration standard, to correct drift and fractionation.

The RM BHVO-2G (FeO = 11.3%) was provided by United States Geological Survey (USGS), characterized by LA-ICP-MS (Gao *et al.* 2002), and has the data compiled by GEOREM (2014). BHVO-2G was used as a quality control standard in order to verify the accuracy of the obtained results (Appendix 2).

All the results were processed by Glitter Software (Access Macquarie LTD), developed by GEMOC National Key Center, Macquarie University, Australia. The mean and median values of

the analyzed elements in BHVO-2G are similar to the values obtained by Gao *et al.* (2002). Coefficients of variation (%CV; Horwitz 1982) are inside of the interval from 80 to 120% of the values proposed by Gao *et al.* (2002), that are expected for concentration levels analyzed by LA-ICP-MS (Appendix 2). The elements Sb (56%), Pb (137%), and Si (123%) are the only ones out of these CV and perhaps with a major set of data this deviation could be corrected.

The relative standard deviation (rsd) obtained for the samples and BHVO-2G was above the quantitation limit (3.33 of the detection limit). Usually, the precision represented by rsd is 10-15%. However, whether obtained values for the elements approach the detection limit, the rsd values are increased as observed in Bi, As, and Sb from BHVO-2G and other elements from analyzed samples (Appendix 2).

5.6. ANALYZED SAMPLES

For the purpose of evaluating chemical changes in iron oxides during mineralization, hematite grains from a single sample of dolomitic itabirite (DI) and two samples of hard high-grade iron ore (HIO1 and HIO2) from the Esperança Deposit (Figures 5.2 to 5.4) were analyzed. Sample DI and HIO1 were collected from the diamond drill core FD024 (UTM: E58103.44/N7776096.03) at depths of 249m for DI and of 70m for HIO1. Sample HIO2 was collected from a digging face in the open pit (UTM: E580930.272/N7776104.693).

Sample DI is a fine-grained banded rock, with gray iron oxide bands alternating with red dolomite bands. Mm- to cm-wide crack-seal veins composed mainly of quartz, carbonate and specular hematite cut the sampled rock (Figures 5.2a and 5.2b). The prevailing iron oxide of the banded iron formation is anhedral granular hematite (gHmA) with pinkish (dark gray in Figure 5.2d) relics of kenomagnetite (kmg) although several subhedral to euhedral martite crystals are intergrown with the hematite aggregates (Figures 5.2c and 5.2d). The reddish dolomite layers comprise mainly subhedral to anhedral grains with straight or lobed boundaries with subordinate quartz and calcite. Accessory minerals include talc, amphibole and chlorite.

Sample HIO1 is a fine to medium grained (<50 μ m), massive high-grade iron ore (Figure 5.3a) with a brecciated fabric. The rock is comprised by aggregates of granoblastic hematite/martite (gHmB: ~90vol%) with kenomagnetite relics (Figure 5.3b) similar to those observed in the DI. Large platy hematite (spH1A: 100–500 μ m) grows in apparent vugs surrounded by hematite-martite

aggregates (Figure 5.3c), whereas elongated coarse platy crystals (specularite - spH1B: $>500\mu\text{m}$) build irregular-shaped sheaves filling open spaces or fractures (Figure 5.3d). Sample HIO2 is similar to HIO1 (Figures 5.4a and 5.4b), although lacking microplaty hematite or specularite in the interstices. A cm-long extensional vein filled with syntaxially grown fibrous specularite and quartz cuts across the sample.

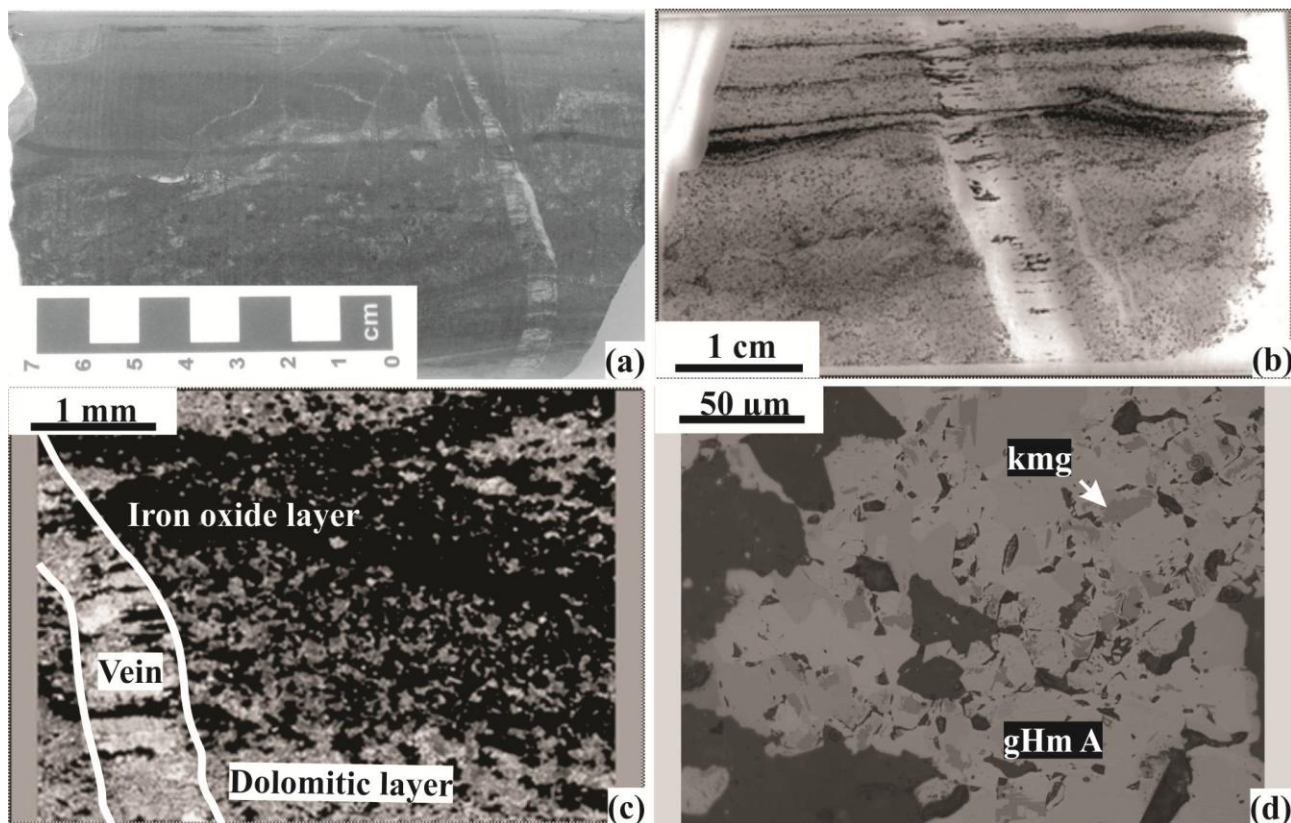


Figure 5.2. Dolomitic itabirite (DI) from the Esperança Deposit cross-cut by carbonate-quartz-specularite veins. (a) Hand specimen. (b) Thin section. (c) Transmitted light photomicrograph depicting iron oxide and dolomite layers and a crosscutting vein. (d) Reflected light photomicrograph from the iron oxide band exhibiting the complex intergrowth of granular hematite/martite (gHmA) crystals with kenomagnetite (kmg) relicts (dark gray portions indicated by the arrow).

Two distinct fibrous veins have been selected for analysis:

1. Carbonate-quartz-specularite vein in DI (Figure 5.5a). Crystals are medium- to coarse-grained ($>200\mu\text{m}$), which grew asymmetrically as syntaxial, elongated, straight to slightly curved fibers of calcite and dolomite, perpendicular to the sharp contact between the vein and the wallrock. Thin specularite plates (spH2A) grow from the iron

oxide bands giving a “layered” structure to the vein (Figures 5.5b and 5.5c). Quartz occurs as fibers in the middle of the vein together with specularite. On the other vein margin, carbonate grains are short and grow oblique to the wallrock towards the center. Chlorite crystals are also observed.

2. Quartz-specularite vein in high-grade ore also displays asymmetric growth fibers, comprised of elongated specularite (spH2B) that syntaxially grows from one vein wall towards the other. Sacaroidal quartz concentrates on the opposite wall (Figure 5.5d).

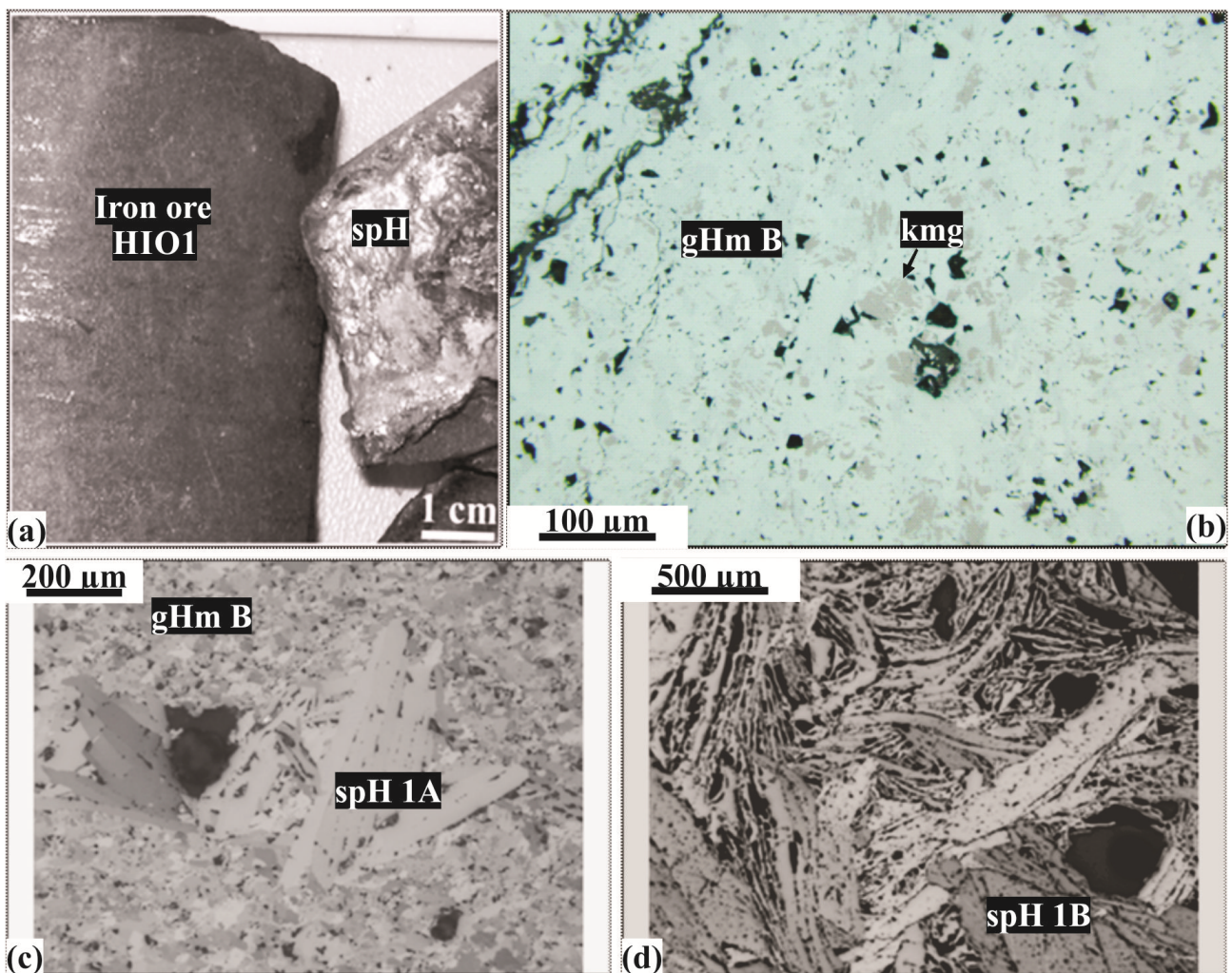


Figure 5.3. Textural features of high-grade iron ore 1 (HIO1) sample. (a) Hand specimen. (b) Fine grained granular hematite/martite (gHmB) crystals with kenomagnetite (kmg) relics comprising a massive texture with pores and microfractures. Plane polarized reflected light. (c) Platy hematite (spH1A) filling vugs in massive ore. Partially polarized reflected light. (d) Large specularite (spH1B) sheaves grown in irregular-shaped cavity of massive ore. Partially polarized reflected light.

5.7. RESULTS OF TRACE ELEMENT MICROCHEMISTRY (LA-ICP-MS)

LA-ICP-MS analyses were performed on different textural types of hematite observed in the studied samples from the Esperança Deposit: granular hematite from DI (gHmA; Figure 5.2d) and from high-grade iron ore (gHmB; Figures 5.3b, 5.3c and 5.4b); random specularite plates from sample HIO1 grown in vugs (spH1A; Figure 5.3c) and large cavities (spH1B; Figure 5.3d); and fibrous specularite from the veins (spH2A, sample DI; Figures 5.5a to 5.5c; spH2B, sample HIO2; Figure 5.5d). The obtained results and associated statistical data can be accessed in Appendix 2.

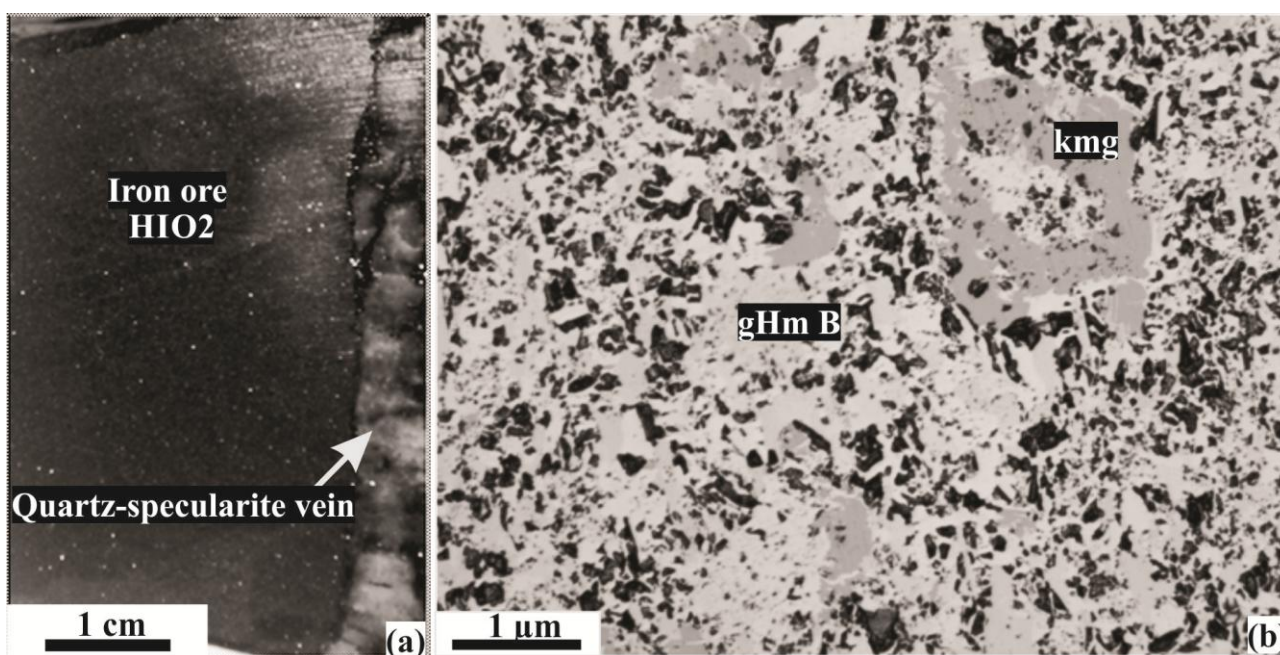


Figure 5.4. Textural features of high-grade iron ore 2 (HIO2) sample. (a) Hand specimen of massive ore cross-cut by a quartz-specularite vein. (b) Granular hematite/martite (gHmB) aggregates with kenomagnetite (kmg) relics. Plane polarized reflected light.

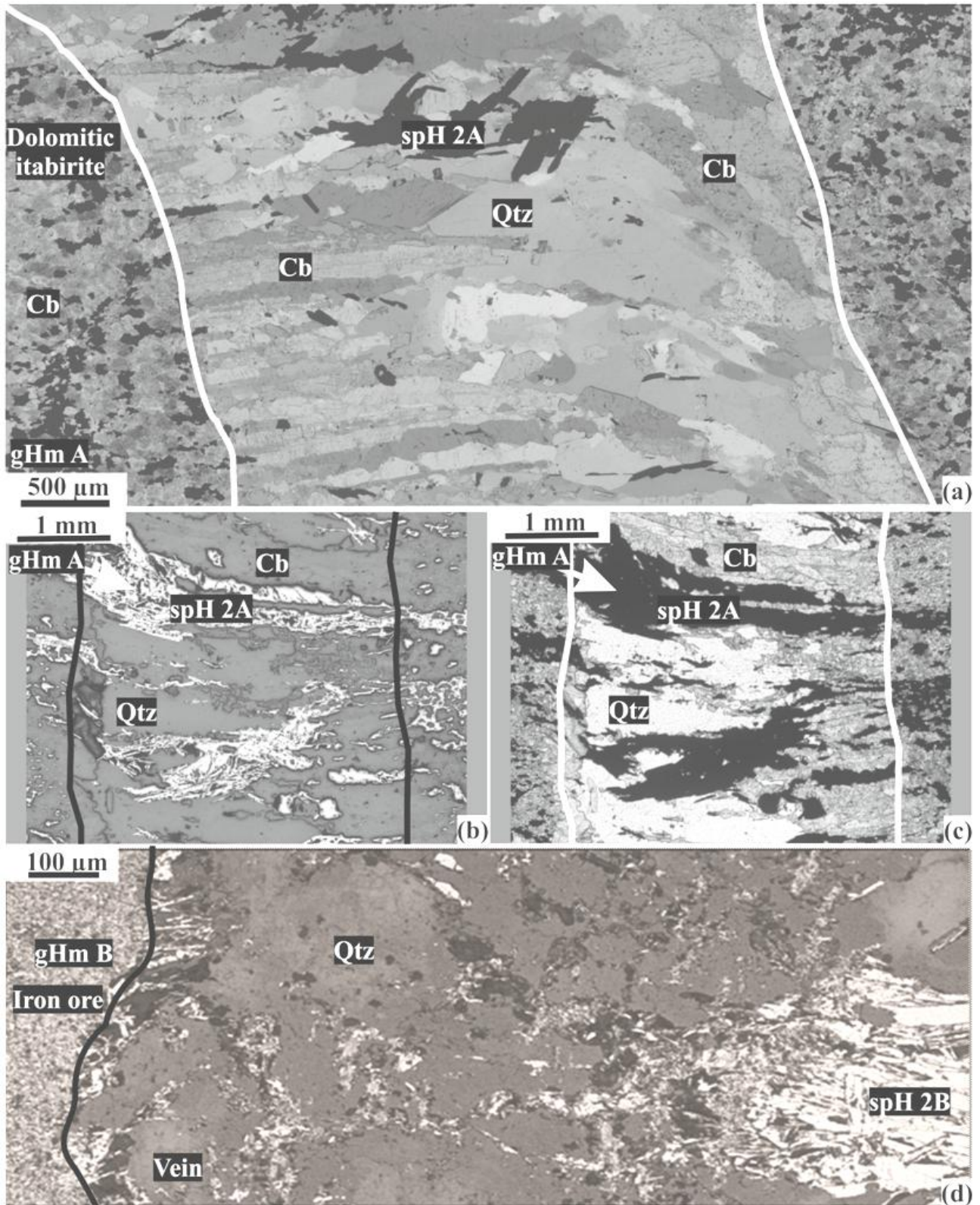


Figure 5.5. (a to c) Asymmetric carbonate (dolomite/calcite), quartz and specularite fibrous composite vein, crosscutting dolomitic itabirite (DI). (a). Fibrous syntaxial carbonate (Cb) and specularite crystals (spH2A) grow from the left wall. Carbonate crystals on the right wall are shorter and less elongated oblique to the wall. Antitaxial quartz crystals (Qtz) and specularite concentrate in the internal sector of the vein as long and wide crystals. Lines highlight the sharp contact between the rock and the vein. (b) Reflected light. (c) Transmitted light. (d) Quartz-specularite asymmetric vein from high-grade iron ore 2 (HIO2) sample.

Specularite fibers (spH2B) grow from one wall to the center of the vein. Quartz concentrates as saccharoidal crystals on the opposite wall.

Dolomitic itabirite:

Figures 5.6a and 5.6b display LA-ICP-MS trace element data from granular hematite (gHmA) and vein hosted specularite (spH2A). The trace element contents for both iron oxides are generally low (<100ppm), with the exceptions of Ti (gHmA = 211–397ppm, spH2A = 82–339ppm), Cr (gHmA = 78–107ppm, spH2A = 69–93ppm), Mg (gHmA = 912–71273ppm, spH2A = 3.5–1182ppm), Mn (gHmA = 337–5885ppm, spH2A = 90–250ppm), Al (gHmA = 98–451ppm, spH2A = 73–169ppm), and Si (gHmA = 1225–1668ppm, spH2A = 3888–105443ppm). In Figure 5.6b, the specularite data were normalized to the average values of the granular hematite. Specularite plates are depleted in most of the analyzed elements, particularly in Mg. Silica exhibits considerably high but variable contents.

High-grade iron ore 1:

Figures 5.6c and 5.6d show the composition of granular hematite (gHmB), platy hematite (spH1A), and specularite (spH1B) crystals. The trace element concentration for the three textural types is also very low, but with concentrations significantly higher than 10ppm in the following elements: Na (gHmB = 25–47ppm, spH1A = 2–21ppm, spH1B = 22–76ppm), Ti (gHmB = 60–86ppm, spH1A = 212–290ppm, spH1B = 264–455ppm), V (gHmB = 24–32ppm, spH1A = 49–56ppm, spH1B = 48–56ppm), Cr (gHmB = 89–112ppm, spH1A = 84–87ppm, spH1B = 78–91ppm), Mg (gHmB = 73–166ppm, spH1A = 4–28ppm, spH1B = BDL), Mn (gHmB = 160–343ppm, spH1A = 105–123ppm, spH1B = 91–108ppm) and Al (gHmB = 369–498ppm, spH1A = 88–184ppm, spH1B = 62–178ppm; Figure 5.6c). Specularite spH1A and spH1B crystals present very similar contents for most analyzed elements (Figures 5.6c and 5.6d). In Figure 5.6d, the data from spH1A and spH1B crystals are normalized to the average values of granular hematite (gHmB). Both spH1A and spH1B are relatively depleted in most of the analyzed elements compared to gHmB, except in Ti, V, and Nb. Chromium and Ga contents are similar in all three oxide types.

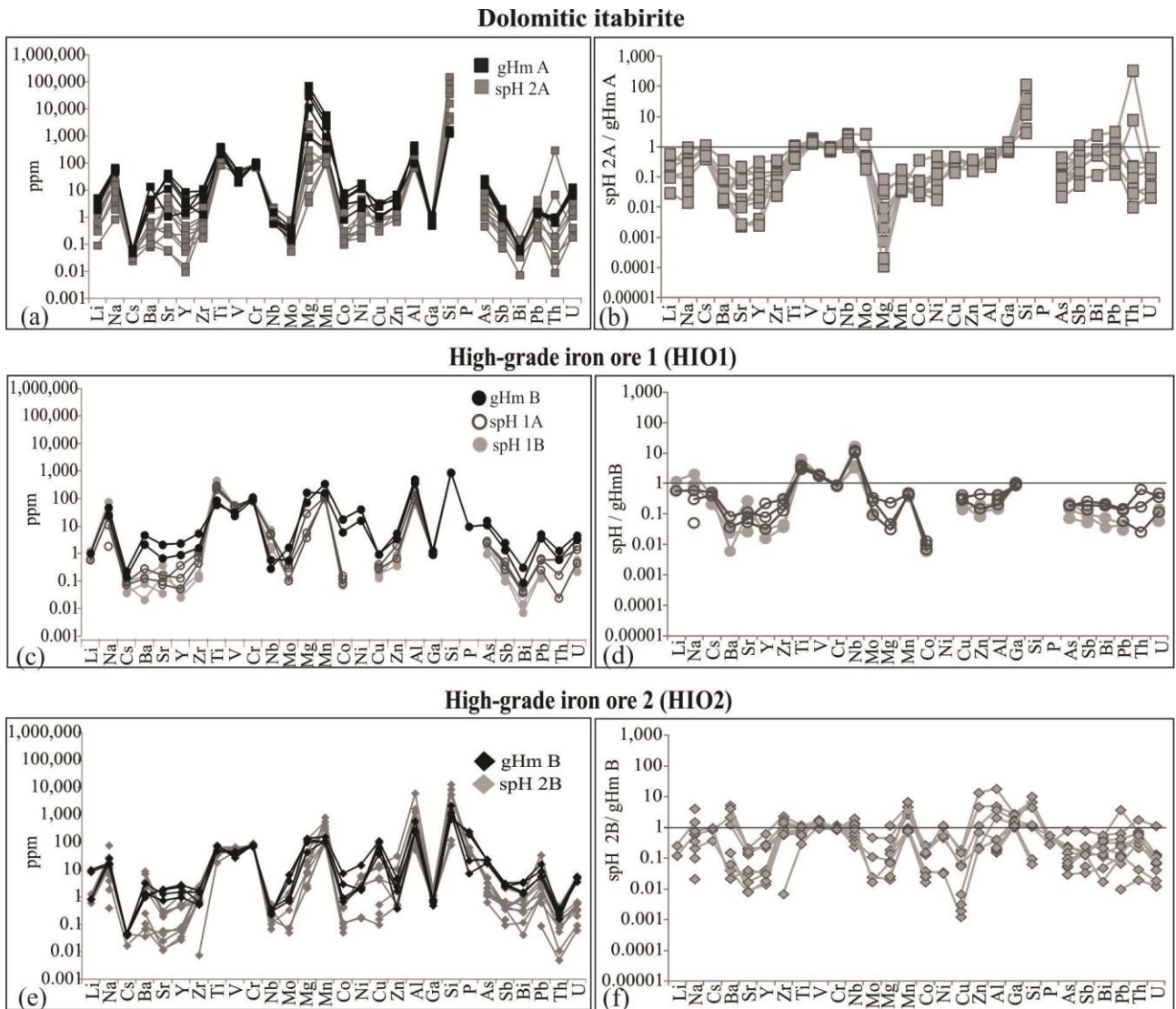


Figure 5.6. Spider diagrams with the results of trace elements for different iron oxides. Trace elements ordered according to their affinity due the charge density (Z/r). (a) Sample dolomitic itabirite (DI): absolute values for granular hematite (gHmA) grains and vein hosted specular hematite (spH2A). (b) Sample DI: spH2A contents normalized to the average values of gHmA. (c) Sample high-grade iron ore 1 (HIO1): absolute values for granular hematite (gHmB) grains; granular hematite (gHmB) and specular hematite (spH1A and spH1B) grains. Specular hematite (spH1A and spH1B). (d) Sample HIO1: spH1A and spH1B contents normalized to the average values of gHmB. (e) Sample high-grade iron ore 2 (HIO2): absolute values for granular hematite (gHmB) and vein hosted specularite (spH2B). (f) Sample HIO2: spH2B contents normalized to the average values of gHmB.

High-grade iron ore 2:

The contents of trace elements obtained for the iron oxides from sample HIO2 (Figures 5.6e and 5.6f) show a slightly more dispersed pattern than the other two samples, mainly for the specularite crystals (spH2B; Figure 5.6e). Only a few elements present concentrations significantly

higher than 10ppm: Ti (gHmB = 47–77ppm, spH2B = 18–74ppm), V (gHmB = 28–47ppm, spH2B = 35–68ppm), Cr (gHmB = 71–81ppm, spH2B = 65–93ppm), Mg (gHmB = 43–127ppm, spH2B = 2–120ppm), Mn (gHmB = 100–157ppm, spH2B = 84–811ppm), Al (gHmB = 233–582ppm, spH2B = 53–6148ppm), Si (gHmB = 690–2170ppm, spH2B = 82–12841ppm), and P (gHmB = 7–245ppm, spH2B = 34–65ppm). Specularite (spH2B) values were normalized to the average contents of granular hematite (gHmB) from this sample (Figure 5.6f), revealing a strong depletion of most elements for spH2B, except for a relative enrichment of Mn and Si. The contents of Ti, V, Cr, and Ga remained fairly constant.

In order to quantify the chemical differences between the textural types of hematite from the DI and the high-grade iron ore samples, the different analytical results were normalized with respect to the average values determined in the granular hematite (gHmA) from DI (Figure 5.7). These values were considered suitable for the normalization once this hematite generation represents the earliest iron oxide available in the studied samples. The patterns of the trace element distribution of granular hematite from the high-grade iron ore samples (gHmB) are very similar to the patterns from gHmA grains although some distinctions are present. The contents of V, Cr, Al, Ga, Si, As, and Sb remained constant in both grain types, whereas the elements Sr, Mg, and Mn are depleted and Mo, Cu, Bi, and Pb are enriched in the high-grade ore sample (Figure 5.7a).

Trace element concentrations are very similar when compared to each other in all specular hematite types (Figure 5.7b) but strongly depleted when compared with the values from gHmA. Cr, Ga, and V contents remain, nevertheless, approximately constant in all analyzed oxide types (Figures 5.7 and 5.8).

5.7.1. Strontium, Manganese and Magnesium Correlations

Mg, Mn and Sr are major elements that substitute each other in the structure of the carbonates. The LA-ICP-MS analytical results from the hematite crystals from Esperança samples present strong and geochemically significant Pearson linear correlation coefficients for the couples Sr/Mg (0.98), Sr/Mn (0.96), and Mg/Mn (0.99), as illustrated in the binary logarithmic (Figure 5.9) and ternary (Figure 5.10) plots. From these diagrams, it is evident that granular hematite (gHmA) grains from the DI are significantly richer in Sr, Mn, and Mg than the iron oxides from both hard ore and veins (Figures 5.9 and 5.10).

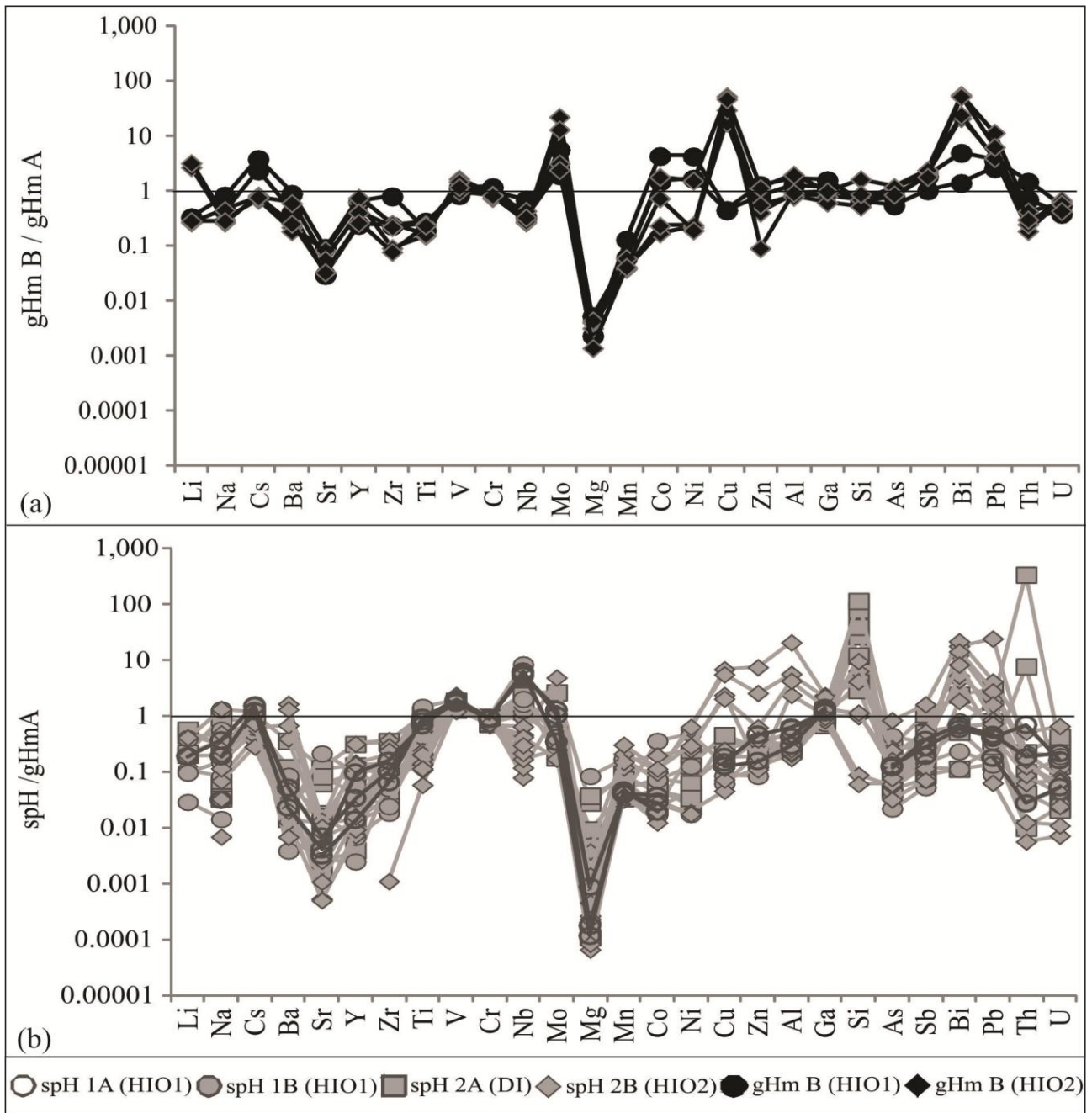


Figure 5.7. Spider diagrams of the analyzed contents normalized to the average values of gHmA. (a) Granular hematite from high-grade iron ore (gHmB). (b) Specularite (spH1A, 1B, 2A and 2B).

There is a progressive decrease in the relative contents of Mg and Sr from the gHmA grains to high-grade gHmB and then to high-grade iron ore specularite (spH1A, spH1B, and spH2B). In contrast, the behavior presented by Mn shows a relative increase from the granular Hm to the

younger specularite plates found in the high-grade ore sample (spH1A, spH1B, and spH2B). In the spH2A platelets from itabirite, on the other hand, the contents of Mg, Mn, and Sr exhibit stronger variations than the other hematite generations (Figure 5.10).

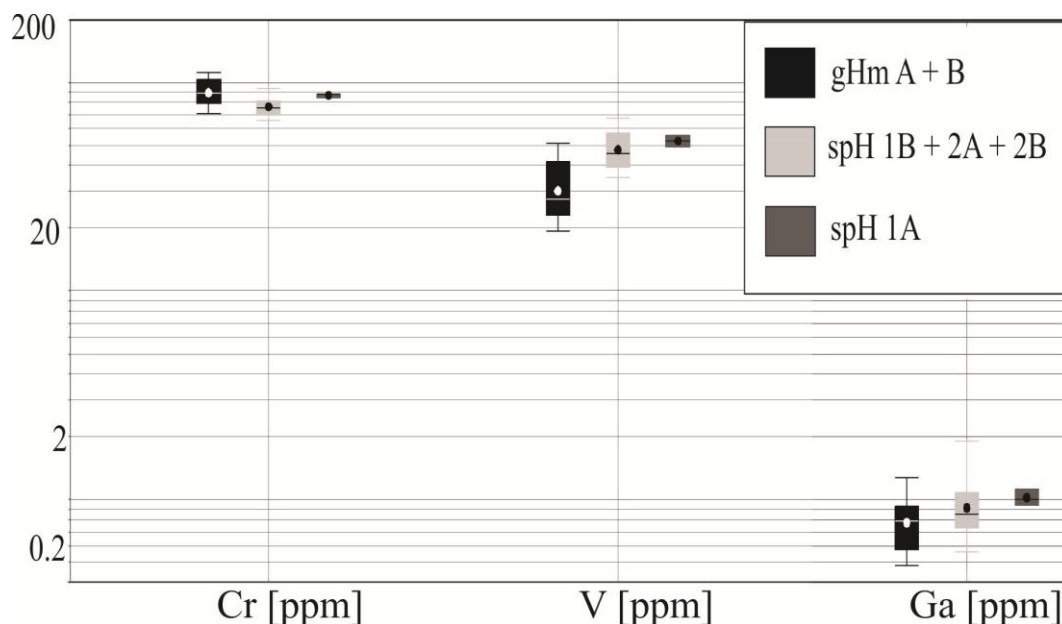


Figure 5.8. Box diagram showing the small variations of Cr, V, and Ga contents in all iron oxides. Whisker: maximum and minimum; box: 50% of data (Q1-Q3); line: median; circle: mean.

5.7.2. Titanium, Chromium and Vanadium Mobility

The narrow ranges of values for Cr and V suggest that these elements behaved largely immobile during the formation of the different textural types of hematite (Figure 5.8). On the other hand, the Ti contents present a relative variation in comparison with Cr and V as indicated in Figure 5.11. This relation is represented by the trajectories I and II in Figure 5.11, which indicate the relative decreasing values of Ti from gHmA to gHmB (trajectory I) and from spH1A and 1B to spH2A and 2B (trajectory II).

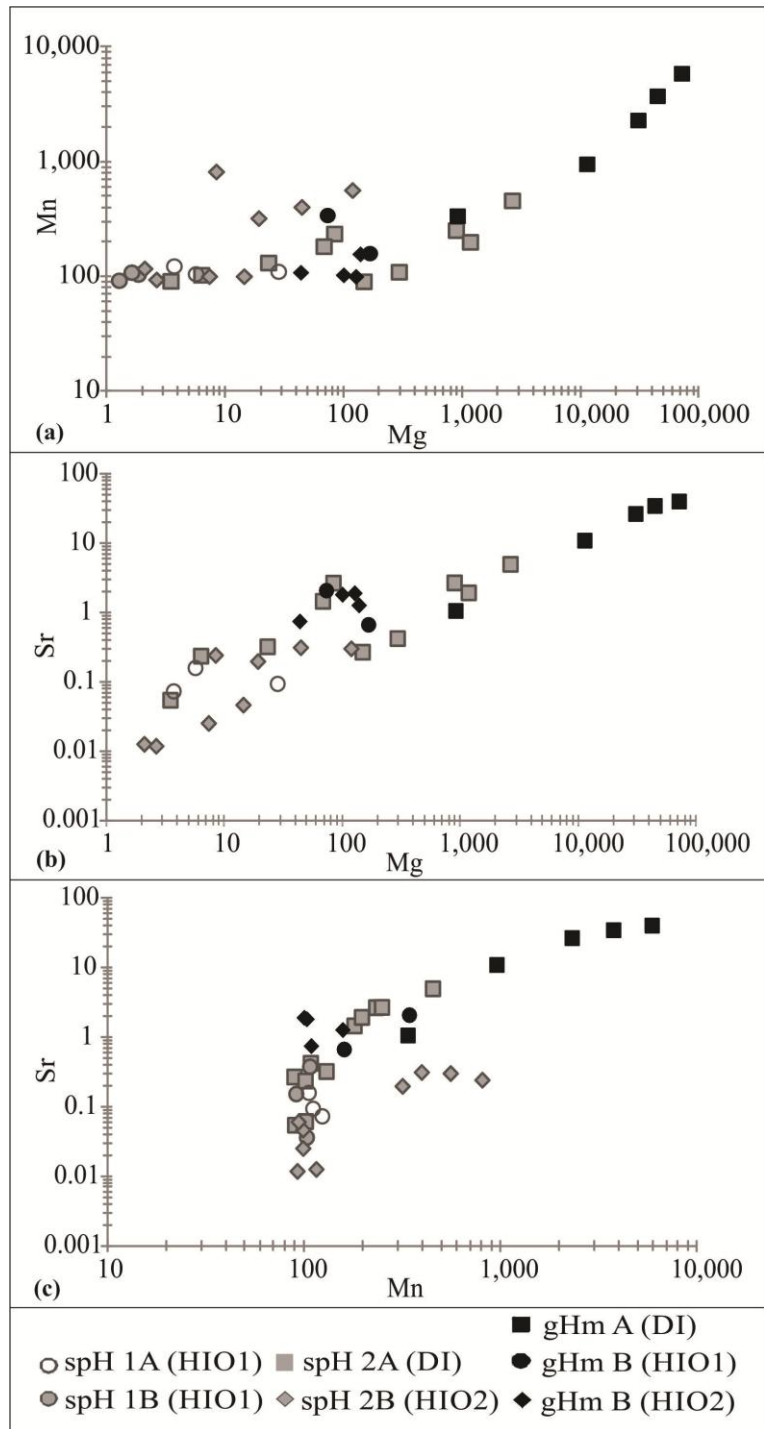


Figure 5.9. Binary logarithmic plots correlating Mg, Mn, and Sr for iron oxides. (A) Mn versus Mg (0.99). (B) Sr versus Mg (0.98). (C) Sr versus Mn (0.96).

5.7.3. Rare Earth Elements and Yttrium Behavior

The REE-Y contents in the iron oxides were normalized with respect to Post Archean Average Shale (PAAS; McLennan 1989; Figure 5.12). The Σ REE values (Tables 5.1 to 5.4) are very low for all analyzed iron oxides, but higher for granular hematite grains (between 3 and 15ppm) than for the younger specularite plates (< 5ppm).

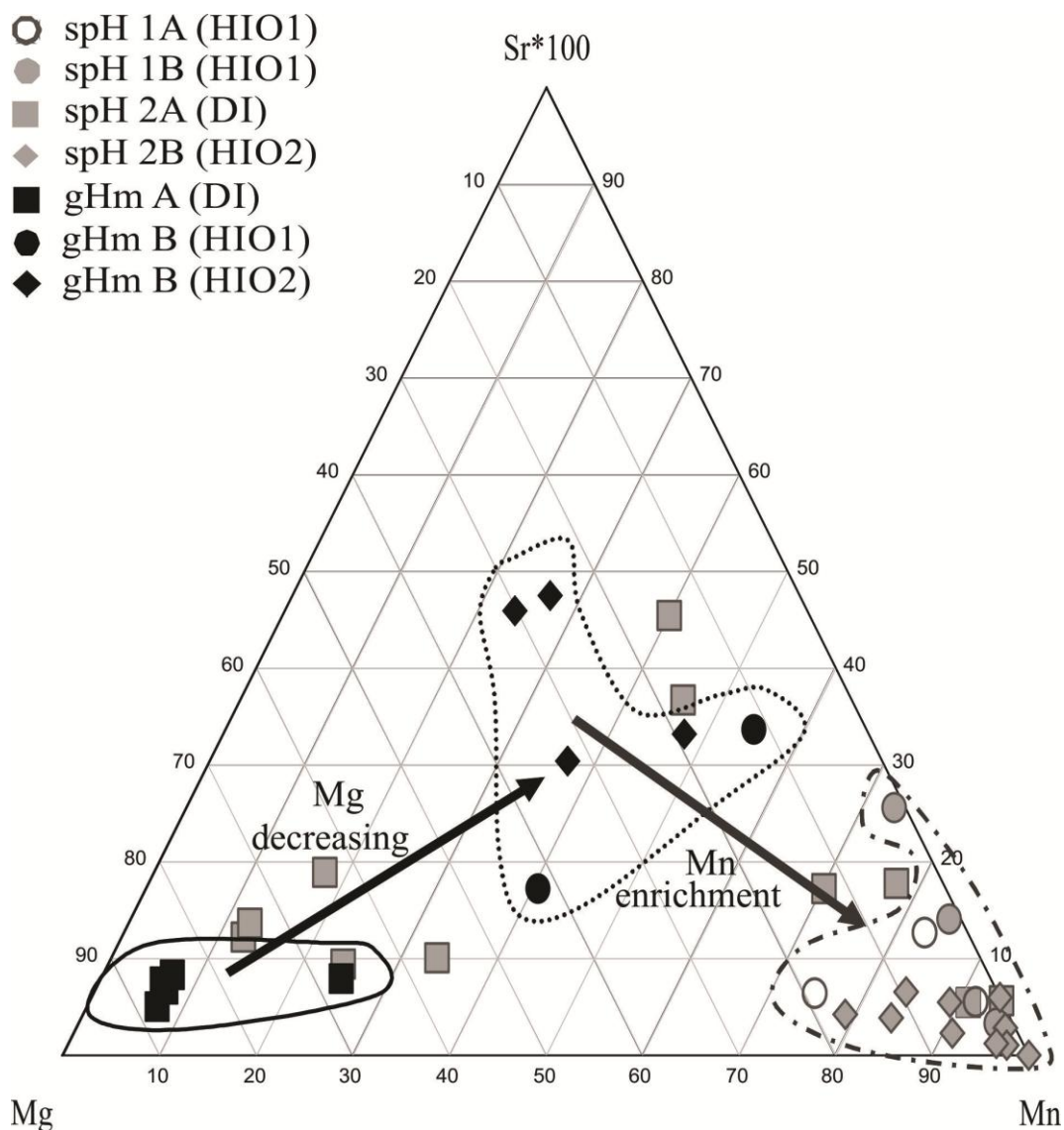


Figure 5.10. Ternary diagram of the relative concentration (ppm) of Sr*100, Mg, and Mn from the different textural types of hematite.

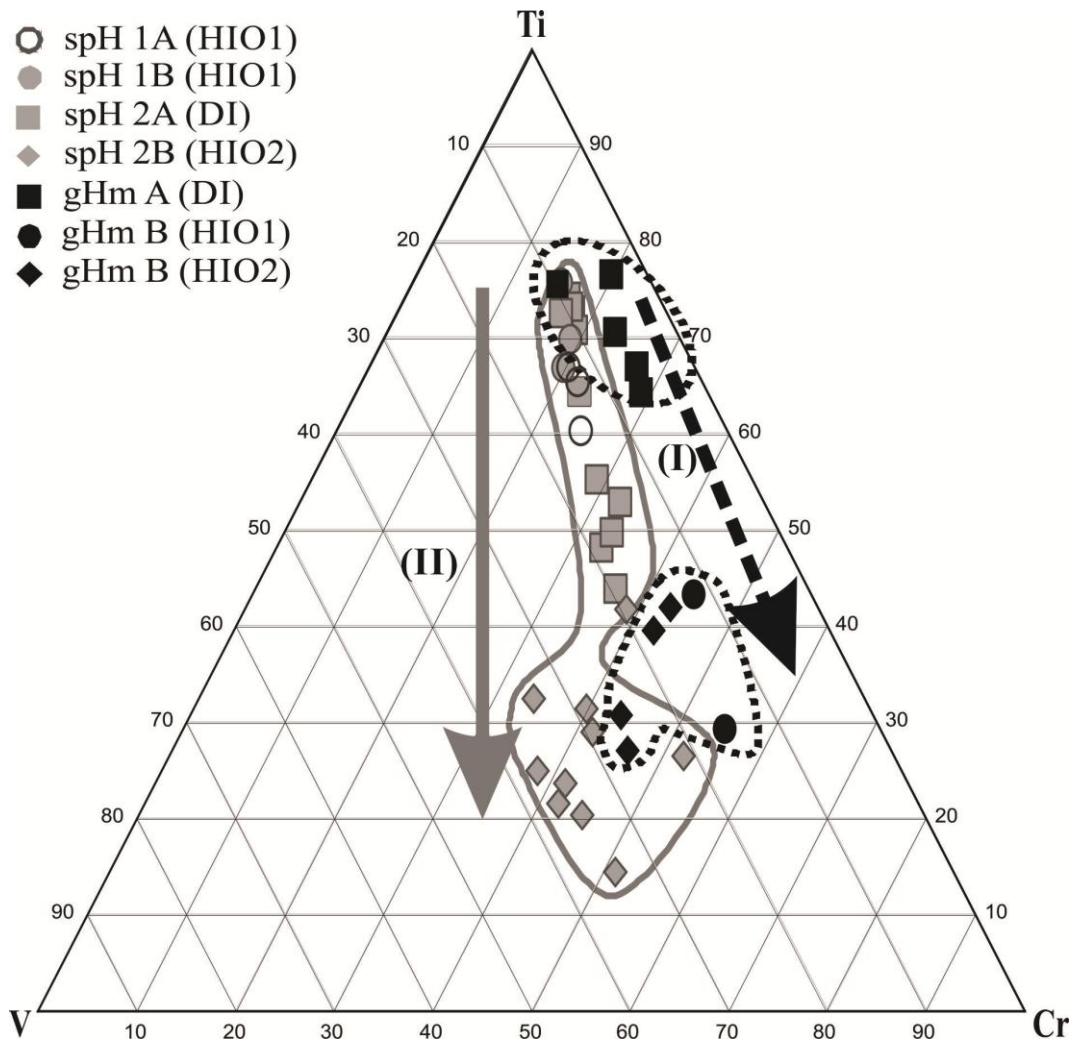


Figure 5.11. Vanadium, Chromium and Titanium relative concentration (ppm) ternary diagram presenting trends of mobility of Ti in all different iron oxide generations.

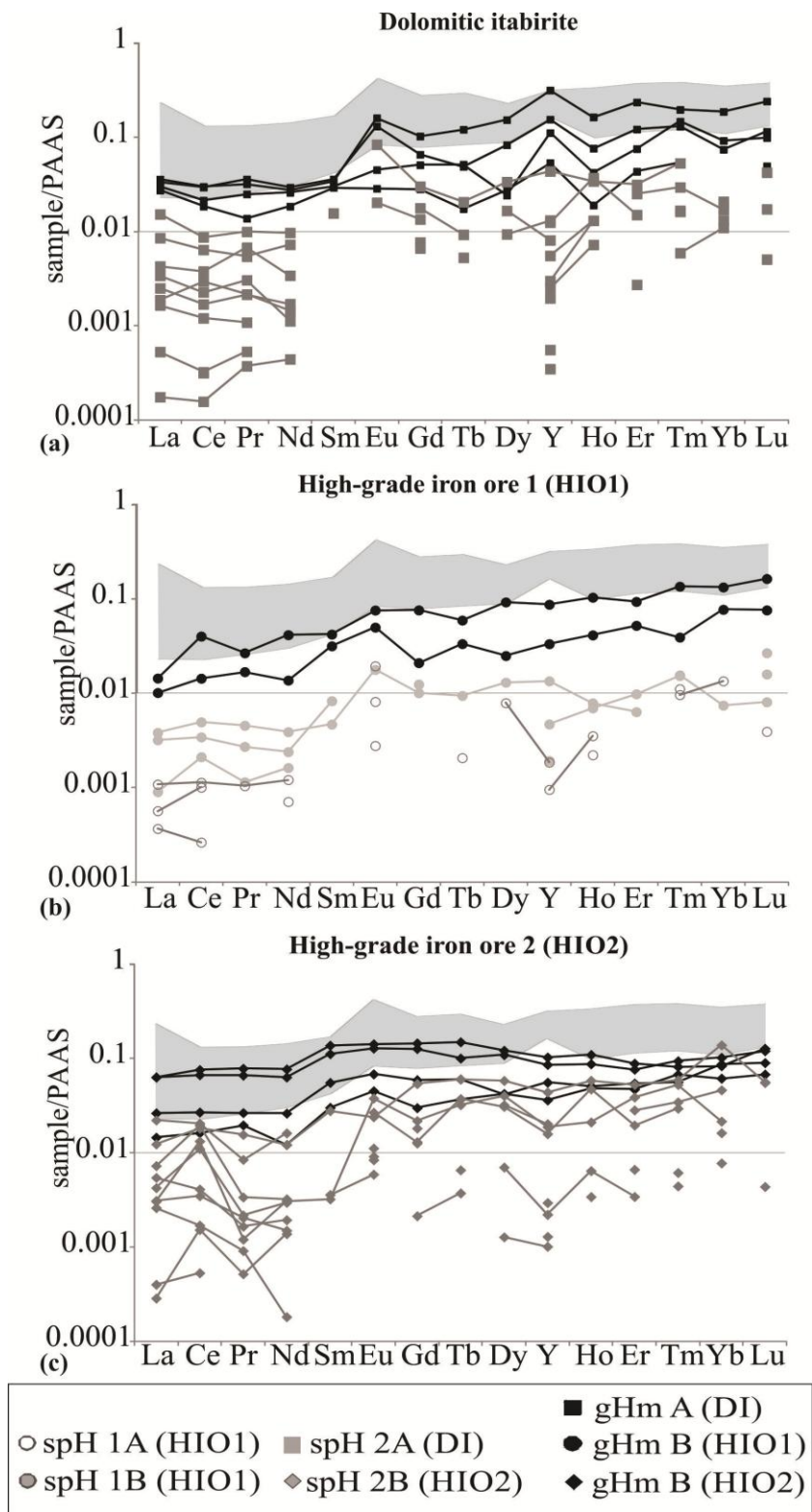


Figure 5.12. The rare earth elements and yttrium spider diagram PAAS normalized (McLennan 1989) for the different generations of iron oxide: (a) Dolomitic itabirite. (b) High-grade iron ore 1 (HIO1). (c) High-grade iron ore 2 (HIO2). Shaded light blue are the whole rock geochemical data from Spier *et al.* (2007) for dolomitic itabirite from the Águas Claras deposit.

Table 5.1. Rare earth elements and yttrium data obtained by LA-ICP-MS for granular hematite from samples dolomitic itabirite, high-grade iron ore 1 and high-grade iron ore 2.

Sample	DI (gHmA)					HIO1 (gHmB)		HIO2 (gHmB)			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6
La	1.374	1.048	1.158	1.287	1.498	0.551	0.387	2.430	2.420	1.010	0.558
Ce	2.390	1.478	1.710	2.350	2.009	3.200	1.144	5.350	6.060	2.150	1.300
Pr	0.283	0.122	0.221	0.318	0.233	0.236	0.149	0.587	0.693	0.235	0.174
Nd	0.930	0.628	0.880	1.000	0.515	1.410	0.465	2.150	2.620	0.891	0.414
Sm	0.189	0.163	0.167	0.200	0.106	0.234	0.176	0.623	0.766	0.309	0.168
Eu	0.174	0.031	0.049	0.142	0.054	0.082	0.054	0.139	0.154	0.074	0.049
Gd	0.480	0.132	0.238	0.307	0.121	0.355	0.098	0.593	0.679	0.277	0.140
Tb	0.094	0.014	0.040	0.038	0.019	0.046	0.026	0.078	0.116	0.047	0.029
Dy	0.720	0.129	0.114	0.390	0.177	0.433	0.117	0.513	0.570	0.194	0.199
Y	8.560	1.450	3.020	4.200	1.492	2.360	0.902	2.330	2.790	1.510	0.980
Ho	0.163	0.019	0.042	0.076	0.039	0.103	0.041	0.087	0.109	0.051	0.048
Er	0.675	0.124	0.216	0.348	0.166	0.267	0.149	0.219	0.253	0.156	0.135
Tm	0.080	0.022	0.060	0.053	0.011	0.055	0.016	0.038	0.033	0.023	0.028
Yb	0.530	BDL	0.261	0.210	0.098	0.376	0.218	0.289	0.236	0.246	0.174
Lu	0.105	0.022	0.043	0.050	0.021	0.071	0.033	0.052	0.055	0.039	0.030
ΣREE	8.187	3.931	5.199	6.769	5.068	7.419	3.073	13.149	14.765	5.702	3.445
La/Yb_{PAAS}	0.191		0.328	0.452	1.128	1.465	1.775	8.408	10.254	4.106	3.207
Sm/Yb_{PAAS}	0.181		0.325	0.484	0.550	0.622	0.807	2.156	3.246	1.256	0.966
Pr/Pr*_{PAAS}	1.116	0.745	1.055	1.220	1.305	0.654	1.202	1.018	1.023	0.999	1.381
Eu/Eu*_{PAAS}	2.720	0.995	1.157	2.698	2.245	1.340	1.936	1.077	1.006	1.191	1.505
Y/Y*_{PAAS}	1.993	2.342	3.481	1.946	1.432	0.891	1.039	0.880	0.893	1.214	0.800
Ce/Ce*_{PAAS}	0.883	0.900	0.776	0.847	0.769	1.954	1.064	1.033	1.074	1.018	0.952
Y/Ho	52.515	76.720	71.905	55.263	38.256	22.913	22.000	26.782	25.596	29.783	20.417

DI: dolomitic itabirite; gHmA: granoblastic hematite/martite from dolomitic itabirite; HIO1: high-grade iron ore 1; gHmB: granoblastic hematite/martite from high grade iron ore; HIO2: high-grade iron ore 2; REE: rare earth elements; PAAS: Post Archean Average Shale.

The REE-Y spidergrams of granular hematite crystals from DI (gHmA) are very similar to those for BIF whole rock analyses reported by Spier *et al.* (2007) from the Quadrilátero Ferrífero (Figure 5.12). They show generally low light/heavy rare earth elements (LREE/HREE) ratio with (La/Yb)_{PAAS} and (Sm/Yb)_{PAAS} varying from 0.19 to 1.13 and from 0.18 to 0.55, respectively, and present positive anomalies of both Eu (0.90–2.72) and Y (1.43–3.48; Table 5.1). The granular hematite from high-grade iron ore (gHmB) present higher values for (La/Yb)_{PAAS} (1.5–10.25) and (Sm/Yb)_{PAAS} (0.62–3.25); lower Eu anomaly (1.0–1.9) and nearly no Y anomaly (0.8–1.2; Table 5.1). Specularite crystals present very low ΣREE with several single analytic values below the

detection limit (BDL), preventing the calculation of Eu and Y anomalies for these minerals (Tables 5.2 to 5.4).

Most of the granular hematite (gHmA) and specularite (spH2A) from the DI sample show true negative Ce anomaly (*sensu* Bau & Dulski 1996), whereas iron oxides from high-grade iron ore show nearly positive or no Ce anomalies (Figure 5.13).

In a CHARGE-and-RADIUS-Controlled (CHARAC) geochemical system, a twin pair element with similar charge and radius, like in the case of Y-Ho, should present a consistent behavior and preserve their chondritic ratio, $24 < Y/Ho < 34$ (Bau 1996). However, the primitive relationship between these two elements is not expected in aqueous solution due to their fractionation controlled by chemical interactions with the fluid leading to higher Y/Ho ratios (Minami *et al.* 1998). Fractionation of these elements in seawater occurs most probably by scavenging of Ho by particulate matter, resulting in the hyperchondritic values of 44 to 74 as found in modern oceans, which is higher than for shales (~ 27 ; Bau 1996, Nozaki *et al.* 1997). Early Paleoproterozoic BIFs, considered to reflect chemical conditions of ancient oceans, have positive Y anomalies and an average Y/Ho ratio of 39 (Planavsky *et al.* 2010).

The Y/Ho ratios were calculated for all iron oxides from the Esperança samples. The results are plotted in a Y *versus* Y/Ho diagram and compared to chondritic (CHARAC) and seawater value ranges (Figure 5.14). Granular hematite from DI (gHmA) exhibit Y/Ho ratios (38–77) near the seawater field (Figure 5.14). Granular hematite from high-grade iron ore (gHmB), HIO1 (22–23) and HIO2 (20–30) present Y/Ho ratios within or close to the CHARAC field, whereas spH2A (6–34) has near-chondritic or subchondritic ratios. Specularite from high-grade iron ore (spH1A = 18–47; spH1B = 7; and spH2B = 9–24) shows a widespread pattern of Y/Ho ratios, from near chondritic to subchondritic values.

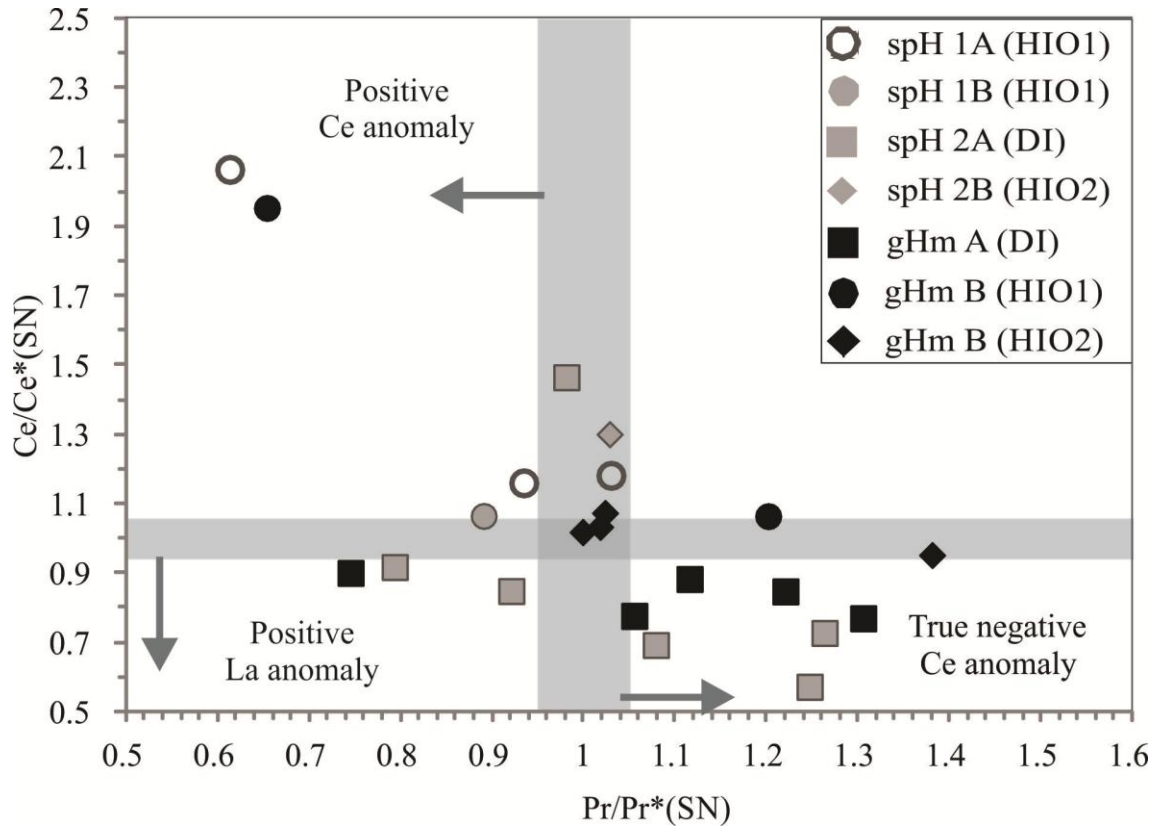


Figure 5.13. Discriminative plot of $(Ce/Ce^*)_{SN}$ versus $(Pr/Pr^*)_{SN}$. Negative Ce anomaly is defined by Bau & Dulski 1996 as $(Ce/Ce^*)_{SN} = Ce_{SN}/[0.5(Pr_{SN} + La_{SN})] < 1$ and $(Pr/Pr^*)_{SN} = Pr_{SN}/[0.5(Ce_{SN} + 0.5Nd_{SN})] > 1$.

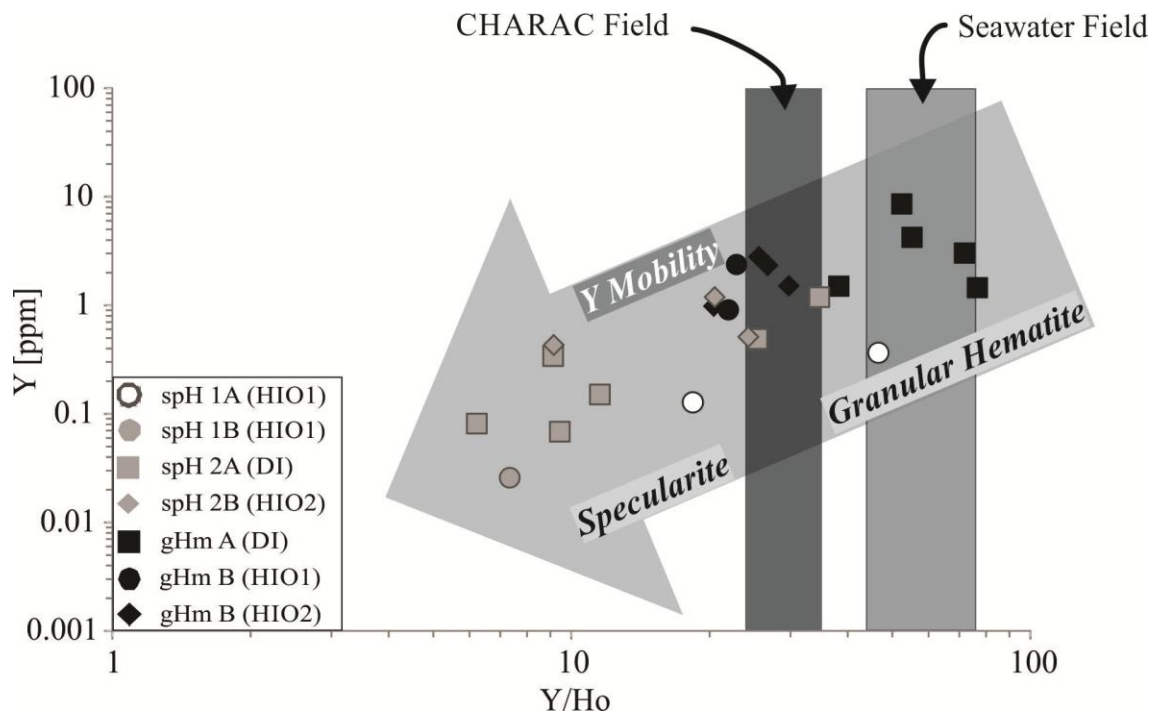


Figure 5.14. Yttrium versus Y/Ho diagram (Bau 1996) with data from all iron oxide generations from the three studied samples (DI, HIO1, and HIO2) from the Esperança Deposit. The results are compared with CHARAC and seawater field.

Table 5.2. Rare earth elements and yttrium data obtained by LA-ICP-MS for specularite from sample high-grade iron ore 1.

Sample	HIO1					
	spH1A-1	spH1A-2	spH1A-3	spH1B-1	spH1B-2	spH1B-3
La	0.146	0.034	0.122	0.014	0.041	0.022
Ce	0.394	0.168	0.273	0.021	0.090	0.080
Pr	0.040	0.010	0.024	BDL	0.009	BDL
Nd	0.132	0.055	0.081	BDL	0.041	0.024
Sm	0.026	BDL	0.046	BDL	BDL	BDL
Eu	0.019	BDL	BDL	0.021	0.003	0.009
Gd	0.047	BDL	0.058	BDL	BDL	BDL
Tb	0.007	BDL	BDL	BDL	0.002	BDL
Dy	0.061	BDL	BDL	BDL	BDL	0.037
Y	0.364	0.052	0.127	BDL	0.026	0.050
Ho	0.008	BDL	0.007	0.002	0.004	BDL
Er	0.018	BDL	0.028	BDL	BDL	BDL
Tm	BDL	0.006	0.006	0.004	BDL	0.005
Yb	BDL	0.021	BDL	0.038	BDL	BDL
Lu	0.012	0.004	0.007	BDL	BDL	0.002
ΣREE	0.910	0.298	0.652	0.100	0.190	0.178
La/Yb_{PAAS}		1.638		0.368		
Sm/Yb_{PAAS}		0.000		0.000		
Pr/Pr*_{PAAS}	1.030	0.613	0.934		0.890	
Eu/Eu*_{PAAS}	2.586		0.000			
Y/Y*_{PAAS}	1.331					
Ce/Ce*_{PAAS}	1.182	2.065	1.160	1.433	1.065	3.555
Y/Ho	46.667		18.406		7.343	

HIO1: high-grade iron ore 1; spH1A: large platy hematite (specularite) found in vugs in high grade iron ore 1; spH1B: elongated coarse platy crystals (specularite) filling open spaces or fractures in high grade iron ore 1 (the numbers are for different crystals analysed); REE: rare earth elements; PAAS: Post Archean Average Shale.

Tabela 5.3. Rare earth elements and yttrium data obtained by LA-ICP-MS for specularite crystals from the vein that cross-cut sample dolomitic itabirite.

Sample	DI (spH2A)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
La	0.905	0.072	0.584	0.327	0.020	0.096	0.063	BDL	0.007	0.164	0.130
Ce	1.178	0.236	0.696	0.511	0.026	0.135	0.096	0.025	0.013	0.302	0.181
Pr	0.099	0.019	0.088	0.048	0.005	0.019	0.010	BDL	0.003	0.060	0.027
Nd	0.324	0.049	0.330	0.247	BDL	0.058	BDL	0.047	0.015	0.116	0.038
Sm	0.096	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.087	BDL	BDL	BDL	BDL
Eu	0.024	BDL	BDL	0.091	BDL	0.022	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Gd	0.022	BDL	0.083	0.141	BDL	0.063	0.031	BDL	BDL	BDL	0.036
Tb	BDL	BDL	0.007	0.016	BDL	BDL	BDL	BDL	0.004	BDL	BDL
Dy	BDL	BDL	BDL	0.158	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.044	0.078
Y	0.488	0.068	0.338	1.180	0.053	0.081	0.150	0.015	0.009	0.356	0.219
Ho	0.019	0.007	0.037	0.034	BDL	0.013	0.013	BDL	BDL	BDL	BDL
Er	0.069	BDL	0.043	0.090	BDL	BDL	BDL	BDL	0.008	0.072	BDL
Tm	0.022	0.002	BDL	0.022	BDL	0.007	BDL	BDL	BDL	0.012	0.007
Yb	0.091	0.031	0.059	BDL	BDL	BDL	0.037	BDL	BDL	0.048	BDL
Lu	0.020	BDL	BDL	BDL	0.018	0.008	BDL	BDL	0.002	BDL	BDL
ΣREE	2.869	0.417	1.927	1.685	0.069	0.420	0.337	0.072	0.052	0.818	0.497
La/Yb_{PAAS}	0.734	0.171	0.731				0.126			0.252	
Sm/Yb_{PAAS}	0.536	0.000	0.000				1.195			0.000	
Pr/Pr*_{PAAS}	0.921	0.981	1.079	0.793	3.297	1.263	1.803		1.247	1.883	1.801
Eu/Eu*_{PAAS}	2.459						0.000				
Y/Y*_{PAAS}											
Ce/Ce*_{PAAS}	0.848	1.465	0.692	0.917	0.609	0.727	0.881		0.572	0.684	0.704
Y/Ho	25.417	9.444	9.135	34.706		6.231	11.538				

DI: dolomitic itabirite; spH2A: thin specularite plates from the carbonate-quartz-specularite vein in dolomitic itabirite; BDL: below the detection limit; REE: rare earth elements; PAAS: Post Archean Average Shale.

Table 5.4. Rare earth elements and yttrium data obtained by LA-ICP-MS for specularite crystals from the vein that cross-cut sample high-grade iron ore 2.

Sample	HIO2 (spH2B)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
La	0.279	0.015	0.163	0.473	0.117	0.011	0.850	0.100	0.209	0.119
Ce	1.560	0.043	0.881	1.450	1.060	0.122	1.640	0.136	0.328	0.279
Pr	0.030	BDL	0.019	0.138	0.011	0.005	0.075	0.008	0.015	0.018
Nd	0.110	BDL	0.101	0.413	0.105	0.047	0.550	0.006	0.066	0.051
Sm	BDL	0.020	BDL	0.155	0.018	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Eu	0.029	0.006	BDL	0.026	0.041	0.009	BDL	BDL	0.012	0.010
Gd	0.061	BDL	0.085	0.252	0.102	BDL	0.059	0.010	BDL	BDL
Tb	0.029	BDL	BDL	0.047	0.025	BDL	BDL	0.003	BDL	0.005
Dy	0.145	BDL	0.151	0.273	0.189	0.006	BDL	BDL	0.033	BDL
Y	0.430	BDL	0.549	1.190	0.510	0.028	0.080	0.035	0.060	0.060
Ho	0.047	0.003	BDL	0.058	0.021	BDL	BDL	BDL	0.006	BDL
Er	0.056	BDL	0.081	0.151	0.111	BDL	0.019	BDL	0.010	BDL
Tm	0.012	BDL	0.014	0.024	0.021	BDL	BDL	0.002	BDL	0.003
Yb	BDL	BDL	0.131	0.392	0.061	0.022	0.046	BDL	BDL	BDL
Lu	0.024	BDL	BDL	0.024	BDL	BDL	BDL	0.002	BDL	BDL
ΣREE	2.382	0.088	1.626	3.876	1.882	0.222	3.239	0.267	0.679	0.485
La/Yb_{PAAS}			1.244	1.207	1.918	0.500	18.478			
Sm/Yb_{PAAS}			0.000	0.395	0.295	0.000	0.000			
Pr/Pr*_{PAAS}	0.297		0.311	1.028	0.148	0.357	0.461	0.970	0.549	0.818
Eu/Eu*_{PAAS}				0.619	4.506					
Y/Y*_{PAAS}	0.415			0.754	0.646				0.329	
Ce/Ce*_{PAAS}	3.663	2.649	3.430	1.301	6.231	3.789	1.340	0.967	1.155	1.357
Y/Ho	9.149			20.517	24.286				9.375	

HIO2: high-grade iron ore 2; spH2B: elongated specularite from the quartz-specularite vein in high grade iron ore 2; BDL: below the detection limit; REE: rare earth elements; PAAS: Post Archean Average Shale.

5.8. DISCUSSION

Textural relationships in the samples from the Esperança Deposit indicate that magnetite is the oldest iron oxide species. Magnetite forms relics in granular hematite/martite aggregates (Figures 5.2d, 5.3b and 5.4b) in both DI (gHmA) and high-grade iron ore (gHmB). Similar to the ores from other deposits located in the Quadrilátero Ferrífero (Hackspacher 1979, Rosière 1981, Rosière & Chemale Jr. 1991), magnetite appears commonly as the pink-brown kenomagnetite (Kullerud *et al.* 1969, Morris 1980, Rosière 1981). Kenomagnetite is a partially oxidized, Fe²⁺-deficient oxide that is commonly associated with iron enrichment and the formation of high-grade ore bodies (Rosière *et al.* 2008). The progressive oxidation of magnetite leads to the formation of kenomagnetite/maghemite and hematite (martite). They comprise an aggregate of crystallographically defective grains with free Fe²⁺ sites (Kullerud *et al.* 1969) that are complex intergrowths and exhibit tiny inclusions and micropores as well as lower reflectivity. The large numbers of Fe²⁺ free sites in granular hematite (martite) host the high concentration of cations such as Mn, Mg, Sr, Ti, Cr, and V with similar charge density.

Comparison of trace element contents of the granular hematite/martite grains from DI (gHmA) and from high-grade iron ore samples (gHmB) reveals significant variations, suggesting a geochemical alteration trend associated with the iron enrichment process. The contents of V, Cr, Al, Ga, Si, As, and Sb remain constant (immobile), whereas Sr, Mg, and Mn become fractionated and relatively depleted and Mo, Cu, Bi, and Pb are relatively enriched.

Trace elements spidergrams of the four discriminated types of specularite (iron ore cavities: spH1A and spH1B; DI vein: spH2A; and iron ore vein: spH2B) display similar patterns with depletion in nearly all elements when compared with granular hematite (gHmA and gHmB) from itabirite and high-grade iron ore. Platy hematite crystals in veins and vugs as well as in all schistose ore types are the product of solution-precipitation processes (Rosière *et al.* 2013b).

The present results indicate a high dilution of all elements in the newly precipitated grains although some distinctive characteristics are still noticeable for each platy hematite and schistose ore types:

- Specularite crystals found in cavities (spH1A and spH1B) have similar elemental distribution than vein specularite (spH2A and 2B), but with slightly higher contents of Ti and Nb indicating they were precipitated from very similar fluids.
- Specularite crystals from the carbonate-quartz vein (spH2A) in DI exhibit Cs, Ti, V, Cr, Nb, and Ga contents similar to gHmA indicating an affinity of the new vein crystals with the host rock.
- Mn contents in the specularite crystals from the vein in high-grade iron ore (spH2B) are relatively higher than in the spH2A plates (Figure 5.7). Its presence and concentration is dependent on two main factors: the availability of this element in the fluid and the variation in the oxidation state. Mn must have been mobilized from the carbonates of the itabirite occupying octahedral sites in the new precipitated specularite platelets as discussed next.
- The relatively elevated Si content found in some specularite crystals from the veins (spH2A and spH2B; Figures 5.6a and 5.6b) is still subject of debate. Possibly, it could represent submicroscopic quartz inclusions or intergrowths that co-precipitated with hematite.

5.8.1. Behavior of Manganese, Magnesium and Strontium

The Sr^{2+} (1.13Å), Mn^{2+} (0.80Å), Mn^{3+} (0.64Å) and Mg^{2+} (0.65Å) are cations that can readily substitute Fe^{2+} (0.76Å) and Fe^{3+} (0.64Å) in iron oxide minerals due to their charge density (Railsback 2003). The presence of these elements in martite granular hematite/martite (gHmA) (Figures 5.9 and 5.10) was probably inherited from leached or oxidized carbonates from the sedimentary sequence that occupied the Fe^{2+} vacancies since the Z/r ratio directly affects the strength of bonds in the mineral structures.

According to Yardley & Bodnar (2014) and references therein, Mn and Fe have similar chemical behavior, being more soluble at analogous reducing conditions as 2+ ions and becoming insoluble at oxidizing environments. The Mn^{2+} is present in larger concentrations in carbonates from DI and has been remobilized together with Fe^{2+} from oxides and carbonates by reducing fluids. Under oxidizing conditions, it would have been precipitated as Mn^{3+} in trace amounts, occupying the Fe^{3+} -octahedral sites of the specularite crystalline structure (sample HIO2).

The relatively low Sr content, compared to Mn and Mg, could result from its larger ionic radius and difficulty in fitting in the crystalline structure of the iron oxides or simply reflect the lower concentration of this element in the carbonate protore. Alternatively, the values detected for these elements could represent the occurrence of submicroscopic particles of carbonates that remained as inclusions in the iron oxide grains.

5.8.2. Behavior of Chromium, Titanium and Vanadium

The elements Cr, Ti, and V are lithophile and form cations with similar charge density (Z/r), as for example Cr^{3+} ($r = 0.69\text{\AA}$), Cr^{2+} ($r = 0.90\text{\AA}$), V^{4+} ($r = 0.61\text{\AA}$), V^{3+} ($r = 0.74\text{\AA}$), Ti^{4+} ($r = 0.68\text{\AA}$) and Ti^{3+} ($r = 0.75\text{\AA}$), which would be capable of substituting Fe^{2+} and/or Fe^{3+} in the hematite and magnetite crystalline structure. The Cr and V contents obtained here show that these elements did not fractionate during the iron remobilization processes in the Esperança Deposit (Figure 5.8). Nevertheless, the fractionation of Ti, indicated in the variation of its contents in the different iron oxides, reveals a relative mobility of this element during mineralization.

5.8.3. Rare Earth Elements and Yttrium

The REE-Y spidergram indicates that gHmA crystals in DI preserve the whole rock signature (Figure 5.12). Granular hematite from high-grade iron ore (gHmB), however, exhibits a distinctive REE-Y pattern with a general depletion of HREE with respect to gHmA and a clear decrease in the Eu and Y anomalies. All generations of specular hematite crystals finally exhibit very low trace element concentrations compared to granular hematite. These changes suggest a progressive increase in the fluid/rock ratio and probably inheritance of the signature of the mineralizing fluid.

A true negative Ce anomaly (*sensu* Bau & Dulski 1996) is evident only in hematite crystals from DI and enclosed vein, similar to those values common in whole rock data from Paleoproterozoic BIFs, including the itabirites from the Quadrilátero Ferrífero (Spier *et al.* 2007). In hematite crystals from high-grade iron ore and also in the enclosed specularite in veins and vugs, a Ce anomaly is absent or positive (Figure 5.13) indicating higher availability of this element in the fluid that would concentrate in the high-grade ore hematite and specularite plates under oxidative condition.

The variations of the element pair Y-Ho and of the Y/Ho ratios indicate a Y mobilization during mineralization (Figure 5.14). There is a progressive decrease in the Y/Ho values in the successive iron oxide generations from DI (near seawater field) to high-grade iron ore (CHARAC field) and then to specularite from fractures and veins (subchondritic ratios). This indicates that fluid composition and its chemical interactions with the country rocks played an important role in the geochemical signature of the iron oxides with progressive fractionation of Y and consequent decrease of the Y/Ho ratio of the mineralizing fluid during its percolation and subsequent precipitation of the several specularite generations (Figure 5.14).

5.8.4. Chemical Model

The petrographic and geochemical analyses and interpretations of the data permitted a better understanding of the chemical changes which the ore components were subject to and allowed, therefore, the development of a conceptual model for iron enrichment processes in the Cauê BIF (Figure 5.15).

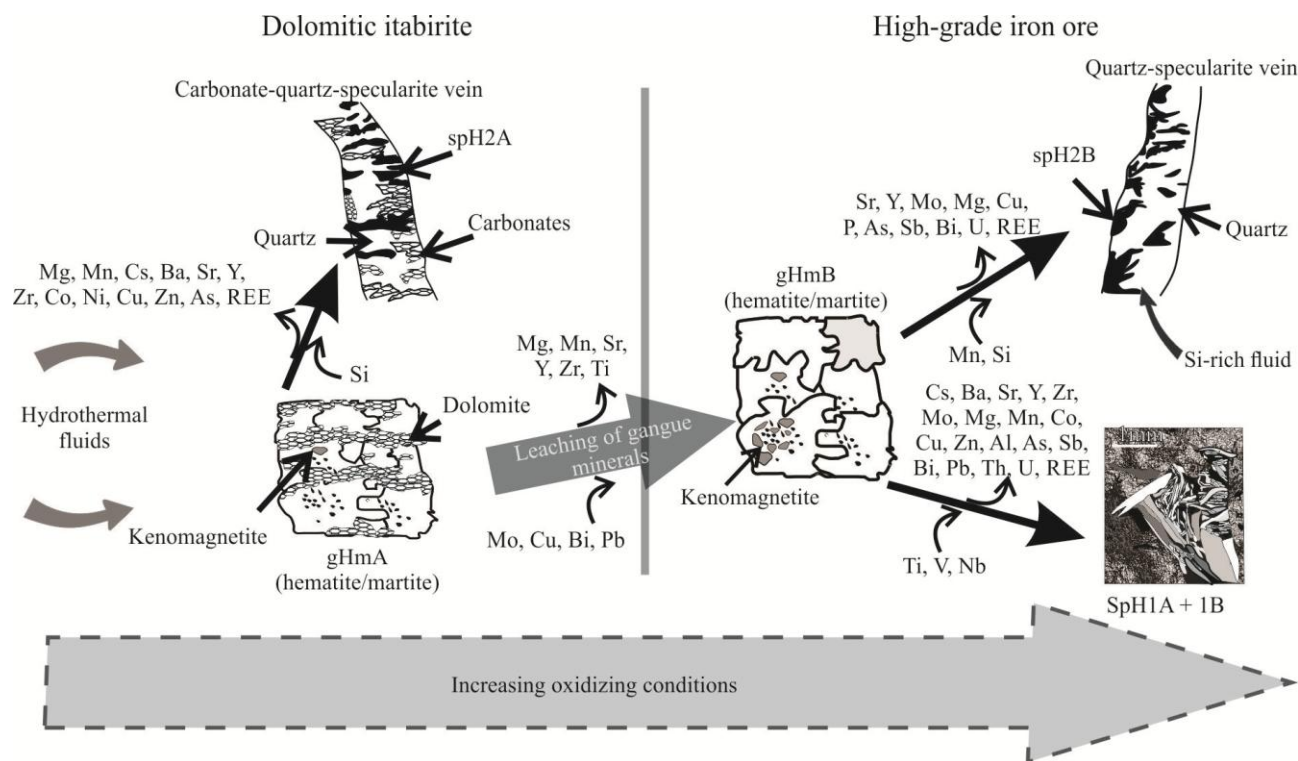


Figure 5.15. Schematic illustration of all iron oxide generations studied by LA-ICP-MS and its proposed sequence of formation.

5.8.5. Characteristics of Hematite from Dolomitic Itabirite

Granular hematite/martite (gHmA) is the main ore mineral both in DI and in the high-grade iron ore. This phase was formed during the early stages of mineralization (Rosière & Rios 2004) and exhibits the highest contents in trace elements. The contents of Mg, which is hosted by the kenomagnetite relics, were probably inherited from Mg-rich carbonate minerals from the DI protore. The REE-Y (PAAS-normalized) patterns and Y/Ho ratios of the individual grains are very similar to the whole rock values found in unmineralized BIFs that also reflect the chemical affinity of the ore minerals with the host rock.

5.8.6. Hydrothermal Iron Upgrade from Dolomitic Itabirite and Formation of High-Grade Iron Ore Bodies

The granular hematite/martite (gHmB) grains from high-grade ore bodies are inherited from DI. The contents of relative immobile V, Cr, Al, Ga, Si, As, and Sb of gHmB are similar to gHmA but are depleted in Sr, Y, Zr, Ti, Mg, and Mn, suggesting that these elements were removed from the crystalline structure of the hematite during an iron mineralization stage dominated by leaching of gangue minerals and residual enrichment of Fe.

5.8.7. Iron Remobilization and Precipitation of Hydrothermal Specularite in Syn Kinematic Vugs and Veins

Iron remobilization has also played an important role during mineralization. In this process, hypogene specularite crystals were precipitated in the available space created during deformation. Several generations of this mineral phase are highly depleted in all trace elements including REE with several values below the detection limit and highly variable Y/Ho ratios ranging from chondritic to subchondritic. The positive Ce anomaly and the presence of Mn^{3+} in the structure of this mineral phase also indicate the highly oxidizing conditions.

Vein hosted plates of specularite precipitated with carbonates and quartz in the dolomitic rock (spH2A) and with quartz (spH2B) in the high-grade ore. In the central part of the veins, young specularite fibers have crystallized together with antitaxial, elongated quartz fibers, as well as with saccharoidal grains, indicating a late stage crack-seal mechanism with external input of SiO_2 -rich

fluids. This mechanism was probably associated with the dissolution of quartz-rich country rocks at very high fluid-rock ratios, leading to the formation of dolomite-rich veins, which, in turn, possibly produced a large dilution thereby changing the Eh-pH conditions.

5.9. CONCLUSIONS

The LA-ICP-MS data presented in this paper allows the tracing of the signature of trace and REE elements in the different iron oxide mineral generations formed during the iron mineralization process in the Esperança Deposit, Quadrilátero Ferrífero.

The percolation of hydrothermal fluids through the host rocks has leached the gangue minerals, mainly carbonate and quartz, leaving a chemical signature of these minerals in the older granular hematite/martite from DI (gHmA) and high-grade iron ore (gHmB). The specularite crystals from veins and vugs, which represent the youngest generation of iron oxides, present a chemical signature depleted in trace elements but with some important and distinctive chemical features such as Mn³⁺ contents, highly variable Y/Ho ratios and positive Ce anomaly.

Acknowledgements

The financial support and infrastructure for this PhD study have been provided by Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Comissão Nacional de Energia Nuclear/Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CNEN/CDTN), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG - CRA PPM 00179/13), Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP - REDETEC 2715/09), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - 307546/2011-0) and the Laser Ablation ICPMS Analysis to NAP Geoanalítica - Universidade de São Paulo (USP) facilities. The authors thank H.P. Meireles and the Ferrous Resources for providing full access to geological information. We would like to thank S.P. Prates, T.A.F. Lima, L.E.D. Amorim, and the staff of Setor de Tecnologia Mineral (SETEM) from CNEN/CDTN, Brazil, for technical assistance and suggestions. A special thanks to the Section Editor, S. Hagemann, to both reviewers, and to the Chief Editor of the Brazilian Journal of Geology, U. Cordani, for the important collaboration with the improvement of this work.

5.10. ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS: DEPÓSITO DE ESPERANÇA

5.10.1. Petrografia e Microtermometria das Inclusões Fluidas

Inclusões fluidas em cristais de quartzo e especularita encontradas isoladas e em pequenos agrupamentos de inclusões fluidas (*fluid inclusion assemblages – FIA*) foram selecionadas de acordo com os critérios para origem primária, discutidos por Roedder (1984) e Goldestein & Reynolds (1994). Os dados microtermométricos obtidos encontram-se resumidos na (Tabela 5.5) e os valores para cada inclusão fluida analisada encontram-se detalhados no Anexo 3.

5.10.1.1. Quartzo

Itabirito dolomítico:

As inclusões fluidas primárias são bifásicas (vapor + líquido) e aquo-salinas, de tamanhos relativamente grandes (média 30µm), possuindo normalmente formato alongado com a proporção da fase vapor variando de 5% a 10% (Figura 5.16a).

Tabela 5.5. Resumo dos resultados obtidos por microtermometria para inclusões fluidas encontradas em cristais de quartzo e especularita do depósito de Esperança, QF.

Rocha encaixante	Mineral	Tipo de IF	T _{eut} (°C)	T _{m-gelo} (°C)	T _{m-HH} (°C)	T _H (°C)	% p/p NaCl _{eqv}
Itabirito dolomítico	quartzo	bifásicas	-50,0 a	-16,9 a	-24,3 a	100,0 a	14,8 a 20,2
			-34,2 (25)	-10,8 (25)	-22,0 (25)	179,0 (25)	(25)
Minério de ferro de alto teor	quartzo	bifásicas	-48,1 a	-10,9 a -8,4	-35,0 a	117 a	12,2 a 14,9
			-31,2 (32)	(32)	-23,6 (24)	174,5 (32)	(32)
	especularita	trifásicas	-34,1 a	-9,4 a -5,1	-	189,0 a	8,0 a 13,3
			-22,1 (29)	(29)	-	232,0 (29)	(29)

(n) = número de inclusões fluidas analisadas; T_{eut} = temperatura eutética; T_{m-gelo} = temperatura final de fusão do gelo; T_{m-HH} = temperatura final de fusão da hidro-halita; T_H = temperatura de homogeneização final; %p/p NaCl_{eqv} = porcentagem em peso de NaCl equivalente.

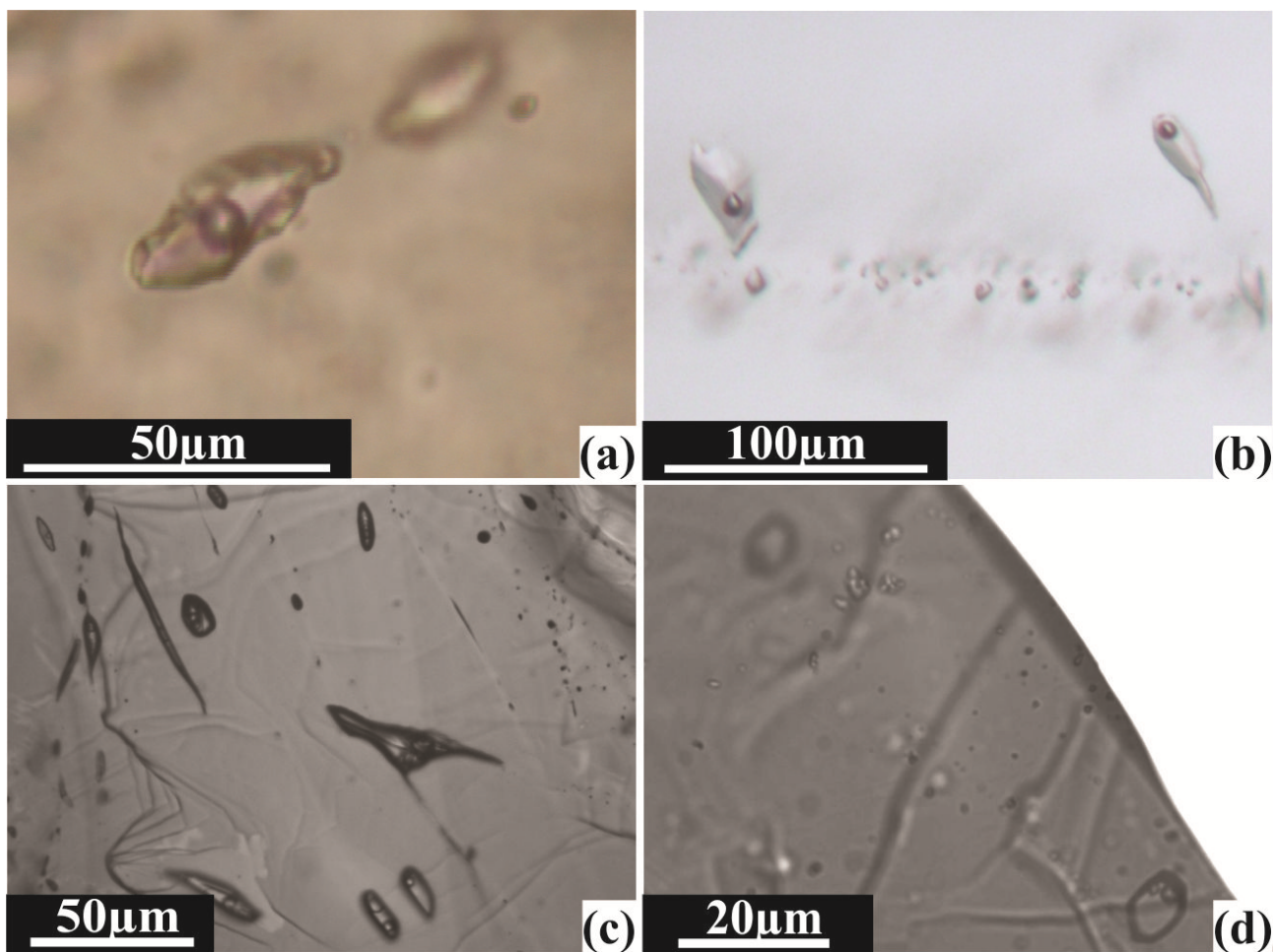


Figura 5.16. Agrupamentos de inclusões fluidas encontradas em quartzo e especularita do depósito de Esperança. (a) Inclusões fluidas bifásicas em quartzo do veio hospedado no itabirito dolomítico. (b) Trilha de inclusões fluidas bifásicas em quartzo do veio que corta o minério de alto teor. (c) Inclusões fluidas trifásicas encontradas em cristais de especularita em *vugs* no minério de alto teor (luz infravermelha). (d) Inclusões fluidas trifásicas em especularita do veio que corta o minério de alto teor (luz infravermelha).

Durante os estudos microtermométricos estas inclusões fluidas apresentaram temperatura final de fusão do gelo ($T_{m\text{-gelo}}$) variando de $-16,9^{\circ}\text{C}$ a $-10,8^{\circ}\text{C}$, o que leva a salinidades de 14,8%p/p a 20,2%p/p NaCl_{eqv} . A temperatura de homogeneização (T_{H}) variou de $100,0^{\circ}\text{C}$ a $179,0^{\circ}\text{C}$, a temperatura eutética (T_{eut}) de $-50,0^{\circ}\text{C}$ a $-34,2^{\circ}\text{C}$ e a temperatura final de fusão da hidro-halita ($T_{m\text{-HH}}$) de $-24,3^{\circ}\text{C}$ a $-22,0^{\circ}\text{C}$ (Figura 5.17). A dissolução lenta da hidro-halita foi observada utilizando-se a técnica de resfriamento sequencial descrita por Haynes (1985) associada a utilização de baixas taxas de aquecimento.

Minério de ferro de alto teor:

Foram encontrados agrupamentos de inclusões fluidas pseudo-secundárias que são aquo-salinas e bifásicas (vapor + líquido). Estas inclusões têm tamanho médio de $29\mu\text{m}$ e são alongadas, algumas vezes apresentando forma de cristal negativo (Figura 5.16b). A fase vapor representa em geral 5% das inclusões. Análises microtermométricas revelam para este tipo de inclusão fluida T_{eut} variando de $-48,1^{\circ}\text{C}$ a $-31,2^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{m-gelo}}$ de $-10,9^{\circ}\text{C}$ a $-8,4^{\circ}\text{C}$, $12,2\% \text{p/p}$ a $14,9\% \text{p/p}$ NaCl_{eqv} , $T_{\text{m-HH}}$ de $-35,0^{\circ}\text{C}$ a $-23,6^{\circ}\text{C}$ e T_{H} de $117,0^{\circ}\text{C}$ a $174,5^{\circ}\text{C}$ (Figura 5.17 e Tabela 5.5).

5.10.1.2. *Especularita*

Os cristais de specularita encontrados em veios e *vugs* não apresentam boa transparência e possuem inclusões fluidas muito pequenas (Figuras 5.16c e 5.16d). Estas inclusões fluidas ocorrem em trilhas pseudo-secundárias ou são encontradas em pequenos agrupamentos isolados. Elas são aquo-salinas e trifásicas (líquido + vapor + sólido) com fase vapor correspondendo 5% a 10% do volume. Após aquecimento em temperaturas acima de 200°C nenhuma diminuição do tamanho da fase sólida foi observada. Durante a microtermometria apresentaram T_{eut} variando de $-34,1^{\circ}\text{C}$ a $-22,1^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{m-gelo}}$ de $-9,4^{\circ}\text{C}$ a $-5,1^{\circ}\text{C}$ ($8,0\% \text{p/p}$ a $13,3\% \text{p/p}$ NaCl_{eqv}) e T_{H} de 189°C a 232°C (Figura 5.17 e Tabela 5.5).

5.10.2. Microquímica de Elementos Traço por LA-ICP-MS

As concentrações dos elementos obtidas por LA-ICP-MS nas inclusões fluidas em quartzo e specularita encontram-se resumidas na

Tabela 5.6 e todos os resultados podem ser consultados no Anexo 4. Os elementos Na, K, As, Li, B, Sr, Cs, Mg, S, Cl e Br foram detectados em quantidades significativas e acima do limite de detecção (DL) para a maioria das inclusões fluidas analisadas e por isso os valores obtidos foram plotados em diagramas do tipo *box* para comparação (Figura 5.18.). A Figura 5.19 mostra a relação entre as concentrações dos halogênios Cl e Br nos fluidos aprisionados em quartzo, a concentração destes elementos na água do mar e seu trajeto de evaporação (McCaffrey *et al.* 1987).

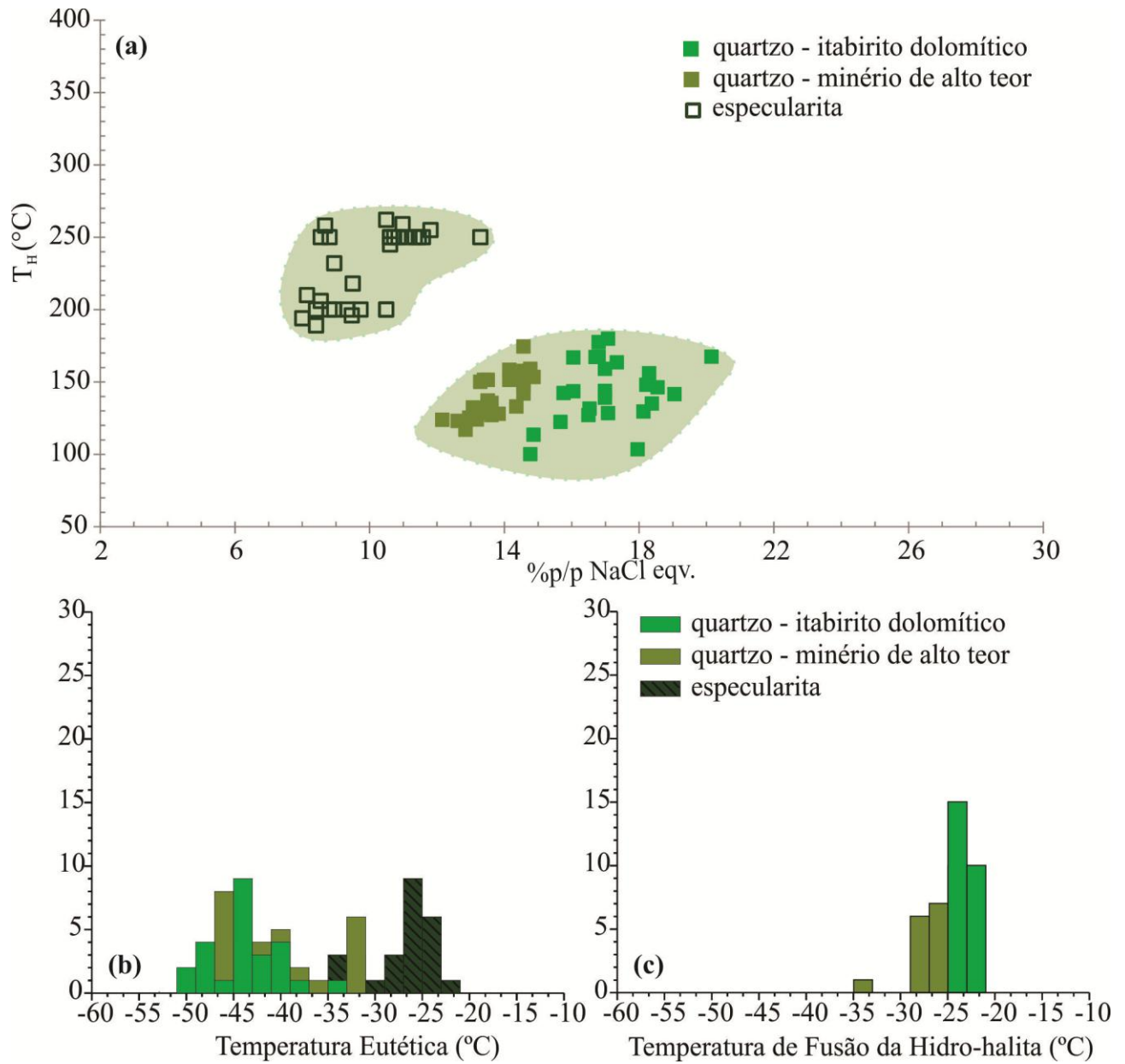


Figura 5.17. Parâmetros de temperatura obtidos para inclusões fluidas do depósito de Esperança. (a) Diagrama de T_H versus salinidade; (b) histograma com os valores de temperatura eutética e (c) histograma com as temperaturas finais de fusão da hidro-halita.

5.10.2.1. *Quartzo*Itabirito dolomítico:

Estas inclusões fluidas apresentam alto teor de K (média = 6,4%p/p), Cl (média = 13,1%p/p) e Na (média = 3,9%p/p). Os outros elementos são encontrados em quantidades médias decrescentes: S (1,7%p/p), Br (4083ppm), As (2086ppm), B (1449ppm), Mg (456ppm), Li (397ppm), Sr (209ppm) e Cs (134ppm; Figura 5.18a). A razão molar Cl/Br para este tipo de fluido varia de 40 a 152, com um valor médio de 88 (Figura 5.19). Na Figura 5.19b é possível perceber o reflexo da alta concentração de K em comparação ao Na ($Na/K < 1$) neste fluido.

Tabela 5.6. Variação da composição microquímica e razão molar Cl/Br de inclusões fluidas em quartzo e especularita do depósito de Esperança, QF.

Elemento		Amostra		
		Quartzo - Itabirito dolomítico	Quartzo - Minério de alto teor	Especularita
Li	(ppm)	117 a 1311 (18)	49 a 405 (28)	144 a 1194 (14)
B	(ppm)	583 a 6457 (18)	177 a 1771 (30)	344 a 1030 (10)
Na	(ppm)	9327 a 67271 (22)	32640 a 58222 (31)	9434 a 35613 (17)
Mg	(ppm)	40 a 902 (6)	27 a 441 (5)	15 a 80 (4)
S	(ppm)	5842 a 35565 (10)	313 a 23919 (10)	<LD
K	(ppm)	7591 a 123402 (19)	3098 a 26680 (28)	4176 a 10654 (10)
Ca	(ppm)	2752 a 19884 (4)	2071 a 22202 (3)	<LD
Cu	(ppm)	181 a 566 (5)	21 a 117 (3)	<LD
Zn	(ppm)	<LD	<LD	<LD
As	(ppm)	277 a 8965 (22)	115 a 1735 (31)	97 a 4272 (17)
Sr	(ppm)	27 a 1071 (11)	26 a 86 (13)	30 a 364 (17)
Sb	(ppm)	<LD	8 a 33 (4)	6 a 216 (4)
Cs	(ppm)	72 a 400 (11)	39 a 114 (15)	25 a 96 (12)
Ba	(ppm)	95 a 659 (4)	<LD	20 a 8520 (6)
Cl	(ppm)	81533 a 162543 (7)	48110 a 234969 (14)	N.A.
Br	(ppm)	2012 a 5292 (7)	533 a 2107 (10)	N.A.
Cl/Br	(molar)	39 a 152 (7)	90 a 318 (10)	N.A.

(n) = número de análises; LD = limite de detecção; N.A. = não analisado ou menos de 3 resultados acima do limite de detecção ou de 3σ .

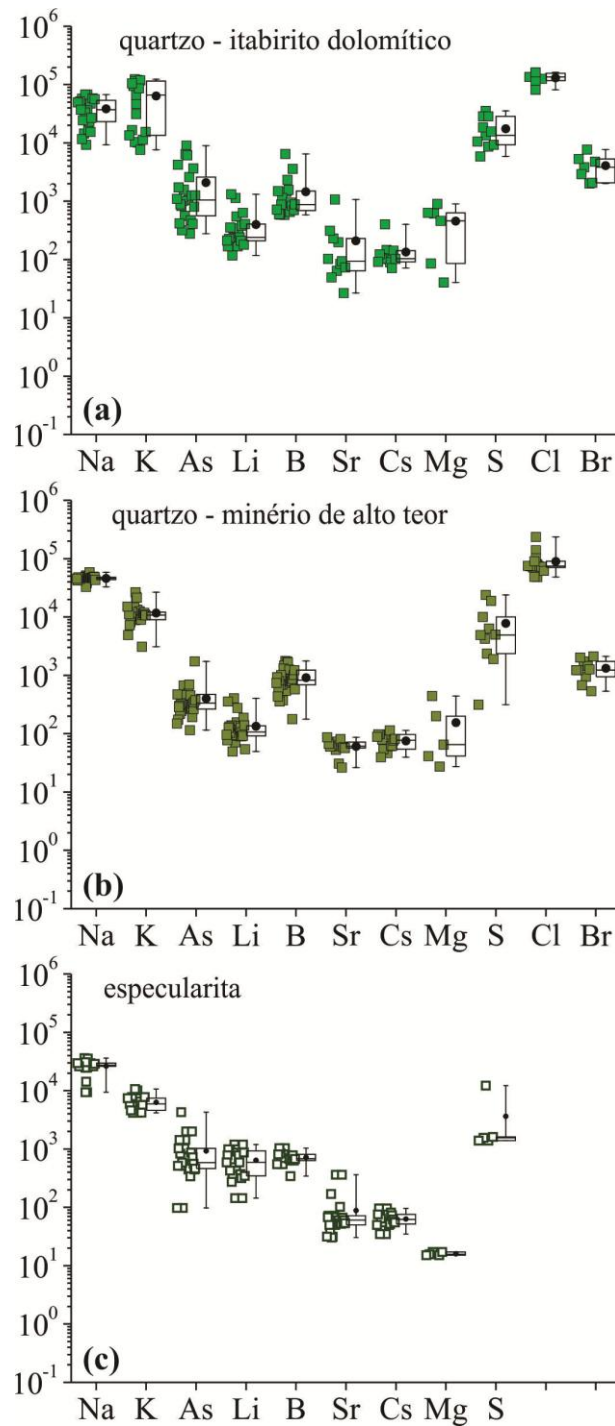


Figura 5.18. Diagrama *Box* mostrando as concentrações dos elementos Na, K, As, Li, B, Sr, Cs, Mg, S, Cl e Br determinadas por LA-ICP-MS nas inclusões fluidas encontradas em quartzo e especularita do depósito de Esperança.

Minério de ferro de alto teor:

Os elementos presentes em maior quantidade neste fluido são: Na (média = 4,6%p/p) e Cl (média = 8,9%p/p) seguidos de K (1,2%p/p), S (0,78%p/p), Br (1317ppm), B (914ppm) e As (402ppm) e menores quantidades de Li (134ppm), Cs (75ppm) e Sr (61ppm). Variáveis teores de Mg (27 a 441ppm) também foram detectados (Figura 5.18b). A variação da razão molar Cl/Br (90 a 318; média = 90) é maior do que os valores descritos acima para os fluidos no itabirito dolomítico (Figura 5.19).

5.10.2.2. *Especularita*

Além de Na (média = 2,7%p/p) este fluido contém K (média = 0,7%p/p), S (média = 0,4%p/p), As (1137ppm), B (706ppm) e Li (581ppm). Menores quantidades de Sr (100ppm), Cs (60ppm) e Mg (32ppm) também foram detectadas (Figura 5.18c).

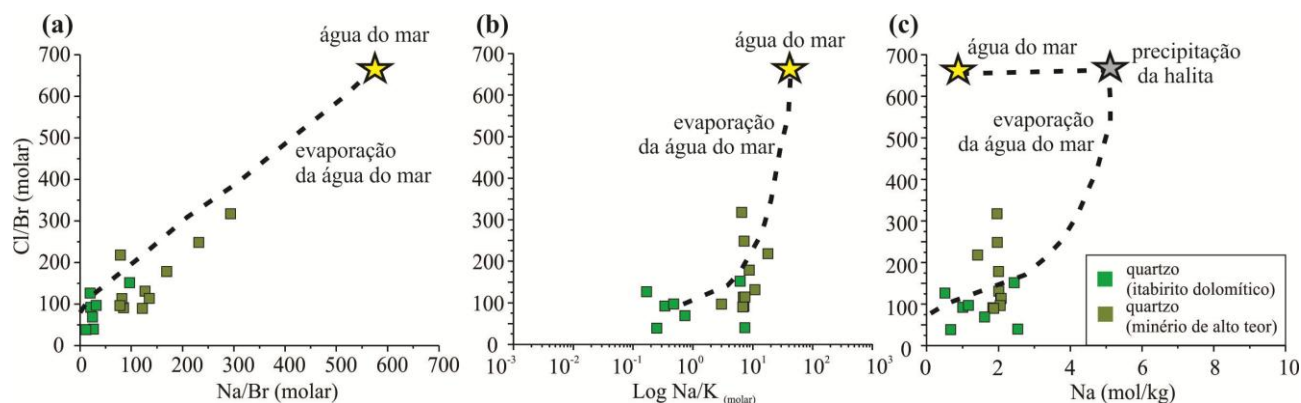


Figura 5.19. Razão molar Cl/Br *versus* (a) Na/Br_(molar), (b) log Na/K_(molar) e (c) Na_(mol/kg). Estes diagramas ilustram o comportamento dos halogênios (Cl e Br) nos fluidos aprisionados em quartzo de veios associados à mineralização em Fe do depósito de Esperança em comparação com a composição da água do mar e sua trajetória de evaporação (McCaffrey *et al.* 1987).

De acordo com Heinrich *et al.* (2003) a quantificação do elemento Ca por LA-ICP-MS pode ser imprecisa devido a interferências geradas pelo gás do plasma, pelo alto background de Ca⁴⁰ e Ca⁴², e pela sobreposição do Ca⁴⁴ com Si²⁸O¹⁶. Entretanto, Schlengel *et al.* (2012) descrevem um procedimento onde a concentração do CaCl₂ pode ser definida mais precisamente utilizando a microtermometria quando o sistema CaCl₂-NaCl-H₂O é considerado.

Devido à estreita associação das litologias com rochas carbonáticas, a presença de Ca é esperada nas soluções salinas encontradas nas amostras do depósito de Esperança, apesar deste elemento ser encontrado abaixo do limite de detecção para várias análises em inclusões fluidas por LA-ICP-MS.

Durante as análises microtermométricas dos dois tipos de inclusões fluidas em quartzo do depósito de Esperança a fusão final da hidro-halita foi observada. Em uma tentativa de estimar melhor a concentração de Ca nestes fluidos a abordagem proposta por Steele-MacInnis *et al.* (2011) foi utilizada. Os resultados obtidos para a variação composicional de Ca nestes dois tipos de fluidos estão dispostos na Figura 5.20 e Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Resultados microtermométricos das temperaturas finais de fusão do gelo e da hidro-halita e a comparação dos valores obtidos para a salinidade utilizando os modelos propostos por Bodnar & Vityk (1994) e Steele-MacInnis *et al.* (2011).

Amostra	T _{m-gelo} (°C)	T _{m-HH} (°C)	(Bodnar & Vityk 1994)	(Steele-MacInnis <i>et al.</i> 2011)		
			%p/p NaCl _{eqv}	%p/p NaCl	%p/p CaCl ₂	S _{peso}
Quartzo	-16,9 a	-24,3 a	14,8 a 20,2	10,1 a 17,1	2,0 a 6,1	14,8 a 19,9
Itabirito dolomítico	-10,8	-22,0				
Quartzo	-10,9 a	-35,0 a	12,2 a 14,9	2,6 a 10,0	4,0 a 12,1	13,2 a 14,8
Minério de alto teor	-8,4	-23,6				

T_{m-gelo} = temperatura final de fusão do gelo; T_{m-HH} = temperatura final de fusão da hidro-halita; %p/p NaCl_{eqv} = concentração em porcentagem em peso equivalente em NaCl (Bodnar & Vityk 1994); %p/p NaCl = concentração em porcentagem em peso de NaCl (Steele-MacInnis *et al.* 2013); %p/p CaCl₂ = concentração em porcentagem em peso de CaCl₂ (Steele-MacInnis *et al.* 2013); S_{peso} = %p/p NaCl + %p/p CaCl₂.

Os resultados mostram conteúdo de Ca mais elevado nas inclusões fluidas em veio de quartzo hospedado no minério de alto teor enquanto que as inclusões do itabirito dolomítico apresentam mais alto teor de Na. A soma dos conteúdos em peso de CaCl₂ e NaCl calculados a partir do modelo de Steele-MacInnis *et al.* (2011) são muito similares aos valores de salinidade equivalente em NaCl calculados a partir do modelo de Bodnar & Vityk (1994). Isto indica que a estimativa de quantidade de sal equivalente é válida, porém é necessário considerar que importantes conteúdos de Ca podem estar presentes nos fluidos.

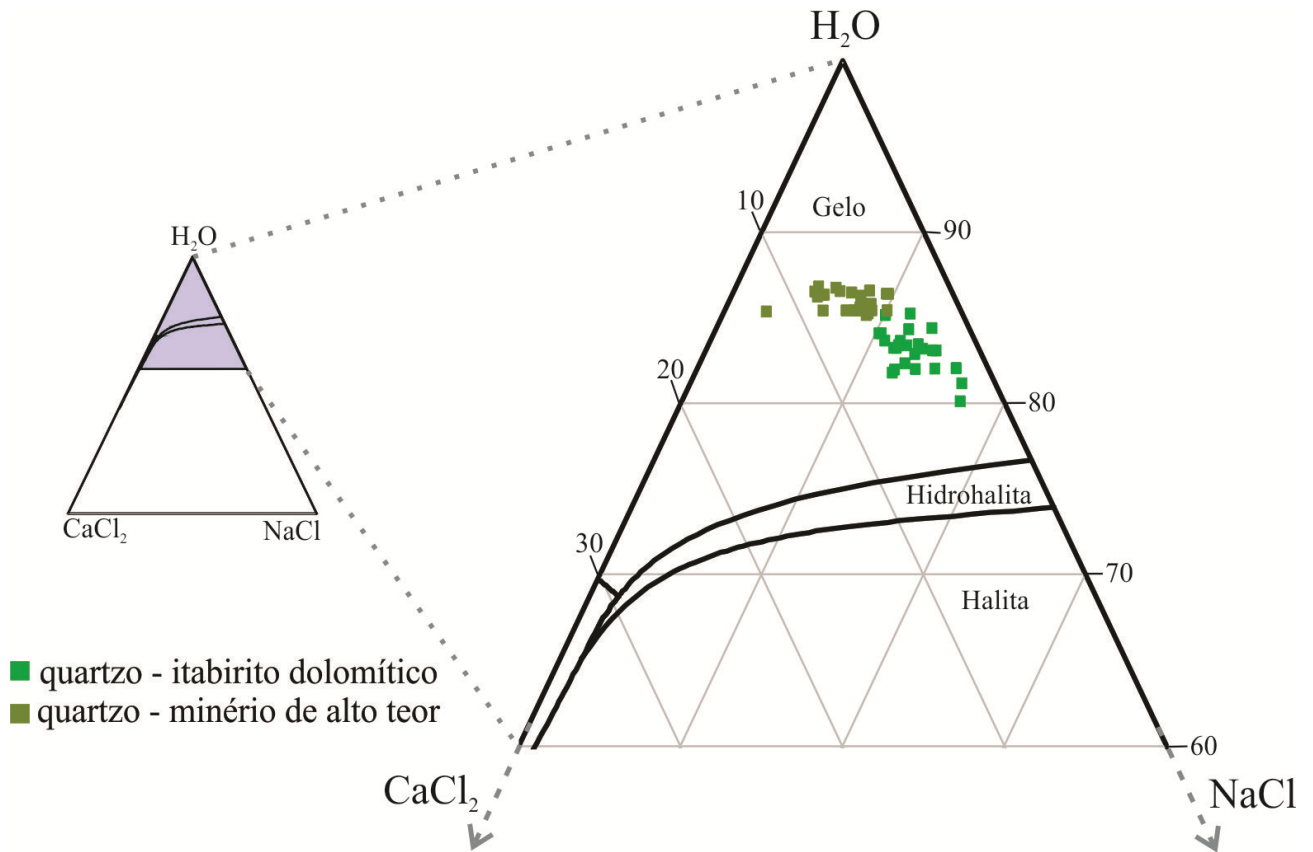


Figura 5.20. Diagrama ternário do sistema $\text{CaCl}_2\text{-NaCl-H}_2\text{O}$ (Steele-MacInnis *et al.* 2011) mostrando a composição das inclusões fluidas encontradas em quartzo de veios que cortam o itabirito dolomítico e o minério de alto teor do depósito de Esperança, QF.

5.11. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS E MODELO PARA O DEPÓSITO DE ESPERANÇA

As assinaturas químicas das diferentes gerações de óxido de ferro no depósito de Esperança indicam que processos policíclicos envolvendo mudanças nas condições químicas e de oxi-redução são responsáveis pelo enriquecimento em ferro e tem o itabirito dolomítico como rocha precursora do minério (Oliveira *et al.* 2015). De acordo com o proposto por Oliveira *et al.* (2012, 2015) um fluido primário teria lixiviado as rochas dolomíticas, se tornando rico em CO₂, Ca e Mg e deixando sua assinatura química na hematita/martita granular encontrada no minério de alto teor. Este fluido ao alcançar espaços abertos produzidos durante a deformação precipitou sequencialmente carbonatos e especularita (Oliveira *et al.* 2012).

Conforme já sugerido por Rosière & Rios (2004), propõe-se aqui que os veios sin-tectônicos de Esperança foram formados durante a orogenia Transamazônica o que é corroborado por relações petrográficas e pela idade (2034 ± 11 Ma) determinada para os corpos de minério por Sanglard *et al.* (2014).

Existem, no entanto, pelo menos três fluidos envolvidos no processo de enriquecimento em ferro e estes fluidos estão provavelmente relacionados aos processos de metamorfismo e deformação ocorridos nesta região. Os resultados aqui descritos demonstram que os três fluidos estudados possuem algumas características físico-químicas distintas entre si, o que possibilitou a definição de pelo menos três estágios de fluxo (ou uma evolução) de fluidos conforme mostrado no diagrama da Figura 5.21:

Estágio (I): é caracterizado pela precipitação de carbonatos nos veios encaixados no itabirito dolomítico a partir de um fluido rico em CO₂-Ca-Mg (Oliveira *et al.* 2012).

Estágio (II): está associado a um fluido de temperatura e salinidade intermediárias, associado a um processo de (re)mobilização de Fe, que levou a precipitação dos cristais de especularita nos espaços abertos sin-tectônicos.

Estágio (III): é composto por um fluido de baixa temperatura, salinidade intermediária e rico em sílica que selou os veios com a cristalização do quartzo hospedeiro das inclusões fluidas.

Este fluido apresenta variações composicionais locais que refletem em sua salinidade quando comparados os dois tipos veios estudados:

- i. Minério de alto teor: fluido de mais baixa salinidade e conteúdos consideravelmente elevados de Ca e Cl e razão Cl/Br mais elevada.
- ii. Itabirito dolomítico: fluido de salinidade mais alta e conseqüentemente mais rico em K, Na, As, B, Br, Mg, Sr e outros elementos menores.

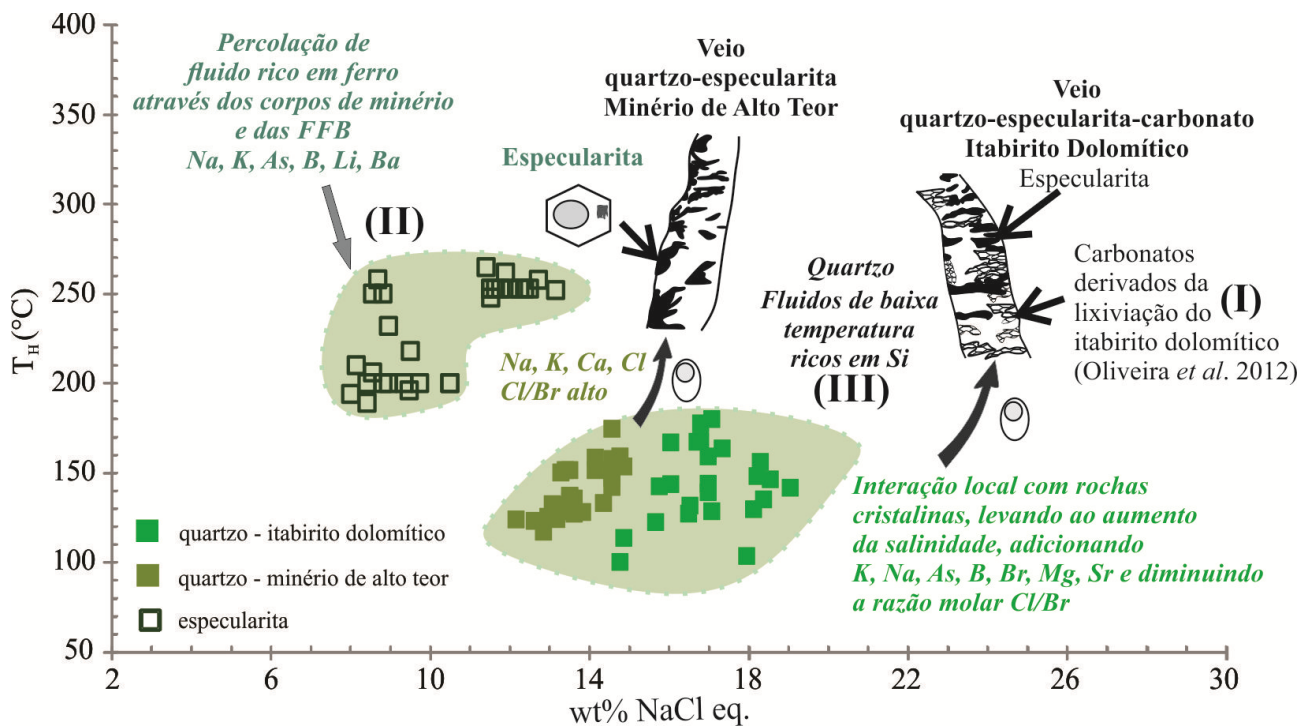


Figura 5.21. Modelo esquemático para a evolução dos fluidos hidrotermais associados com a mineralização de Fe no depósito de Esperança, domínio de baixa deformação, leste do QF.

CAPÍTULO 6. MINERALIZAÇÕES BRASILIANAS

Conforme descrito anteriormente, a orogenia Brasileira afetou diretamente as rochas da borda leste da Serra do Espinhaço e do leste do Quadrilátero Ferrífero. Acredita-se que processos mineralizadores em toda esta região são reflexos da deformação e do metamorfismo gerados durante a orogenia. Portanto, com o objetivo de melhor compreender o papel dos fluidos durante os processos mineralizadores em Fe (SER) e Au-PGE (leste do QF) ocorridos durante a orogenia Brasileira, análises de inclusões fluidas foram realizadas em cristais hidrotermais de quartzo e especularita. Os resultados obtidos encontram-se abaixo no formato de artigo.

ARTIGO: “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, BRAZIL”

Lucilia Aparecida Ramos de Oliveira^{1*}, Francisco Javier Rios², Carlos Alberto Rosière¹, Markus Wälle³, Melissa Ortelli⁴, Kalin Kouzmanov⁴

¹ Instituto de Geociências (IGC), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, 31270-901, Brazil. luciliar@gmail.com*; crosiere@gmail.com

² Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN, 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brazil. javier@cdtn.br

³ Institute of Geochemistry and Petrology (IGP), ETH Zurich, Clausiusstrasse 25, CH-8092 Zürich, Switzerland. waelle@erdw.ethz.ch

⁴ Department Earth Sciences, University of Geneva, Rue des Maraîchers 13, 1205 Geneva, Switzerland. Melissa.Ortelli@unige.ch; Kalin.Kouzmanov@unige.ch

* Corresponding author

Artigo aceito para publicação na revista *Ore Geology Reviews*.

ABSTRACT

Hydrothermal fluids related to the development of the Araçuaí Orogen during the Brasiliano Cycle have affected Paleoproterozoic banded iron formation-bearing sequences along the eastern border of the São Francisco Craton. Controversy surrounds the origin of specularite in high-grade schistose iron ore-bodies in the Serpentina Range (“Serpentina-type” ore) versus specularite-rich, S-free Au-PGE quartz veins (“Jacutinga-type”) that occur at the eastern border of the Quadrilátero Ferrífero mining district. Chemical and thermobarometric characteristics of fluid inclusions from Serpentina-type quartz-specularite veins show that metamorphic aqueous-saline fluids of low to moderate temperature (i.e. salinity between 6.3 to 13.7wt% NaCl_{eqv} and homogenization temperatures from 91° to 228°C) were responsible for silica leaching and Fe enrichment along shear zones in the Statherian Serra da Serpentina Group. These Serpentina-type fluids present a distinct pattern with Na>Ca>>K. The fluids are depleted in Li, Na, Ba, Ca, K, Cu and Mg; and enriched in As and Sr in comparison to the Jacutinga-type fluids. In contrast, other two distinct fluids and chemical processes were involved to precipitate Fe oxides with Au-PGE in Jacutinga-type veins. The first type is an aqueous-carbonic fluid from the Catas Altas and Itabira deposits. These Jacutinga-type fluids present a pattern with Na>K>Ca>>Mg and K>Li>Ba>Sr. The fluids are interpreted to be of Brasiliano age and are typically associated with anatectic pegmatites from Santa Maria de Itabira. The high salinity of these brines (23.2 to 25.3wt% NaCl_{eqv}) from the Itabira ore likely originated from their percolation through evaporitic layers, from salt concentration during deformation, or from fluid/rock interactions. Mixing between high-temperature aqueous-carbonic pegmatite-forming fluids and low-temperature aqueous metamorphic brines could have induced an abrupt change in the physical-chemical conditions of the system, which led to Au and PGE precipitation in the Itabira Jacutinga-type deposit. A second Jacutinga-type fluid is observed at the Gongo Soco and Barão de Cocais deposits. This fluid is interpreted as an aqueous-saline metamorphic fluid with the pattern Na>Ca>K>>Mg, low-to-moderate-salinity (4.3 to 16.4wt% NaCl_{eqv}) and temperatures of 77° to 305°C. It is relatively enriched in B; depleted in Li, Ba, Na, Cu, Zn and K; and follows the trend K>Li>Ba. In both types of fluids responsible for Jacutinga-type mineralization, gold was transported as chlorine complexes under acidic and oxidizing conditions. The metal precipitation may have occurred due to a rapid depressurization during failure of shear zones operating in the upper levels of the crust, or variations in the pH and redox conditions during the interaction with the host dolomitic itabirite.

Keywords: Fluid inclusions; LA-ICP-MS; Brasiliano orogeny; hydrothermal fluids; iron ore; Jacutinga-type Au-PGE.

6.1. INTRODUCTION

The high-grade iron ore deposits hosted by metamorphosed banded iron formations (*itabirite*; Eschwege 1822) in the Minas Supergroup and the younger Serra da Serpentina Group are important repositories of iron ores in Brazil. In the Quadrilátero Ferrífero district (Figure 6.1), itabirites of the lower Paleoproterozoic Minas Supergroup are host to many major high-grade (>65wt% Fe) “Minas-type” iron ore bodies of Rhyacian age (Sanglard *et al.* 2014). Whereas, “Serpentina-type” iron ores are hosted by the Statherian Serra do Sapo itabirite (Figures 6.1 and 6.2) and include lenses of specularite-quartz itabirite with lesser granular hematite and magnetite-martite (Rolim *et al.* 2016). A minor proportion of these ores reaches very high Fe contents (>60wt% Fe). These Minas- and Serpentina-type mineralization examples occur as irregular or lens-shaped ore bodies or irregular massive veins with no clear structural control, consisting of martite-granoblastic hematite with variable proportions of magnetite or specularite. These orebodies are products of complete or near complete replacement of quartz-carbonate itabirite during hydrothermal alteration by large volumes of circulating basinal and metamorphic fluids (Rosière & Rios 2004), followed by further supergene enriched during the Cenozoic.

Itabirites of the Minas Supergroup also host Au-PGE-rich hematite-quartz S-free, “Jacutinga-type” veins (Figure 6.1) consisting mainly of specularite, quartz, talc and/or kaolinite. These veins are late Cambrian in age (Hartt 1870, Hussak 1904, Olivo 1994, Cabral 1996, 2006).

In this study, thermobarometric and micro-chemical fluid inclusion analyses were conducted in quartz and specularite samples from the contemporaneous Serpentina- and Jacutinga-types of ores (Figure 6.2) in order to evaluate a possible genetic relationship between both types of mineralization and to interpret their potential fluid source(s) and environmental conditions of metal mobilization and precipitation.

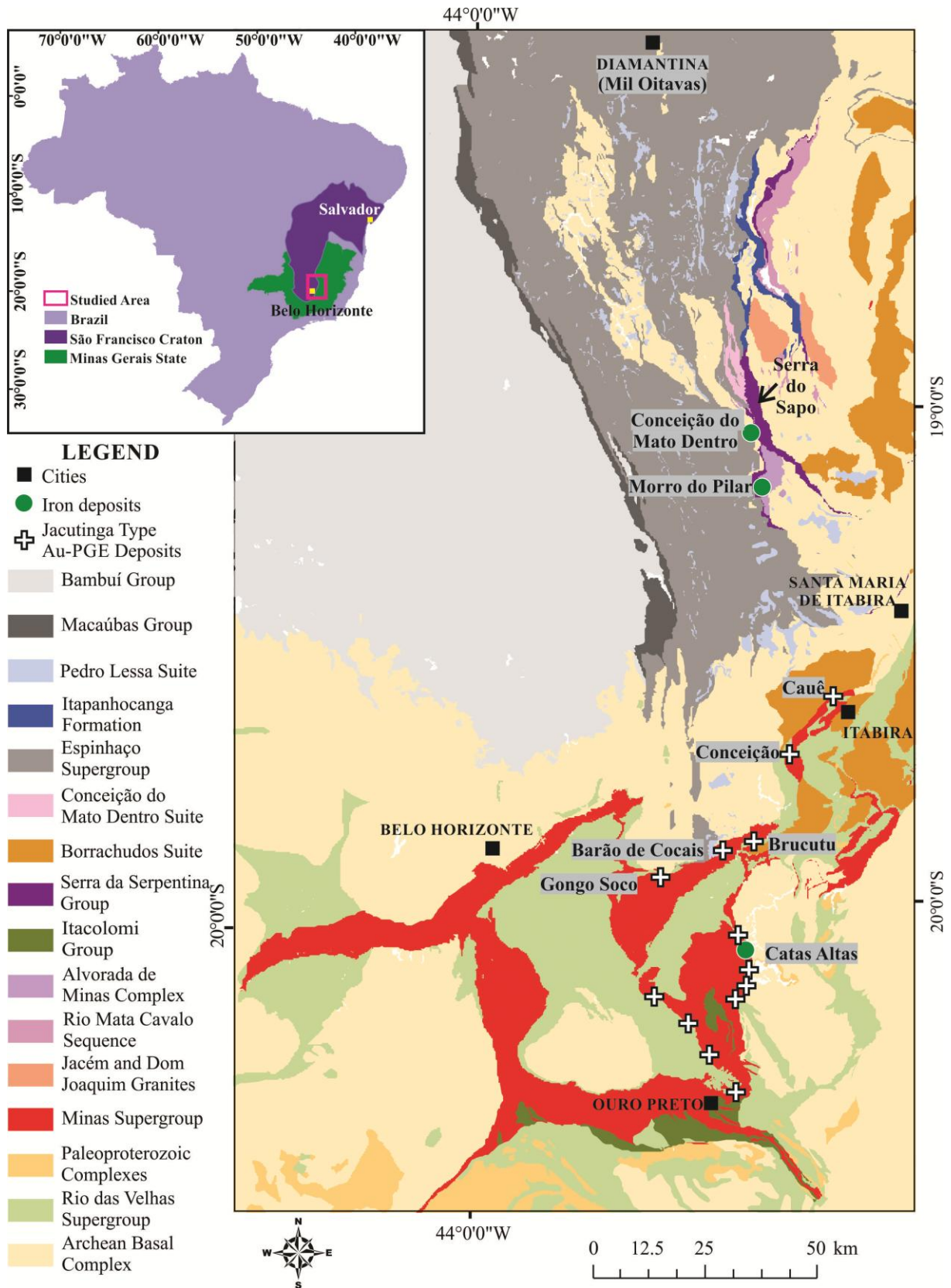


Figure 6.1. Simplified geological map of the Quadrilátero Ferrífero and the Southern Espinhaço Range (modified after Knauer & Grossi-Sad 1997, CPRM 2004, Lobato *et al.* 2005). The map presents the main lithologies, the location of the studied areas and the main Jacutinga-type deposits along the eastern border of Quadrilátero Ferrífero (Galbiatti *et al.* 2007).

6.2. GEOLOGICAL SETTING

6.2.1. Regional Setting

Two extensive layers of itabirites are exposed at the southern border of the São Francisco Craton in Brazil: The Siderian Cauê Formation of the Minas Supergroup and the Statherian Serra do Sapo Formation of the Serra da Serpentina Group (Figures 6.1 and 6.2). The Cauê itabirite is 250-300m thick and lies on a platformal environment at the Paleoproterozoic/Archean boundary. The itabirite displays a remarkable lateral stratigraphic continuity, grading laterally and upwards to dolomitic rocks of the Gandarela formation and with wide variations in the mineralogical composition (dolomite-, quartz- and amphibole-rich). The age of this unit is contentious (see Cabral *et al.* 2012a, 2016) but U-Pb ages for detrital zircons from quartzites of the basal Moeda Formation (Machado *et al.* 1992, 1996, Noce 1995) indicate the onset of deposition of the lower sequence of the Minas Supergroup at about 2600 to 2520Ma (Renger *et al.* 1994). Iron mineralization in the Cauê Formation took place during the tectonic closure of the basin at the end of the Rhyacian period (2034±11Ma; Sanglard *et al.* 2014) generating tectonic-controlled high-grade deposits in the Quadrilátero Ferrífero mining district (Figures 6.1 and 6.2).

At the northeast of the Quadrilátero Ferrífero district (Figure 6.1), younger quartz-hematite itabirites of the Serra do Sapo Formation were deposited during the transition between the Orosirian and Statherian periods (Knauer & Grossi-Sad 1997, Rolim *et al.* 2016). The Serra do Sapo itabirite, together with the underlying psammo-pelitic units of the Meloso Formation, comprises the Serra da Serpentina Group and is interpreted by Rolim *et al.* (2016) to have been deposited in a sag environment during the early stages of opening of the Espinhaço basin (Santos *et al.* 2013). SHRIMP U-Pb isotope data from detrital zircons from the over- and underlying coarse-grained clastic units delivered a maximum deposition age of 1668Ma for this sequence (Rolim *et al.* 2016; Silveira Braga *et al.* 2015).

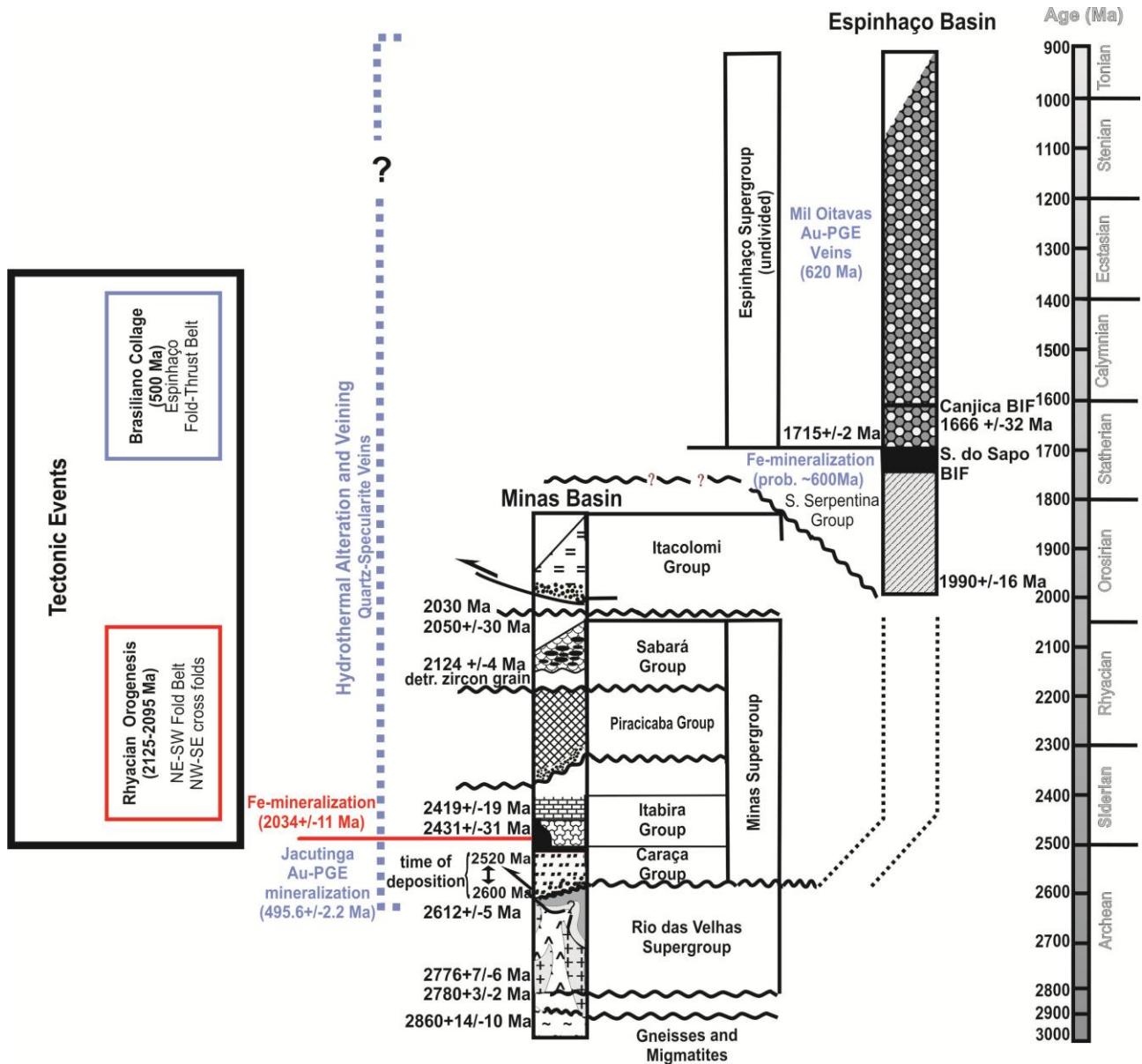


Figure 6.2. Simplified stratigraphic column of Minas and Espinhaço Basins highlighting the ages and occurrence of the veining, hydrothermal and tectonic events in the studied area. Adapted from Rosière *et al.* (2008) according to Chemale Jr. *et al.* (2012). References for age data: i = Alkmim & Marshak (1998); ii = Brito Neves *et al.* (2014); iii = Sanglard *et al.* (2014); iv = Cabral *et al.* (2015a); v = Machado *et al.* (1992); vi = Babinsk *et al.* (1995); vii = Noce (1995); viii = Machado & Carneiro (1992); ix = Noce *et al.* (1998); x = Santos *et al.* (2013); xi = Abreu (1991); xii = Machado *et al.* (1989); xiii = Rolim *et al.* (2016).

The regional structures of the Serpentina Range and the eastern half of the Quadrilátero Ferrífero are controlled by W-vergent thrust faults and associated folds, with the development of imbricated tectonic slices (Herrgesell & Pflug 1986, Almeida-Abreu *et al.* 1988, Pedrosa-Soares *et al.* 2001) during the Neoproterozoic-early Paleozoic Brasiliano/Pan-African orogenic collage (Knauer & Grossi-Sad 1997, Almeida-Abreu & Renger 2002, 2007, Silveira-Braga *et al.* 2015). The

Serra do Sapo itabirite is usually overprinted by a pervasive tectonic layering defined by alternating quartz- and iron oxide-rich bands with major specularite and minor granular hematite and magnetite. The sedimentary layers are intensely folded and sheared, with primary features transposed and obliterated by a continuous to anastomosed foliation. At the eastern border of the Quadrilátero Ferrífero, the Rhyacian-aged NE-SW-trending tectonic relationships of the Minas Supergroup is superposed and partially overprinted by younger thrusts that uplift and expose deeper parts of the sequence as imbricated slices (Chemale Jr. *et al.* 1994, Rosière *et al.* 2008).

6.2.2. Orebodies and Related Veins

A syntectonic hydrothermal overprint affected the entire Serra do Espinhaço fold-and-thrust belt during the Brasiliano orogeny. This overprint influenced the itabirite-bearing units of the Serra da Serpentina Group and the units of the Minas Supergroup (Figures 6.1 and 6.2) along the eastern border of the Quadrilátero Ferrífero with the development of intense veining and the crystallization of pegmatite bodies (Ronchi 1992, Marciano *et al.* 1994, Bilal *et al.* 1998, Rolim 2016). The syntectonic fluids were responsible for (i) the development of thrust-controlled, specularitic high-grade Serpentina-type ore bodies (Figure 6.3a; Rolim *et al.* 2016) and (ii) the formation of Au-PGE Jacutinga-type gold veins (Figure 6.3b; Cabral 2006).

In the Serra do Sapo itabirites the high-grade Serpentina-type iron orebodies are only tens of meters long, a few meters thick and present a simple mineralogy comprising hematite (mostly as specularite), minor magnetite/martite and quartz as gangue mineral. Syntectonic quartz leaching by pressure solution along thrust zones (Rolim & Rosière 2011, Rolim *et al.* 2016) was probably the prevailing process responsible for the formation of schistose, mainly specularitic high-grade orebodies (Figure 6.3a).

Two main types of structurally-controlled, massive quartz-specularite veins are ubiquitous in the BIFs and associated quartzite layers along the entire Serpentina Range, associated with Brasiliano-aged thrusts and shear zones: i) stretched veins and *boudins* conform with the schistosity planes (Figure 6.4a) and ii) thrust-related gash veins define *en echelon* arrays or randomly distributed single extension fractures (Figure 6.4b). Both vein types coexist in outcrop scale and apparently represent progressive stages of deformation during thrust movement. Lenses and rods of ore are locally present in transposed isoclinal fold hinges.

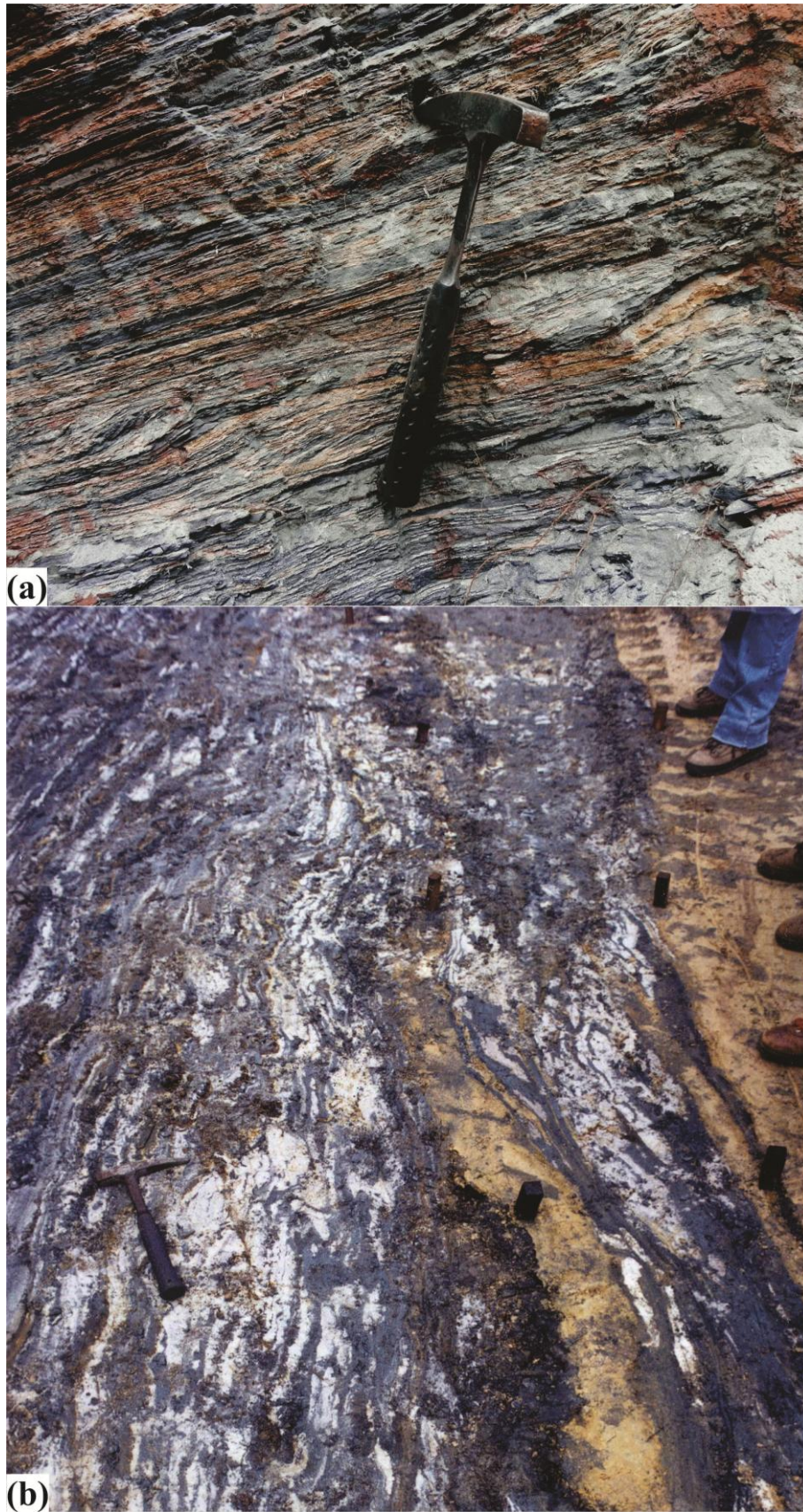


Figure 6.3. (a) Specularitic high-grade Serpentina-type schistose iron ore body hosted by itabirite from the Serra da Serpentina Group. (b) Outcrop of a Jacutinga-type Au-PGE vein; kindly provided by L.M. Lobato.



Figure 6.4. Outcrop of the two main types of veins associated with the Brasiliano-aged thrusts and shear zones. (a) Stretched veins and *boudins* are conformable with schistosity planes within the Serra do Sapo high-grade iron orebody (Conceição do Mato Dentro). (b) Thrust-related gash veins or extension fractures cutting the massive high-grade iron ore from the Minas Supergroup (Catas Altas).

Jacutinga-type veins (Figure 6.3b) are Au-PGE-rich and present a more complex (disequilibrium) mineral association including fine-grained specularite, quartz, magnetite (\pm goethite), minor phyllosilicates (talc, phlogopite and kaolinite), Mn oxide with Au, Pt, Pd-minerals such as palladseite Au-Pd alloys, and subordinate proportions of tourmaline, apatite and monazite (Henwood 1871, Hussak 1904, 1906, Cabral 1996, 2006). The minerals fill irregular extensional fractures with the development of breccias and alteration zones hosted by hydrothermally altered itabirites. They are very distinct from the itabirite-hosted orogenic type gold-bearing veins such as in Passagem de Mariana (Vial *et al.* 2007).

Most authors interpret Jacutinga-type veins to be a product of hydrothermal remobilization of platinum group elements (PGE) and Au from magmatic rocks (Olivo 1994, Olivo *et al.* 1994, 1995, 1996, Cabral 1996, 2006), due to the relatively high content of Au, its association with specularite/pyrolusite and the absence of sulfide minerals (Cabral 1996, 2006)

Olivo *et al.* (2011) reported an age of approximately 500Ma for the Jacutinga-type veins from Itabira based on Ar/Ar geochronology of muscovite, hornblende, and biotite. Cabral *et al.* (2015a) recently obtained age data of 495.6 ± 2.2 Ma from monazite crystals also collected from the Conceição Mine in Itabira (Figure 6.1). The Jacutinga-type veins are purportedly correlated with the collapse period of the Brasiliano orogeny during the Cambrian period (496Ma; Chauvet *et al.* 2001, Lüders *et al.* 2005, Cabral *et al.* 2009, 2015a, 2015b, Cabral & Zeh 2015). Vein occurrences appear to be restricted to the Cauê Formation in the eastern domain of the Quadrilátero Ferrífero district (Figure 6.1; Cabral *et al.* 2001, 2002, Galbiatti *et al.* 2007) where this vein type has been exploited as a by-product of the iron exploitation (Cabral 2006). Cabral *et al.* (2009) proposed a connection of the auriferous kaolinite-hematite quartz vein arrays of the Mil Oitavas deposit (Abreu *et al.* 1991, Cabral *et al.* 2015b), hosted by quartzite in the Serra do Espinhaço Range, with the Jacutinga-type ores and describes a Au-Pd-Pt north-trending belt along the Southern Espinhaço Range.

6.3. ANALYZED QUARTZ-SPECULARITE VEINS

6.3.1. Jacutinga-type Veins

Two samples of Jacutinga-type veins were sourced from the Gongo Soco and Itabira deposits (Figure 6.5). The Gongo Soco sample was collected from the beneficiation plant and provided by A. R. Cabral. It is comprised of massive quartz with disperse fine-grained specularite and mm-sized grains of gold (Figure 6.6a). The Itabira sample was provided by V. Lüders and comprises several mm-sized hematite plates. In addition to these samples, four samples were taken from quartz-hematite veins cutting the Cauê Formation and exposed along a road that connects the main highway BR381 and the locality of Barão de Cocais (coordinates: 19°52'24,8"/43°58'11,8"; Figures 6.5 and 6.6b).

6.3.2. Thrust Related Veins

6.3.2.1. *Foliation-concordant Quartz-hematite Veins*

Quartz-hematite veins were collected from an itabirite-hosted, high-grade orebody cropping out in the surroundings of the Morro do Pilar and Conceição do Mato Dentro iron deposits in the Southern Espinhaço Range (Figure 6.5). In the Morro do Pilar deposit we collected two samples: from the hinge zone of an isoclinal intrafolial folded vein hosted by quartz-itabirite (Figures 6.7a and 6.7b), and from a quartz-hematite pocket enclosed in a massive iron orebody (Figure 6.7c). In the Conceição do Mato Dentro deposit, three samples were collected from stretched quartz-specularite veins conform with the schistosity of a high-grade iron orebody (Figure 6.4a).

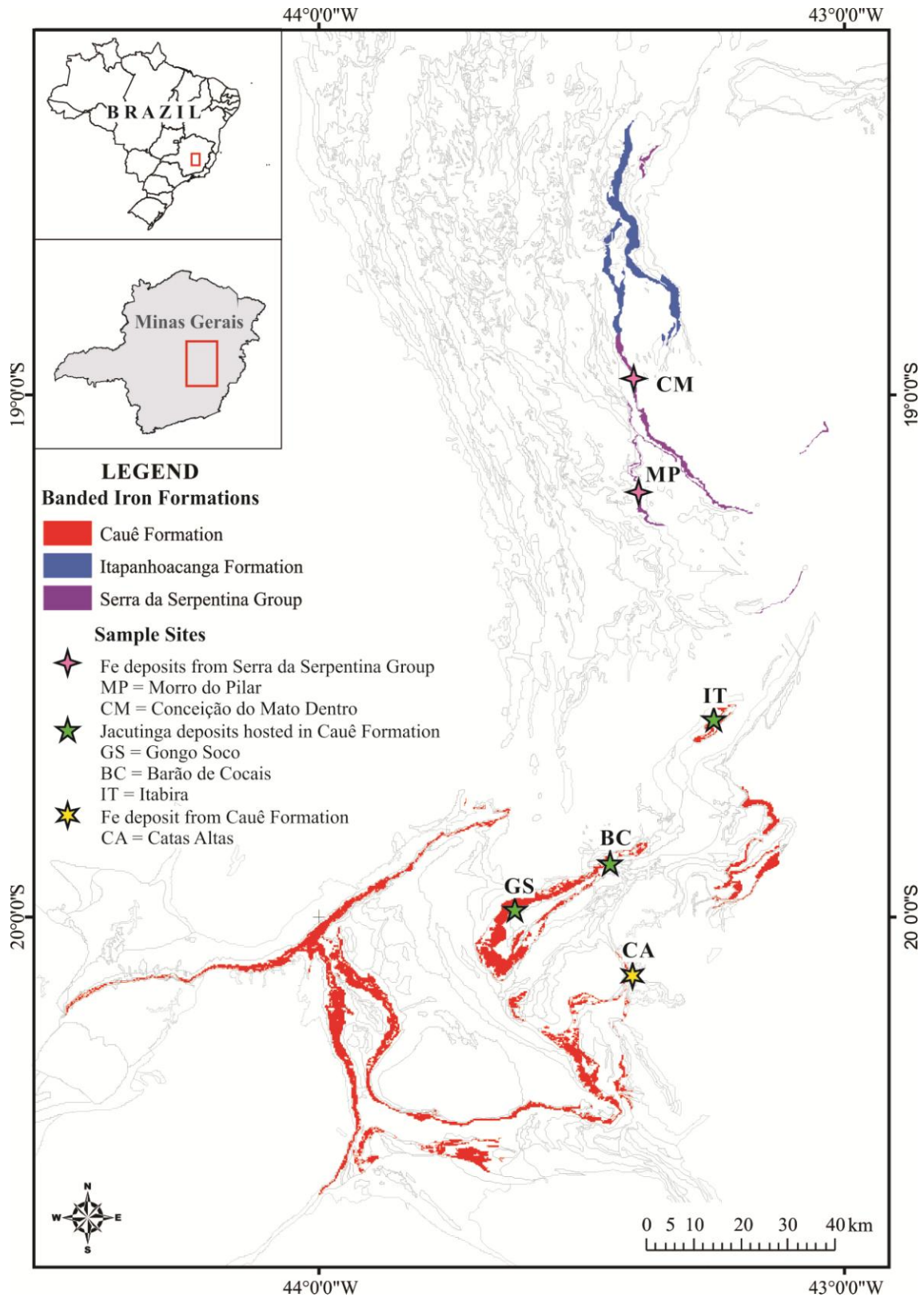


Figure 6.5. Simplified geological map of the Quadrilátero Ferrífero and the Southern Espinhaço Range, with location of vein samples from iron deposits: CA = Catás Altas, BC = Barão de Cocais, GS = Gongo Soco, IT = Itabira, MP = Morro do Pilar, CM = Conceição do Mato Dentro (modified after CPRM 2004, Lobato *et al.* 2005).

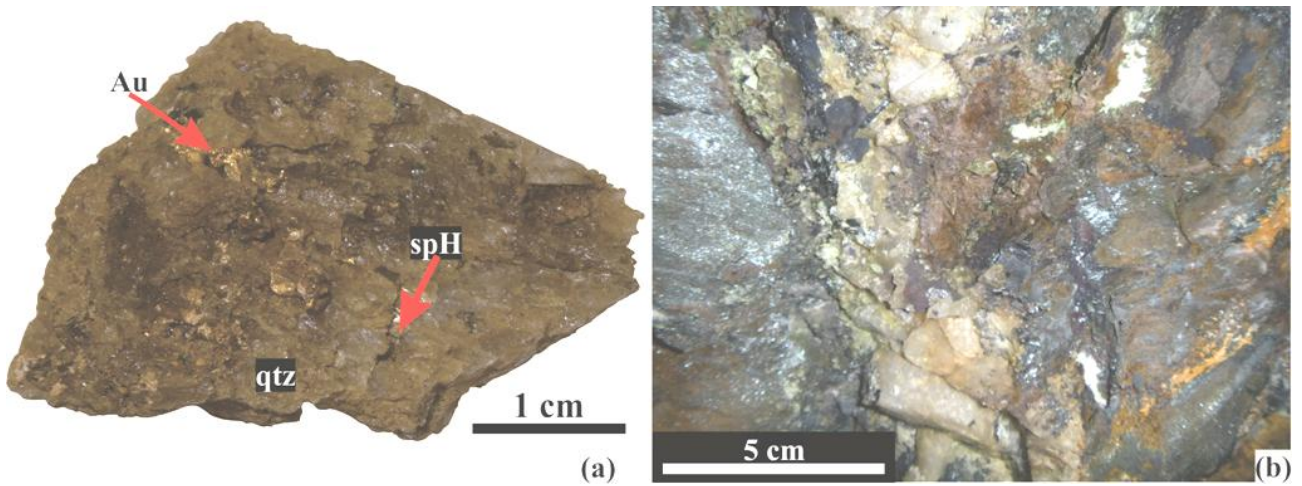


Figure 6.6. Jacutinga-type veins (a) Gongo Soco: Quartz vein with visible gold. (b) Barão de Cocais: Quartz-specularite vein hosted by a schistose, specularite-rich iron ore hosted by a shear zone. *Abbreviations:* qtz = quartz; spH = specularite.

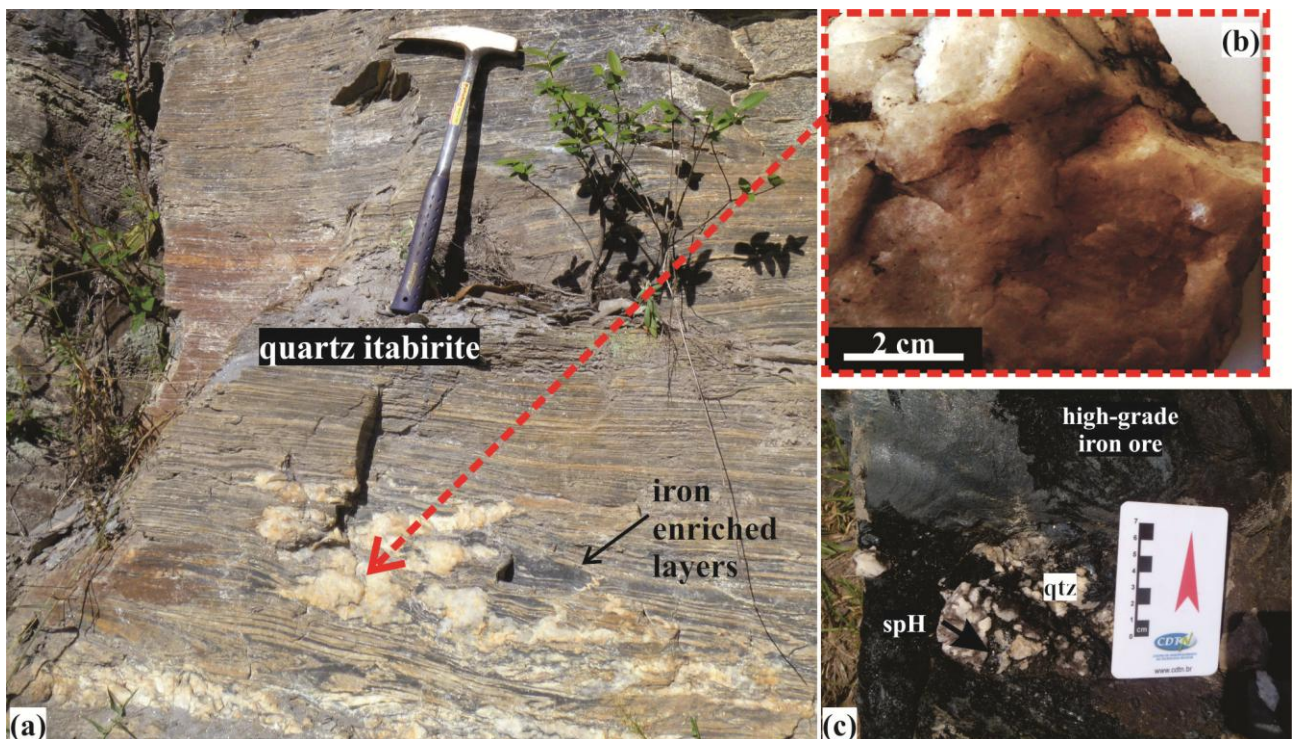


Figure 6.7. Samples from the Morro do Pilar deposit, Serra da Serpentina Group. (a) Outcrop of massive milky quartz vein in quartz itabirite. The itabirite is enriched in Fe along the contact with the vein. (b) Close up view of the massive quartz sample. (c) Quartz-specularite vein hosted by massive high-grade iron ore. *Abbreviations:* qtz = quartz; spH = specularite.

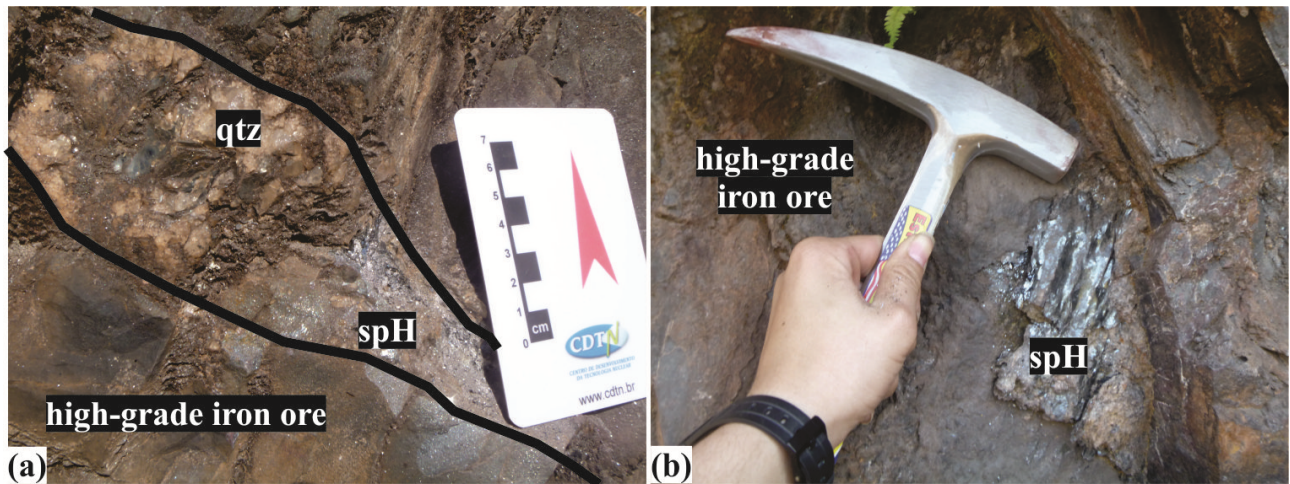


Figure 6.8. Quartz-specularite veins hosted by high-grade iron ore bodies from Catas Altas (a) Quartz-specularite vein in high-grade iron ore, and (b) Lepidoblastic specularite in high-grade iron ore. *Abbreviations:* qtz = quartz; spH = specularite.

6.3.2.2. *Gash Veins*

Samples of quartz and specularite crystals from gash veins related to Brasiliano thrusts were collected from the pit walls at the exhausted Catas Altas high-grade Fe ore deposit at the eastern border of the Quadrilátero Ferrífero (Figure 6.8). The gash veins define an *en-echelon* pattern cutting a massive high-grade orebody hosted by quartz itabirite of the Cauê Formation (Figure 6.4b). The vein is comprised mostly of massive milky quartz (Figure 6.8a) with minor coarse-grained hematite plates (Figures 6.8a and 6.8b).

6.4. ANALYTICAL PROCEDURES

Quartz-hosted fluid inclusions were examined using a Leica DMRXP and Olympus BX51 petrographic microscopes coupled to a Linkam FTIR600 stage at the Laboratory of Fluid Inclusions and Metalogenesis in the Center of Development of Nuclear Technology (LIFM/CDTN-Brazil). In addition, Olympus BX60 and a Nikon Eclipse E600 Pol microscopes coupled to a Linkam THMSG600 stage were used at the Institute of Geochemistry and Petrology of the Swiss Federal Institute of Technology Zurich (IGP/ETH-Zurich).

Fluid inclusions trapped in specularite crystals were analyzed with a Leica DRMPX microscope coupled to a Sony Exwave HAD BandW camera and a QUICAM FAST 1394 (QIMAGIN™) infrared light sensitive camera at the LIFM/CDTN. Whereas, an Olympus BX51 microscope coupled to a Linkam FTIR600 microthermometry stage and Olympus XM10 near-infrared (NIR) light sensitive camera were used at the University of Geneva.

Pure H₂O Syn Flinc® synthetic fluid inclusions (final ice melting temperature: 0°C; homogenization temperature: 374.1°C), CO₂ (CO₂ melting temperature: -56.6°C), H₂O-KCl (eutectic temperature: -10.7°C), H₂O-NaCl (eutectic temperature: -21.2°C) were used as calibration standards for microthermometry analyses. The microthermometry analyses were conducted following the methodology reported by Roedder (1984), Shepperd *et al.* (1985), Richards & Kerrich (1993), Goldstein & Reynolds (1994), Lüders & Ziemann (1999), Bailly *et al.* (2000), Rosière & Rios (2004) and Rios *et al.* (2006a, 2006b). Salinities were determined based on the final ice melting temperatures and were calculated as weight percentage (wt%) equivalent (eqv) to NaCl (Bodnar 1993, Bodnar & Vityk 1994). The program MacFlinCor by Brown & Hagemann (1995) was used to process the microthermometry data using the H₂O-NaCl-[KCl]-system (Bodnar & Vityk 1994) for aqueous-saline inclusions and the H₂O-CO₂-NaCl-system (Bowers & Helgeson 1983) for aqueous-carbonic inclusions.

For estimation of the fluid entrapment pressure in the isochoric diagrams (Figure 6.9), the temperature range from chlorite geothermometers previously determined by Lima (2009) for Serra do Sapo and by Cabral *et al.* (2012b) for the Gongo Soco was adopted. For those low-temperature fluids from Barão de Cocais, Gongo Soco, and Morro do Pilar, where isochores do not cross the geothermometer values, the maximum homogenization temperatures were used to estimate fluid trapping pressures (Figure 6.9).

A Jobin Yvon/Horiba LABRAM-HR 800 spectrometer equipped with a He-Ne laser (632.8nm) was used for Raman analysis. The Raman signal was collected using an Olympus BX-41 microscope equipped with a back illuminated CCD detector, cooled with liquid N₂ from Spectrum One. The acquisition time was 20s and the laser power 8mW. In order to reduce the signal/noise ratio each spectrum was repeatedly acquired 30 times. Collected Raman spectra were analyzed and optimized with Labspec 4.18 (Horiba Scientific) and Origin 8.0 (OriginLab) software.

In-situ chemical analyses of fluid inclusions were performed using a laser ablation-inductive coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) at the IGP/ETH-Zurich. The analytical system consisted of an ArF Excimer laser (Compex 110, Lambda Physik) with a wave-length in the deep ultraviolet part of the spectra (193nm), a Schwarzschild objective coupled to a petrographic reflected and transmitted light microscope and an Elan 6100 DRC Quadrupole ICP-MS from Perkin Elmer (Günther *et al.* 1997, Heinrich *et al.* 2003). The laser energy for mineral ablation varied from 20 to 30J/cm², laser pulse frequency was 10Hz, beam diameter was variable, carrier gas was He 1.1l/min and H₂ 5mL/min was used as an auxiliary gas. The dwell time was 10ms for most elements, except for S (12ms), Au (6 ms), Cl (25ms) and Br (80ms).

The analyzed isotopes in quartz-hosted fluid inclusions were: ⁷Li, ¹¹B, ²³Na, ²⁴Mg, ²⁹Si, ³²S, ³⁹K, ⁴⁴Ca, ⁴⁹Ti, ⁵¹V, ⁵⁵Mn, ⁵⁷Fe, ⁶⁰Ni, ⁶⁵Cu, ⁶⁶Zn, ⁷⁵As, ⁸⁸Sr, ¹²¹Sb, ¹³³Cs, ¹³⁷Ba, ¹⁹⁷Au, ²⁰⁸Pb, ²³²Th and ²³⁸U. During the quantification of Cl and Br contents in quartz-hosted fluid inclusions, a reduced group of elements was analyzed including ²³Na, ⁷Li, ¹¹B, ²⁸Si, ³⁵Cl, ³⁹K, ⁴⁴Ca, ⁷⁵As, and ⁷⁹Br. For analyses of the fluid inclusions trapped in specularite ⁷Li, ¹¹B, ²³Na, ²⁴Mg, ³²S, ³⁹K, ⁴³Ca, ⁴⁷Ti, ⁵¹V, ⁵⁷Fe, ⁶⁰Ni, ⁶⁵Cu, ⁶⁶Zn, ⁷⁵As, ⁸⁸Sr, ¹²¹Sb, ¹³³Cs, ¹³⁷Ba, ¹⁹⁷Au and ²³⁸U were analyzed. The Standard Reference Material (SRM) NIST610 was used as an external standard. For Cl and Br quantification in quartz-hosted fluid inclusions, an in-house scapolite (Sca-17) standard was used (Seo *et al.* 2011). Fluid inclusion salinity obtained by microthermometry (wt% NaCl_{eqv}) was applied as an internal standard for the fluid inclusion analyses (Heinrich *et al.* 2003).

The SILLS software (Guillong *et al.* 2008) was used for LA-ICP-MS data reduction, following the methodology described in Heinrich *et al.* (2003) and Guillong *et al.* (2008). Only signals above 3σ (background) and with a visually recognizable position of the fluid inclusion in the transient signal were considered for data interpretation in the acquired dataset. The summary of the obtained results and the calculated mean values of detection limit and 1σ for studied fluid inclusions are reported in Table 6.1.

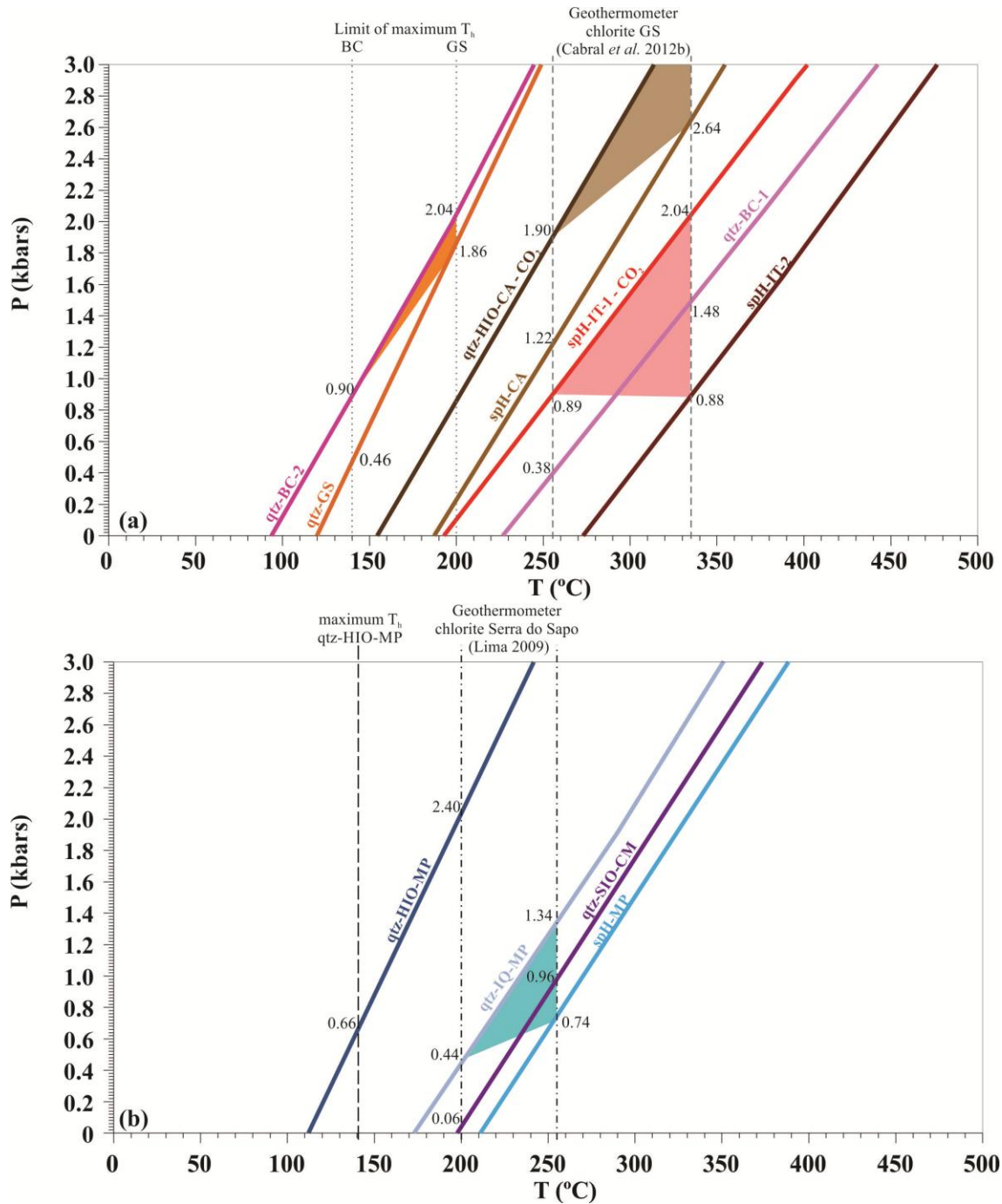


Figure 6.9. Isochors for the studied fluid inclusions showing the pressure (P) and temperature (T) constraints for entrapment conditions. (a) Fluids from Itabira, Barão de Cocais, Gongo Soco and Catas Altas deposits. The pressure was estimated using the maximum homogenization temperatures obtained by fluid inclusion microthermometry from Gongo Soco and Barão de Cocais (140° to 200°C) in combination with the chlorite geothermometer of Cabral *et al.* (2012b) for the Gongo Soco deposit. (b) Fluids from Serra da Serpentina Group, Morro do Pilar and Barão de Cocais deposits. The pressure was estimated using the maximum homogenization temperatures by fluid inclusion microthermometry from quartz-specularite from Morro do Pilar and Serra do Sapo in combination with the chlorite geothermometer of Lima (2009). *Abbreviations:* qtz = quartz, spH = specularite, BC = Barão de Cocais, GS = Gongo Soco, IT = Itabira, CA = Catas Altas, MP = Morro do Pilar and CM = Conceição do Mato Dentro.

6.5. ANALYTICAL RESULTS FROM FLUID INCLUSION STUDIES

Single fluid inclusions and fluid inclusion assemblages in quartz and specularite crystals were selected based on their occurrence in single crystals and were classified according to the origin criteria discussed by Roedder (1984) and Goldstein & Reynolds (1994). The observation of fluid inclusions trapped in specularite crystals was possible using NIR-light microscopy. Acquired microthermometry results are summarized in Tables 6.2 to 6.4.

Table 6.1 displays elemental concentration, detection limits and 1σ values for the analyzed quartz- and specularite-hosted fluid inclusions from the analyzed veins. Considerable concentrations of Na, K, As, Li, B, Sr, Cs, Mg, S, Cl and Br were detected in almost every type of fluid inclusions and are reported in box plots for comparison (Figures 6.10, 6.11 and 6.12). Figure 6.13 depicts the relationship between the contents of chlorine and bromine in the analyzed quartz-hosted fluid inclusions. The values for seawater and for the seawater evaporation path (McCaffrey *et al.* 1987) are plotted in these diagrams for comparison (Figure 6.13).

6.5.1. Fluid Inclusions in Veins from Au-PGE Jacutinga-type Deposits

6.5.1.1. *Barão de Cocais Deposit*

Quartz (qtz-BC):

Fluid inclusion assemblages from the Barão de Cocais veins comprise two-phase (liquid + vapor) aqueous-saline fluid inclusions. They are grouped into two distinct types according to the differences in the proportion of the vapor phase and final homogenization temperature (T_H). Fluid inclusions from type 1 (Figure 6.14a) contain higher proportion of the vapor (>10%) and, consequently, higher T_H (156°C to 305°C; Figure 6.15) than those from type 2 ($T_H = 77^\circ\text{C}$ -275°C; Figures 6.14b and 6.15). Both types occur as trails of pseudo-secondary assemblages. Both types of fluid inclusions are often large (>20 μm), with elongated irregular shape, sometimes with evidence of necking-down (Figures 6.14a and 6.14b).

Table 6.1. Summary of the elemental composition, detection limit and sigma error in fluid inclusions found in quartz and specularite crystals in studied deposits from Minas Supergroup (Quadrilátero Ferrífero) and Serra da Serpentina Group (Southern Espinhaço Range).

Sample	qtz-HIO-CA					qtz-QI-MP					qtz-HIO-MP					qtz-SIO-CM					qtz-GS				
	content (ppm)		DL	1 σ	N	content (ppm)		DL	1 σ	N	content (ppm)		DL	1 σ	N	content (ppm)		DL	1 σ	N	content (ppm)		DL	1 σ	N
	variation	mean	mean	mean		variation	mean	mean	mean		variation	mean	mean	mean		variation	mean	mean	mean		variation	mean	mean	mean	
Li	40 to 1693	190	0.5	0.5	31	112 to 255	164	0.8	15	12	5 to 28	14	0.4	3.2	10	15 to 94	34	0.6	6.3	6	80 to 696	245	2.4	18	25
B	105 to 4812	794	3.8	106	24	171 to 2648	867	5.2	100	12	273 to 1106	532	4.6	55	14	99 to 751	321	4.3	45.0	9	185 to 6108	1597	10	107	26
Na	9366 to 47431	27329	0.7	133	41	11751 to 39349	30191	1.2	167	14	33159 to 47199	38702	0.8	151	16	25593 to 53402	45292	0.7	258.3	16	18321 to 58637	38083	7.4	304	33
Mg	14 to 1386	335	0.4	44	5	nd	-	-	-	-	12 to 56	34	0.3	4.7	2	53 to 183	96	0.7	15	5	6 to 69	26	1.1	14	8
S	213 to 8451	3792	7.2	232	4	704 to 3683	1630	82	145	5	1658 to 14033	6231	90	466	4	408 to 8954	2743	47	660	6	412 to 13513	6240	95	576	12
K	1442 to 19162	5865	40	715	35	3202 to 48434	12374	80	934	12	5228 to 10557	7618	52	313	12	601 to 6472	3064	43	459	6	5440 to 19576	11823	86	617	27
Ca	642 to 25667	12994	64	2282	9	nd	-	-	-	-	300 to 752	492	88	53	3	1722 to 34642	8127	188	2165	7	302 to 11091	3188	253	2678	13
Cu	124 to 612	487	0.3	44	10	nd	-	-	-	-	nd	-	-	-	-	99 to 1296	604	1.3	68	6	4 to 557	93	2.8	11	9
Zn	9 to 197	76	1.1	20	4	11 to 38	25	1.7	7.6	2	nd	-	-	-	-	nd	-	-	-	-	nd	-	-	-	-
As	33 to 3332	873	0.7	32	40	80 to 5076	2093	1.3	52	14	403 to 7034	1697	1.0	39	16	544 to 3712	1677	1.1	57	16	106 to 2929	768	2.7	29	26
Sr	1 to 110	27	0.04	3.1	17	43 to 100	73	0.5	3.8	5	47 to 280	163	0.2	8.1	7	290 to 494	380	0.2	20	8	10 to 50	21	0.5	1.7	12
Sb	nd	-	-	-	-	5 to 13	8.7	0.4	1.5	4	8 to 35	21	0.6	5.5	2	nd	-	-	-	-	6 to 139	30	1.7	6.1	8
Cs	1 to 41	9.7	0.03	1.8	16	4 to 15	13	0.4	2.1	4	13 to 31	18	0.2	2.8	6	17 to 48	34	0.2	5.7	8	9 to 34	16	0.5	2.0	12
Ba	34 to 343	145	0.3	20	5	nd	-	-	-	-	nd	-	-	-	-	31 to 182	87	1.4	20	3	17 to 40	29	5.9	5.0	2
Cl	6627 to 85477	29234	1029	5552	9	46845 to 129632	77586	443	11912	7	33767 to 252727	84896	512	8051	9	59598 to 110359	73751	485	7874	6	47194 to 254745	107716	558	11977	13
Br	415 to 3791	1875	123	414	4	446 to 10699	4311	33	1058	3	331 to 12564	2291	38	528	8	469 to 6435	2200	36	395	5	402 to 11000	3692	35	552	7

CA = Catas Altas; MP = Morro do Pilar; CM = Conceição do Mato Dentro; GS = Gongo Soco; BC = Barão de Cocais; IT = Itabira. QI = quartz itabirite; HIO = high-grade iron ore and SIO = schistose high-grade iron ore. nd = not detected or all results below detection limit (DL) and/or 3 sigma error (3x 1 σ). (N) = Number of reliable analyses.

Cont. Table 6.1. Summary of the elemental composition, detection limit and sigma error in fluid inclusions found in quartz and specularite crystals in studied deposits from Minas Supergroup (Quadrilátero Ferrífero) and Serra da Serpentina Group (Southern Espinhaço Range).

Sample	qtz-BC-1					qtz-BC-2					spH-CA					spH-MP					spH-IT-1				
	content (ppm)		DL	1σ	N	content (ppm)		DL	1σ	N	content (ppm)		DL	1σ	N	content (ppm)		DL	1σ	N	content (ppm)		DL	1σ	N
	variation	mean	mean	mean		variation	mean	mean	mean		variation	mean	mean	mean		variation	mean	mean	mean		variation	mean	mean	mean	
Li	20 to 529	97	0.3	10	20	30 to 344	87	0.8	11	37	132 to 1299	749	0.2	18	15	73 to 1244	626	0.1	25	14	371 to 2676	996	0.3	55	13
B	100 to 641	354	4.1	36	19	33 to 1117	386	3.6	45	23	253 to 1308	777	3.4	34	15	272 to 866	425	1.9	63	14	244 to 449	361	2.9	58	8
Na	8786 to 37373	26084	0.5	98	24	13574 to 60447	37369	1.2	183	49	26624 to 48932	40657	0.4	137	16	42547 to 54337	47631	0.3	172	15	5291 to 89794	74486	0.5	290	13
Mg	2 to 30	17	0.3	2.2	6	4 to 258	45	0.5	5.4	14	16 to 1355	347	0.2	10	14	16 to 5862	915	0.1	25	13	177 to 2247	707	0.2	41	13
S	668 to 918	793	12	42	2	337 to 6110	2848	23	337	17	363 to 19005	5574	22	130	11	2088 to 10299	6409	27	497	4	2507 to 6787	4038	10	253	3
K	2445 to 23116	7243	27	506	22	2033 to 22310	10397	51	638	42	3413 to 13321	9388	33	165	14	4031 to 16074	10752	18	493	14	3538 to 39449	18669	30	862	13
Ca	294 to 9640	7370	57	1237	5	3294 to 36960	14738	69	2699	5	nd	-	-	-	-	nd	-	-	-	-	8971 to 21486	16629	356	4602	4
Cu	6 to 35	18	1.0	2.8	3	4 to 111	40	0.4	6.8	3	17 to 7129	1432	0.4	26	12	356 to 1230	775	0.4	38	4	866 to 6957	3597	0.6	106	11
Zn	nd	-	-	-	-	7 to 215	95	1.2	36	3	6 to 2457	591	1.1	19	9	67 to 951	263	0.7	18	6	424 to 5172	1786	1.2	93	13
As	78 to 535	212	0.5	12	23	84 to 810	245	0.9	23	47	53 to 1781	901	0.5	14	15	44 to 1556	507	0.3	27	13	73 to 417	179	0.5	16	10
Sr	2 to 7	4.3	0.1	0.8	14	3 to 55	18	0.1	1.5	14	9 to 258	125	0.1	3.3	13	60 to 306	167	0.04	6.4	13	107 to 313	178	0.07	10.6	13
Sb	4 to 17	8.6	0.3	1.5	4	2 to 10	5.3	0.3	0.8	5	7 to 82	32	0.3	3.7	9	nd	-	-	-	-	nd	-	-	-	-
Cs	7 to 34	21	0.1	1.4	14	16 to 99	36	0.1	3.3	26	7 to 34	24	0.1	1.4	15	14 to 622	75	0.05	4.5	15	52 to 116	75	0.09	6.2	13
Ba	3 to 9	6.0	0.4	1.7	3	3 to 45	20	0.5	5.4	6	167 to 493	321	0.6	15	7	144 to 2996	781	0.4	41	10	584 to 3434	1799	0.6	95	11
Cl	14535 to 46553	29159	418	3945	6	31803 to 141142	77187	599	8638	16															
Br	546 to 12959	2021	31	233	5	1387 to 5409	2548	44	368	12															

CA = Catas Altas; MP = Morro do Pilar; CM = Conceição do Mato Dentro; GS = Gongo Soco; BC = Barão de Cocais; IT = Itabira. QI = quartz itabirite; HIO = high-grade iron ore and SIO = schistose high-grade iron ore. nd = not detected or all results below detection limit (DL) and/or 3 sigma error (3x 1σ). (N) = Number of reliable analyses.

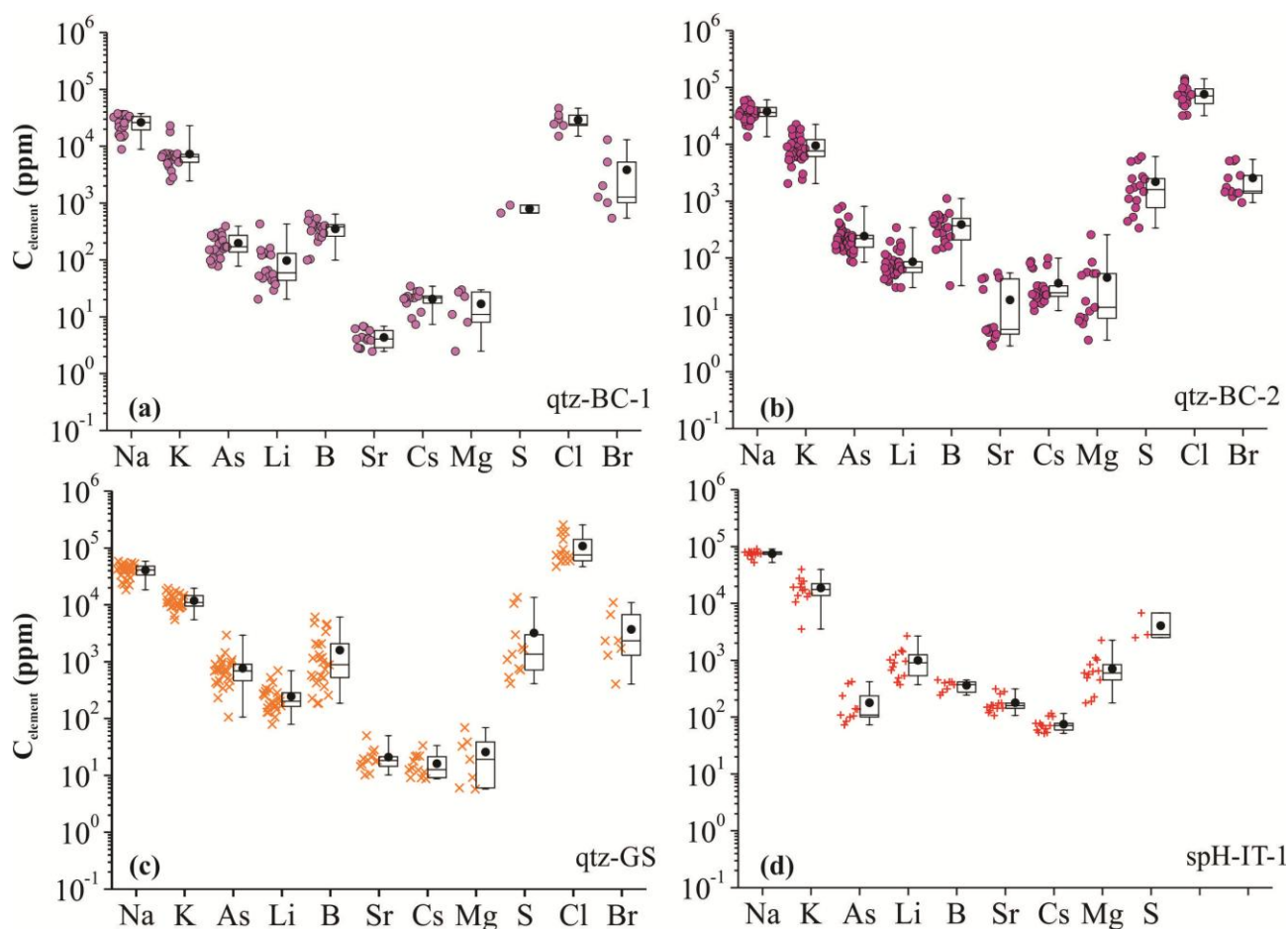


Figure 6.10. Box plots showing Na, K, As, Li, B, Sr, Cs, Mg, S, Cl and Br concentrations (ppm) determined by LA-ICP-MS analysis of quartz- and specularite-hosted fluid inclusions from Jacutinga-type veins. *Abbreviations:* qtz = quartz; spH = specularite; BC = Barão de Cocais; GS = Gongo Soco; IT = Itabira. Whiskers: maximum and minimum; box: 50% of data (Q1-Q3); line: median; circle: average.

Type 1 (qtz-BC-1): Type 1 fluid inclusions present eutectic temperatures (T_{eut}) varying from -48.8°C to -31.3°C , final ice melting temperature ($T_{\text{m-ice}}$) from -6.8°C to -2.6°C and calculated salinity from 4.3wt% to 10.2wt% NaCl_{eqv} (Figures 6.15, 6.16a and Table 6.2). The variation of pressure is from 0.38kbar to 1.48kbar (Figure 6.9a). The major elements analyzed are Na (av. 2.6wt%), Cl (av. 2.9wt%), K (av. 0.73wt%) and Br (av. 0.33wt%). Minor elements include B (av. 354ppm), As (av. 212ppm), Li (av. 97ppm), Mg (av. 17ppm), Sr (av. 4.3ppm), and Cs (av. 21ppm) (Figure 6.10a). The calculated Cl/Br molar ratio varies from 13 to 101 (av. 49; Figure 6.13).

Type 2 (qtz-BC-2): Type 2 fluid inclusions show T_{eut} ranging from -52.0°C to -29.9°C , $T_{\text{m-ice}}$ from -12.0°C to -2.7°C and salinity from 4.5wt% to 16.0wt% NaCl_{eqv} (Figures 6.15, 6.16a and Table 6.2). Calculated pressure ranges from 0.90kbar to 2.04kbar (Figure 6.9a). The major elements analyzed are Cl (av. 7.6wt%), Na (av. 3.8wt%), K (av. 0.95wt%), Br (av. 0.25wt%) and S (av.

0.22wt%). Trace elements include (Figure 6.10b) B (av. 386ppm), As (av. 245ppm), Li (av. 87ppm), Mg (av. 45ppm), Cs (av. 36ppm) and Sr (av. 18ppm). Cl/Br molar ratios vary from 52 to 174 with an average of 85 (Figure 6.13).

6.5.1.2. Gongo Soco Deposit

Quartz (qtz-GS):

Aqueous-saline two-phase (liquid + vapor) fluid inclusions hosted in these quartz veins occur in primary clusters (Figure 6.14c). They are similar to the type 2 (low T_H) fluid inclusions found in the quartz vein from Barão de Cocais. T_H ranges from 98°C to 142°C, T_{eut} from -44.5°C to -33.3°C, T_{m-ice} from -12.5°C to -6.5°C and salinities from 9.9wt% to 16.4wt% NaCl_{eqv} (Figures 6.15, 6.16a and Table 6.2). The minimum calculated pressure is 0.46kbar and the maximum is 1.86kbar (Figure 6.9a). Those fluid inclusions contain Cl (av. 10.8wt%), Na (av. 4.1wt%), K (av. 1.2wt%), Br (av. 0.37wt%), S (av. 0.32wt%) and B (av. 0.16wt%) as major elements and minor As (av. 768ppm), Li (av. 245ppm), Mg (av. 26ppm), Sr (av. 21ppm) and Cs (av. 16ppm). The Cl/Br molar ratio is variable (40 to 436) with the average of 127 (Figure 6.13).

Table 6.2. Summary of microthermometry data obtained for fluid inclusions in quartz and specularite from veins associated with the Au-PGE mineralization in the Jacutinga-type deposits (Quadrilátero Ferrífero).

Deposit	Mineral	FI type	T_{eut} (°C)	T_{CO_2} (°C)	T_{m-ice} (°C)	T_{m-HH} (°C)	T_{clath} (°C)	T_{H-CO_2} (°C)	T_H (°C)	wt% NaCl _{eqv}
Gongo Soco	quartz	2-phases	-44.5 to -33.3 (39)	-	-12.5 to -6.5 (39)	-	-	-	98 to 142 (39)	9.9 to 16.4 (39)
		2-phases (type 1)	-48.8 to -31.3 (22)	-	-6.8 to -2.6 (22)	-	-	-	156 to 305 (22)	4.3 to 10.2 (22)
Barão de Cocais	quartz	2-phases (type 2)	-52 to -29.9 (75)	-	-12.0 to -2.7 (75)	-	-	-	77 to 275 (75)	4.5 to 16.0 (75)
		3-phases Carbonic (type 1)	-38.9 to -33.8 (18)	-59.4 to -57.8 (18)	-	-	-10.0 to -8.4 (18)	23.4 to 28.4 (18)	335 to 364 (18)	23.2 to 24.2 (18)
Itabira	specularite	3-phase (type 2)	-37.2 to -31.2 (4)	-	-24.6 to -24.3 (4)	-12.5 to -11.5 (4)	-	-	276 to 301 (4)	25.2 to 25.3 (4)

(n) = number of analyzed fluid inclusions; T_{eut} = eutectic temperature; T_{CO_2} = CO₂ ice melting temperature; T_{m-ice} = final ice melting temperature; T_{m-HH} = final hydrohalite melting temperature; T_{H-CO_2} = CO₂ homogenization temperature; T_H = final homogenization temperature; T_{clath} = clathrate melting temperature.

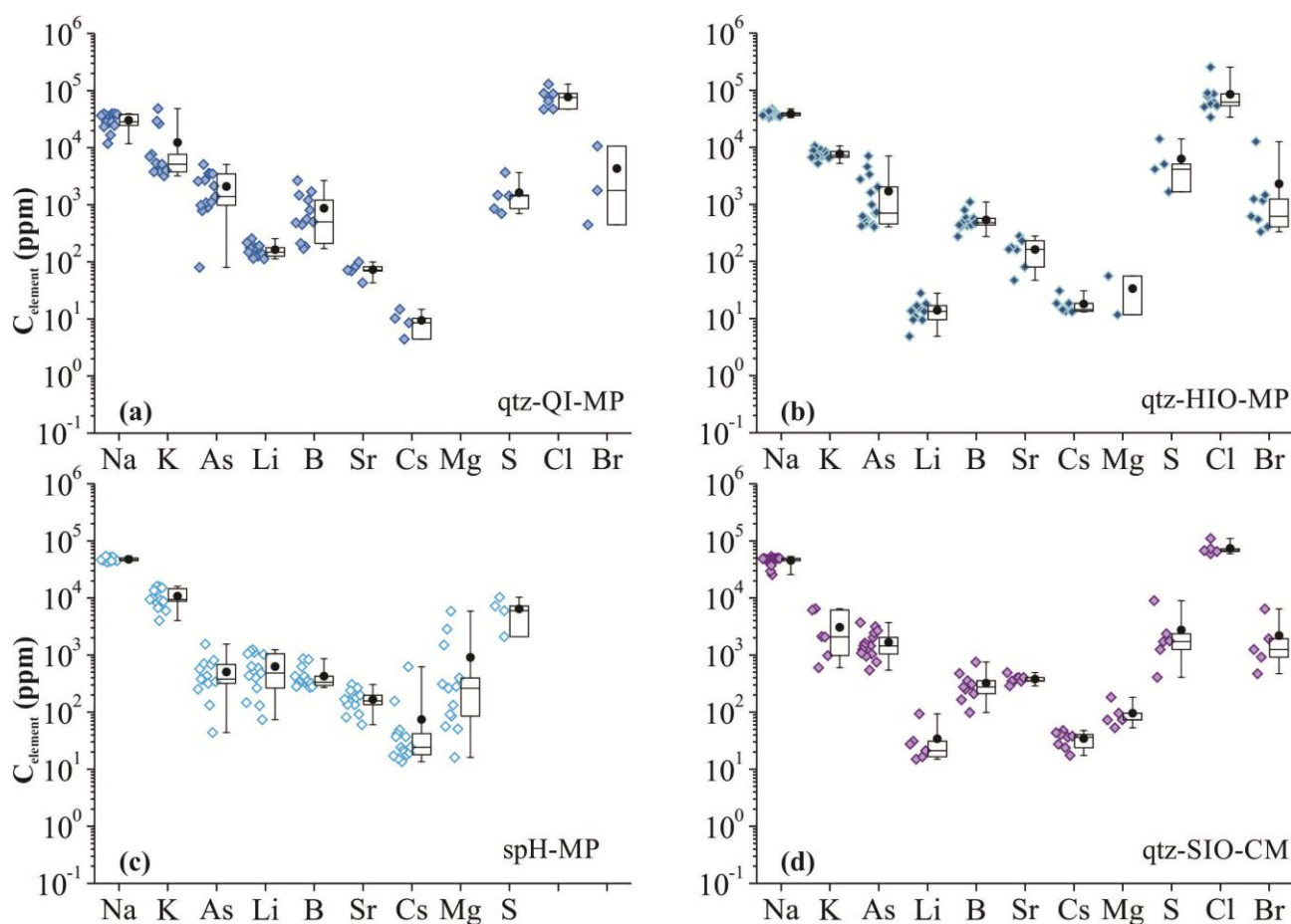


Figure 6.11. Box plots showing Na, K, As, Li, B, Sr, Cs, Mg, S, Cl and Br concentrations (ppm) in quartz- and specularite-hosted fluid inclusions in thrust related veins from Southern Espinhaço Range, determined by LA-ICP-MS. Abbreviations: HIO = high-grade iron ore; QI = quartz itabirite; qtz = quartz; spH = specularite; MP = Morro do Pilar; CM = Conceição do Mato Dentro. Whisker: maximum and minimum; box: 50% of data (Q1-Q3); line: median; circle: average.

Table 6.3. Summary of microthermometry data obtained for fluid inclusions from veins from Serra da Serpentina Group.

Area	Host rock	Mineral	FI type	T_{eut} (°C)	$T_{\text{m-ice}}$ (°C)	T_{H} (°C)	wt% NaCl_{eqv}
Morro do Pilar	Quartz itabirite	quartz	2-phase	-50.2 to	-7.4 to	108 to	8.1 to
				-39.0 (15)	-5.2 (15)	220 (15)	11.0 (15)
	Hard high-grade iron ore	quartz	2-phase	-46.5 to	-9.6 to	91 to 139	9.9 to
-36.0 (23)				-6.5 (23)	(23)	13.5 (23)	
Conceição do Mato Dentro	Schistose iron ore body	specularite	3-phase	-28.5 to	-11.5 to	185 to	12.9 to
		quartz	2-phase	-22.9 (17)	-9.0 (17)	242 (17)	15.5 (17)
Conceição do Mato Dentro	Schistose iron ore body	quartz	2-phase	-41.2 to	-9.8 to	153 to	6.3 to
				-33.1 (18)	-3.9 (18)	228 (18)	13.7 (18)

(n) = number of analyzed fluid inclusions; T_{eut} = eutectic temperature; $T_{\text{m-ice}}$ = final ice melting temperature; T_{H} = final homogenization temperature.

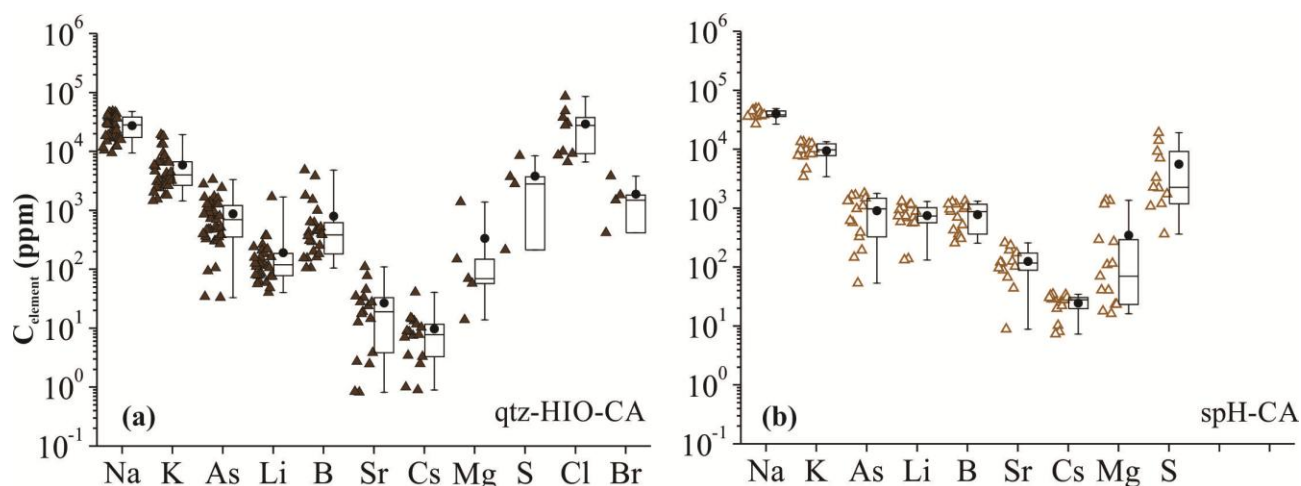


Figure 6.12. Box plots showing Na, K, As, Li, B, Sr, Cs, Mg, S, Cl and Br concentrations (ppm) in quartz- and specularite-hosted fluid inclusions in thrust vein from the Catas Altas deposit, determined by LA-ICP-MS. *Abbreviations:* HIO = high-grade iron ore; qtz = quartz; spH = specularite. Whisker: maximum and minimum; box: 50% of data (Q1-Q3); line: median; circle: average.

Table 6.4. Summary of microthermometry data obtained for fluid inclusions in quartz and specularite crystals from the Catas Altas deposit, Quadrilátero Ferrífero.

Mineral	FI type	T_{eut} (°C)	T_{CO_2} (°C)	T_{m-ice} (°C)	T_{m-HH} (°C)	T_{clath} (°C)	T_{H-CO_2} (°C)	T_H (°C)	wt% NaCl _{eqv}
quartz	3-phase aqueous-carbonic	-34.0 to -24.2 (38)	-58.8 to -56.8 (45)	-	-	2.2 to 8.1 (45)	13.2 to 29.7 (45)	300 to 326 (45)	3.8 to 13.0 (45)
	3-phase aqueous-saline	-51.6 to -31.9 (29)	-	-12.6 to -5.2 (29)	-26.7 to -21.7 (29)	-	-	167 to 204 (29)	8.1 to 16.5 (29)

(n) = number of analyzed fluid inclusions; T_{eut} = eutectic temperature; T_{CO_2} = CO₂ melting temperature; T_{m-ice} = final ice melting temperature; T_{m-HH} = final hydrohalite melting temperature; T_{H-CO_2} = CO₂ homogenization temperature; T_H = final homogenization temperature; T_{clath} = clathrate melting temperature.

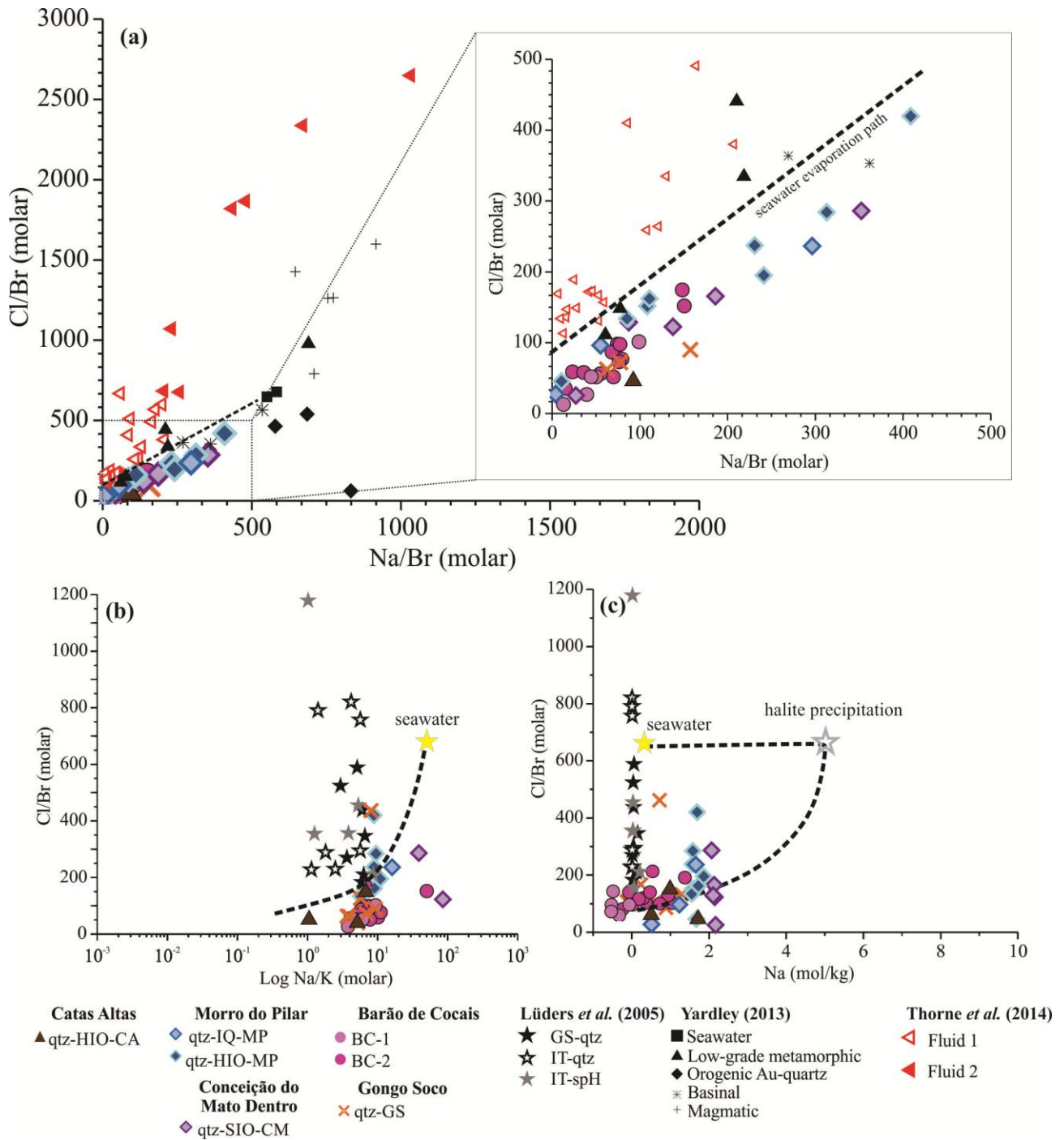


Figure 6.13. Cl/Br molar ratio versus Na/Br (molar) (a), log Na/K (molar) (b) and Na (mol/kg) (c). These diagrams illustrate the behavior of Cl and Br in quartz-hosted fluid inclusions from Jacutinga and thrust-type veins compared with seawater and seawater evaporation path (McCaffrey *et al.* 1987). For comparison data from Lüdgers *et al.* (2005), Yardley (2013) and Thorne *et al.* (2014) are also plotted. *Abbreviations:* qtz = quartz; spH = specularite; HIO = hard high-grade iron ore; IQ = quartz itabirite; SIO = schistose high-grade iron ore; BC = Barão de Cocais; GS = Gongo Soco; IT = Itabira; MP = Morro do Pilar deposit; CM = Conceição do Mato Dentro deposit; CA = Catas Altas deposit.

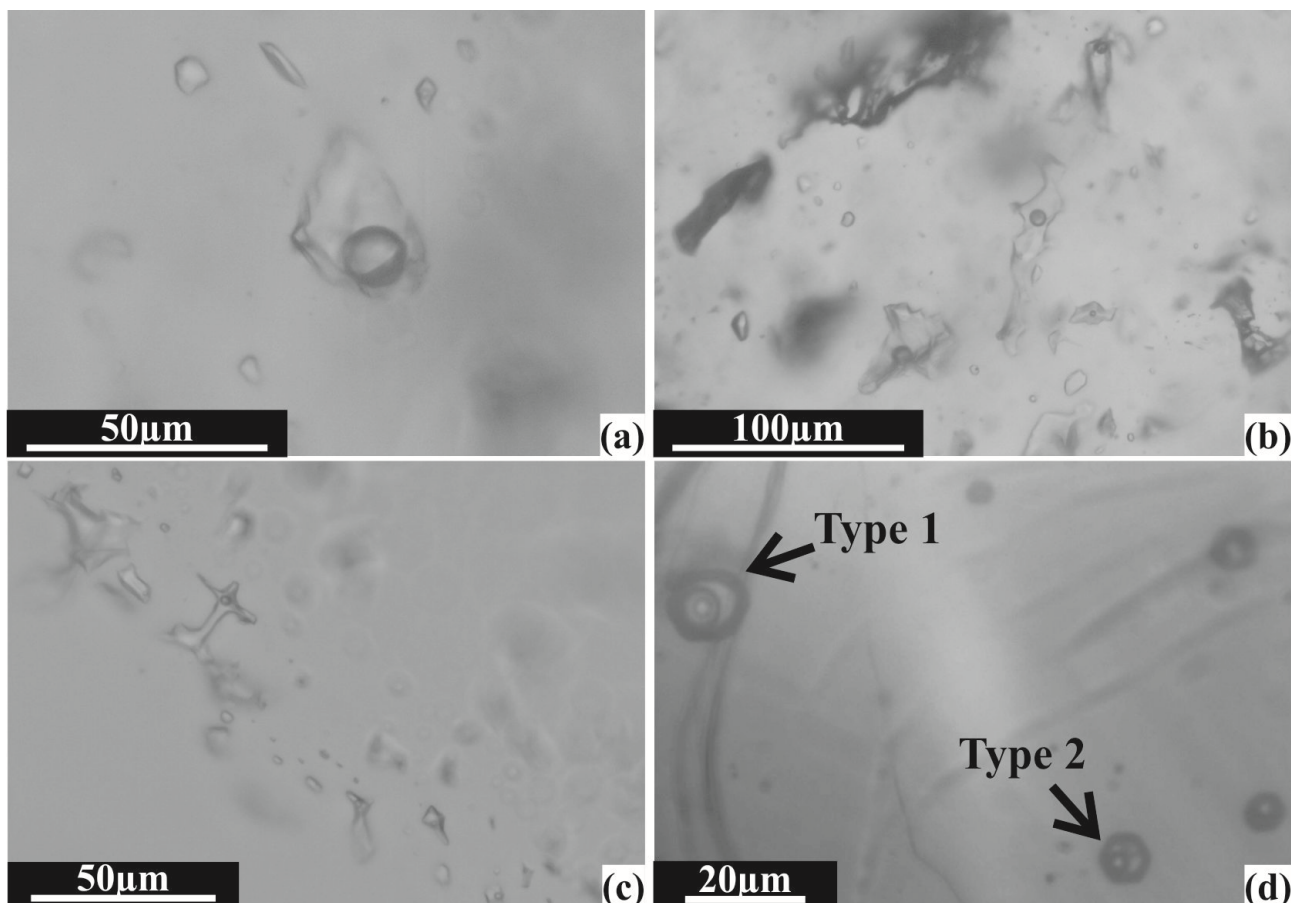


Figure 6.14. Fluid inclusion assemblages in quartz and specularite from Jacutinga-type veins. (a) Type 1, two-phase, aqueous-saline fluid inclusions in quartz from the Barão de Cocais deposit. (b) Type 2, two-phase, aqueous-saline fluid inclusions in quartz from the Barão de Cocais deposit. (c) Two-phase aqueous-saline fluid inclusions hosted in quartz from Gongo Soco deposit. (d) Coexistence of three-phase, aqueous-carbonic fluid inclusion (type 1) with three-phase, aqueous-saline fluid inclusions (type 2) in specularite crystal from Itabira (NIR transmitted-light microphotograph).

6.5.1.3. Itabira Deposit

Specularite (spH-IT):

Specularite crystals from the Itabira Jacutinga deposit host two types of coexisting primary fluid inclusions (Figure 6.14d). Both types usually present negative crystal shapes.

Type 1 (spH-IT-1): Type 1 aqueous-carbonic three-phase fluid inclusions (CO_2 liquid + CO_2 vapor + liquid) are most abundant. They show high T_H which varies from 335°C to 364°C , T_{eut} from -38.9°C to -33.8°C , CO_2 homogenization temperatures ($T_{H-\text{CO}_2}$) from 23.4°C to 28.4°C , clathrate melting temperatures (T_{clath}) from -10.0°C to -8.4°C , CO_2 melting temperatures ($T_{m-\text{CO}_2}$)

from -59.4°C to -57.8°C , CO_2 density from $0.647\text{g}/\text{cm}^3$ to $0.729\text{g}/\text{cm}^3$ and salinities from 23.2wt% to 24.2wt% NaCl_{eqv} (Figures 6.15, 6.16a, 6.16b, 6.16c and Table 6.2). Pressure calculations indicate variations from 0.89kbar to 2.04kbar (Figure 6.9a). The major elements in fluid inclusions trapped in specularite are Na (av. 7.4wt%), K (av. 1.9wt%) and S (av. 0.40wt%). Lithium (av. 996ppm), Mg (av. 707ppm), B (av. 361ppm), As (av. 179ppm), Sr (av. 178ppm) and Cs (av. 75ppm) are present in small amounts (Figure 6.10d). This fluid is distinctive because of its high content of Cu (av. 3597ppm), Zn (av. 1786ppm) and Ba (av. 1799ppm) detected in most fluid inclusions (Table 6.1).

Type 2 (spH-IT-2): Type 2 aqueous-saline three-phase (solid + liquid + vapor) fluid inclusions display variations of T_{eut} from -37.2°C to -31.2°C , T_{H} from 276°C to 301°C , $T_{\text{m-ice}}$ from -24.6°C to -24.3°C , salinities from 25.2wt% to 25.3wt% NaCl_{eqv} and final hydrohalite melting temperature (T_{HH}) from -12.5°C to -11.5°C (Figures 6.15, 6.16a and Table 6.2). The solid phase did not present any change neither in shape nor size even after heating up to 300°C . The maximum pressure estimated is 0.88kbar (Figure 6.9a).

6.5.2. Fluid Inclusions from Thrust Related-veins that Cut High-grade Iron Ore Deposits

6.5.2.1. *Morro do Pilar deposit*

Quartz:

Fluid inclusion assemblages from shear-controlled vein systems parallel to the regional schistosity, hosted in both itabirite and iron ore from Morro do Pilar share common features. They comprise pseudo-secondary, aqueous-saline two-phase (vapor + liquid) fluid inclusions, with irregular shape and some of them present vestiges of necking-down. These inclusions are relatively large (av. $40\mu\text{m}$) with the vapor phase corresponding to about 5% to 10vol% (Figures 6.17a and 6.17b).

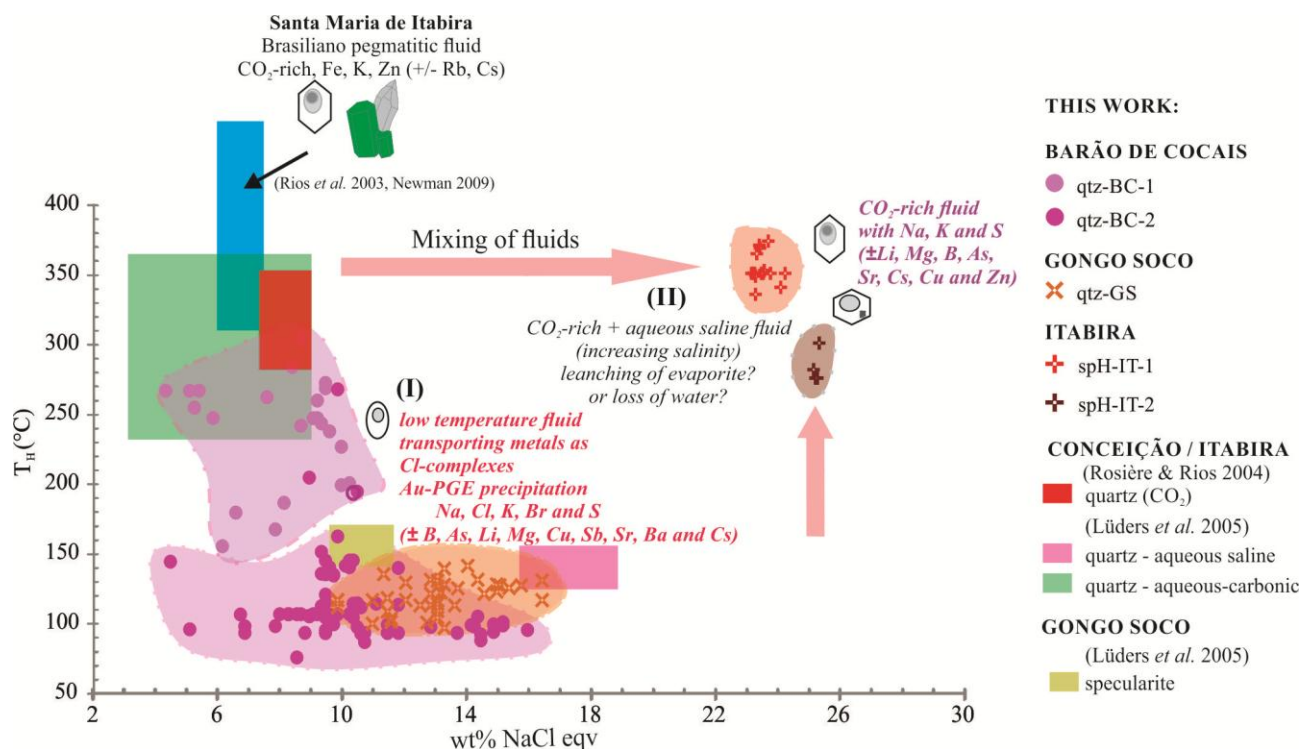


Figure 6.15. Diagram of homogenization temperature (TH) versus salinity (wt% NaCl_{eqv}) summarizing the microthermometry results and the proposed model for hydrothermal (Brasiliano) fluid evolution Jacutinga-type Au-PGE veins, eastern of Quadrilátero Ferrífero. (I) low- to moderate-temperature and salinity fluid from Gongo Soco and Barão de Cocais. This fluid is similar to Jacutinga-type fluids studied by Lüders *et al.* (2005) hosted by quartz from Itabira and specularite from Gongo Soco. The Au-PGE transport may have occurred by Cl-complexes (AuCl₄⁻) under oxidizing and acidic conditions, in the presence of a strong oxidizing agent. (II) The coexistence of a CO₂-rich fluid and an aqueous saline brine indicates that mixtures of fluids have happened in the region, resulting in Au-PGE transport and precipitation. The aqueous-carbonic fluid may be a variation of the fluids from the anatectic pegmatites from Santa Maria de Itabira (Rios *et al.* 2003, Newman 2009) which are similar to the fluids present in Catas Altas (this work) and Itabira (Lüders *et al.* 2005, Rosière & Rios 2004).

Fluid inclusion assemblages hosted in quartz itabirite (qtz-QI-MP) display T_{eut} ranging from -50.2°C to -39.0°C, $T_{\text{m-ice}}$ from -7.4°C to -5.2°C, T_{H} from 108°C to 220°C and salinities from 8.1wt% to 11.0wt% NaCl_{eqv} (Figures 6.16d, 6.18 and Table 6.3). Pressure of entrapment varies from 0.44kbar to 1.34kbar (Figure 6.9b). This type of fluid inclusions have Cl (av. 7.8wt%), Na (av. 3.0wt%) and K (av. 1.2wt%). Bromine (av. 0.43wt%), As (av. 0.21wt%) and S (av. 0.16wt%) are also detected in large amounts (Figure 6.11a). Traces of B (av. 867ppm), Li (av. 164ppm), Sr (av. 73ppm) and Cs (av. 13ppm) are also present. The Cl/Br ratio ranges from 27 to 237 (Figure 6.13).

High-grade iron ore (qtz-HIO-MP): Fluid inclusions in the veins hosted by the high-grade iron ore have T_{eut} varying from -46.5°C to -36.0°C, $T_{\text{m-ice}}$ from -9.6°C to -6.5°C (9.9wt% to

13.5wt% NaCl_{eqv}) and T_{H} from 91°C to 139°C (Figures 6.16d, 6.18 and Table 6.3). Pressure ranges from 0.66kbar to 2.40kbar (Figure 6.9b). Abundant elements in these fluid inclusions include Cl (av. 8.5wt%), Na (av. 3.9wt%), K (av. 0.76wt%), S (av. 0.62wt%), Br (av. 0.23wt%) and As (av. 0.17wt%). Traces of B (av. 532ppm), Sr (av. 163ppm), Cs (18ppm) and Li (av. 14ppm) are also present (Figure 6.11b). The average value for Cl/Br ratio is 204 but it varies from 45 to 420 (Figure 6.13).

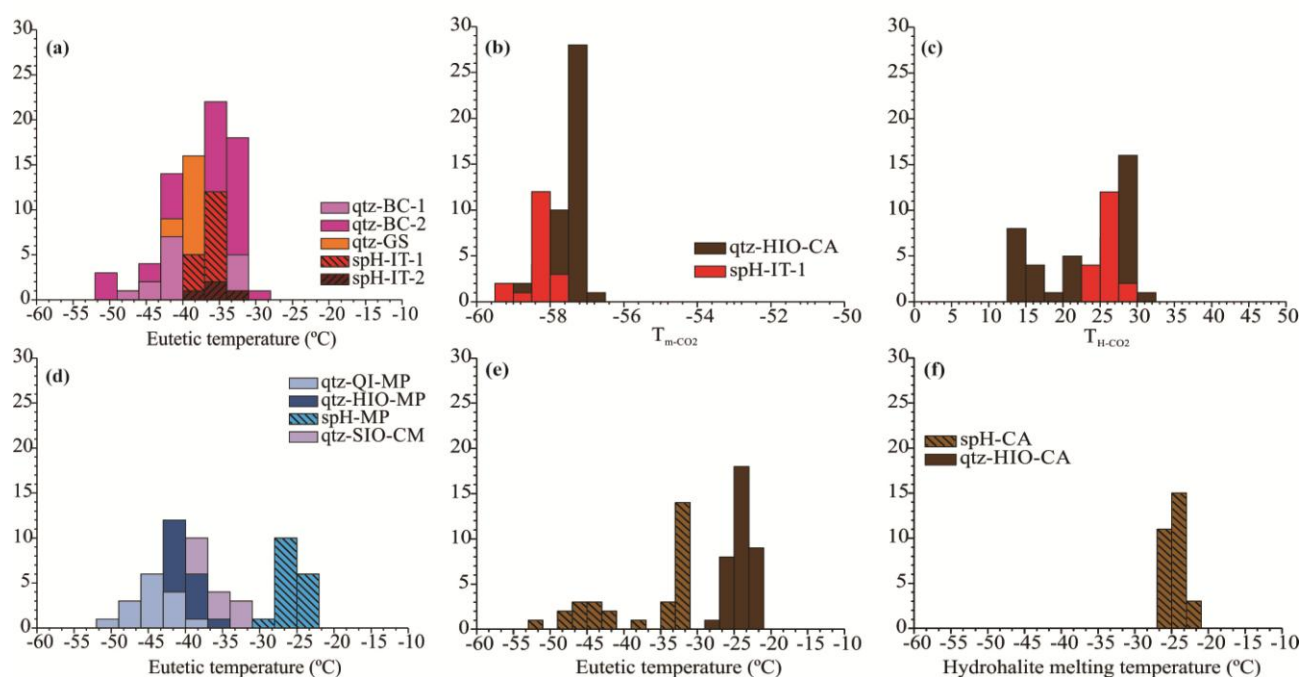


Figure 6.16. Microthermometry results for the studied fluid inclusions. (a) Histogram of eutectic temperatures in fluid inclusions from Jacutinga-type deposits. (b) CO_2 melting and (c) CO_2 homogenization temperatures for quartz-hosted aqueous-carbonic fluid inclusions from Catas Altas (qtz-HIO-CA) and specularite-hosted inclusions from Itabira (spH-IT-1). (d) Eutectic temperatures for fluid inclusions in quartz and specularite from Serpentina-type deposits. (e) Eutectic temperatures and (f) hydrohalite melting temperatures for fluid inclusions from Catas Altas deposit. *Abbreviations:* qtz = quartz; spH = specularite; HIO = hard high-grade iron ore; QI = quartz itabirite; SIO = schistose high-grade iron ore; BC = Barão de Cocais; GS = Gongo Soco; IT = Itabira; MP = Morro do Pilar deposit; CM = Conceição do Mato Dentro deposit; CA = Catas Altas deposit.

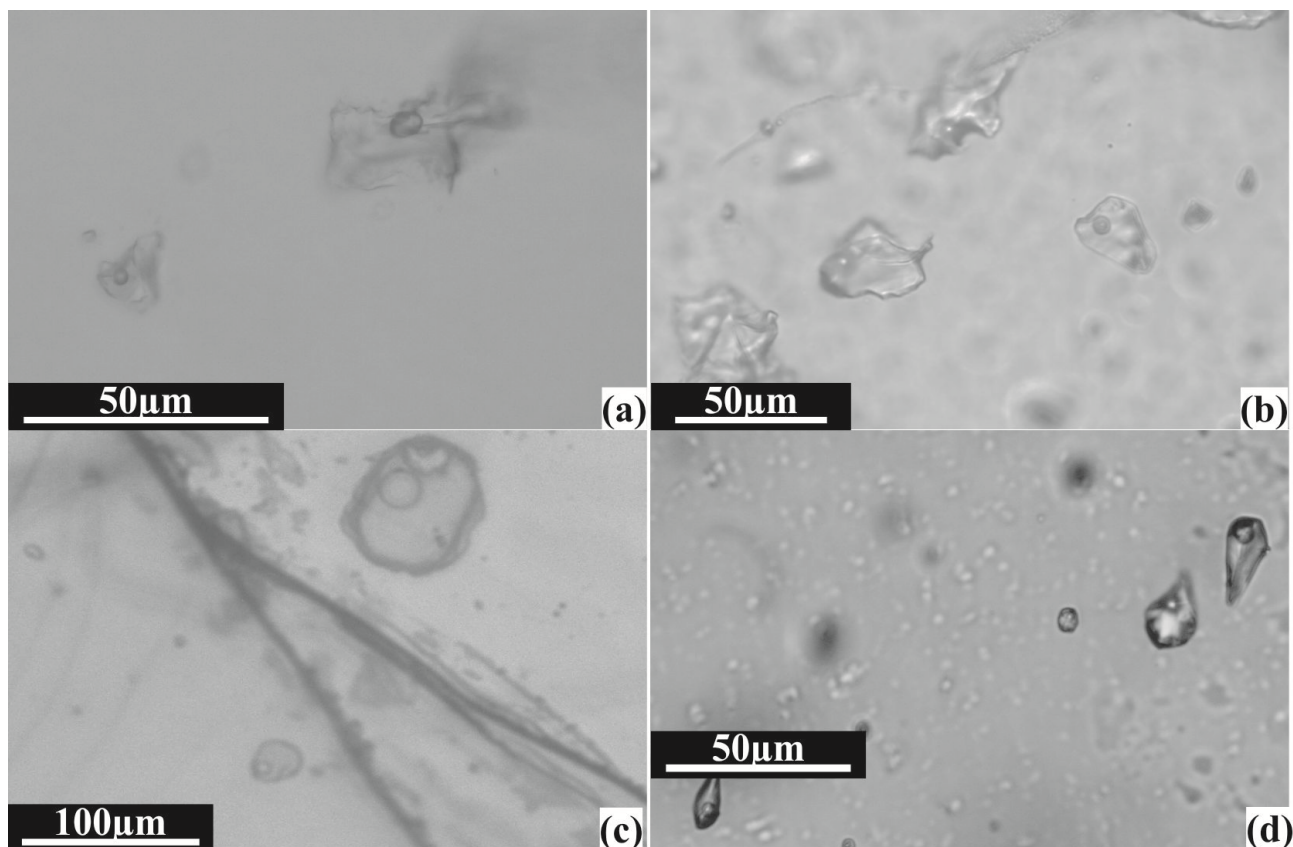


Figure 6.17. Fluid inclusion assemblages in quartz and specularite from veins of the Serra da Serpentina Group. (a) Two-phase, aqueous-saline fluid inclusions in quartz from the quartz itabirite hosted vein from Morro do Pilar. (b) aqueous-saline fluid inclusions in quartz from the hard high-grade iron ore vein, Morro do Pilar. (c) Three-phase fluid inclusion in specularite from hard high-grade iron ore hosted vein from Morro do Pilar (NIR transmitted light). (d) two-phase fluid inclusions in quartz from the schistose high-grade iron ore vein from Conceição do Mato Dentro.

Specularite (spH-MP):

Specularite crystals from Morro do Pilar deposit display good transparency under NIR light and contain large primary fluid inclusions, with an average size of 45µm. The fluid inclusions are aqueous-saline three-phase (liquid + solid + vapor). The vapor fraction occupies 10% and the solid phase does not dissolve during the heating experiments (Figure 6.17c). The T_{eut} varies from -28.5°C to -22.9°C, T_{H} from 185°C to 242°C, $T_{\text{m-ice}}$ from -11.5°C to -9.0°C and salinities from 12.9wt% to 15.5wt% NaCl_{eqv} (Figures 6.16d, 6.18 and Table 6.3). The maximum pressure of entrapment is estimated to be 0.74kbar (Figure 6.9b). Sodium (av. 4.8wt%), K (av. 1.1wt%), and S (av. 0.61wt%) are the dominant analyzed constituents of fluid inclusions trapped in specularite crystals from Morro do Pilar. Magnesium (av. 915ppm), Li (av. 626ppm), As (av. 507ppm), B (425ppm), Sr (av.

167ppm) and Cs (av. 75ppm) are present in small amounts (Figure 6.11c). Barium (144 to 2996ppm) appears in most fluid inclusions (Table 6.1).

6.5.2.2. *Conceição do Mato Dentro deposit*

Quartz (qtz-SIO-CM):

The quartz samples were collected from the concordant veins cutting the schistose high-grade iron ore body. They contain <30 μ m aqueous-saline two-phase (vapor + liquid) primary fluid inclusions displaying a negative crystal to elongated shape (Figure 6.17d). The vapor phase occupies about 5% to 15% of the inclusion. The T_H varies from 153°C to 228°C, T_{m-ice} -9.8°C and -3.9°C; T_{eut} -41.2°C and -33.1°C; and calculated salinities between 6.3wt% and 13.7wt% NaCl_{eqv} (Figures 6.16d, 6.18 and Table 6.3). The maximum pressure of entrapment is estimated to be 0.96kbar (Figure 6.9b).

The major elements analyzed from the Conceição do Mato Dentro quartz grains are Cl (av. 7.4wt%), Na (av. 4.5wt%), K (av. 0.31wt%), S (av. 0.27wt%), Br (av. 0.22wt%) and As (av. 0.17wt%). Lower concentrations of Sr (av. 380ppm), B (av. 321ppm), Mg (av. 96ppm), Li (av. 34ppm), Cs (av. 34ppm) are present (Figure 6.11d). The average Cl/Br molar ratio is 146, ranging from 25 to 286 (Figure 6.13).

6.5.2.3. *Catas Altas deposit*

Quartz (qtz-HIO-CA):

Primary aqueous-carbonic (CO₂ = 10 to 20vol %) three-phase (aqueous-saline + CO₂ liquid + CO₂ vapor) fluid inclusions occur isolated or comprise small assemblages hosted by quartz crystals. The fluid inclusions are 15 to 6 μ m and have negative crystal shape. Locally they may be rounded or slightly elongate (Figure 6.19a). Aqueous-carbonic fluid inclusions display T_{H-CO_2} between 13.2°C and 29.7°C, T_{clath} between 2.2°C and 8.1°C, T_{eut} between -34.0°C and -24.2°C, T_{m-CO_2} between -58.8°C and -56.8°C (Figures 6.16b, 6.16c, 6.16e, 6.16f, 6.20 and Table 6.4). These fluid inclusions present highly variable salinities (from 3.8wt% to 13wt% NaCl_{eqv}; av. 8.31) and CO₂ densities (0.596 g/cm³ to 0.837g/cm³; av. 0.720g/cm³). The calculated pressures range from 1.9kbars to 3.0kbars (Figure 6.9a).

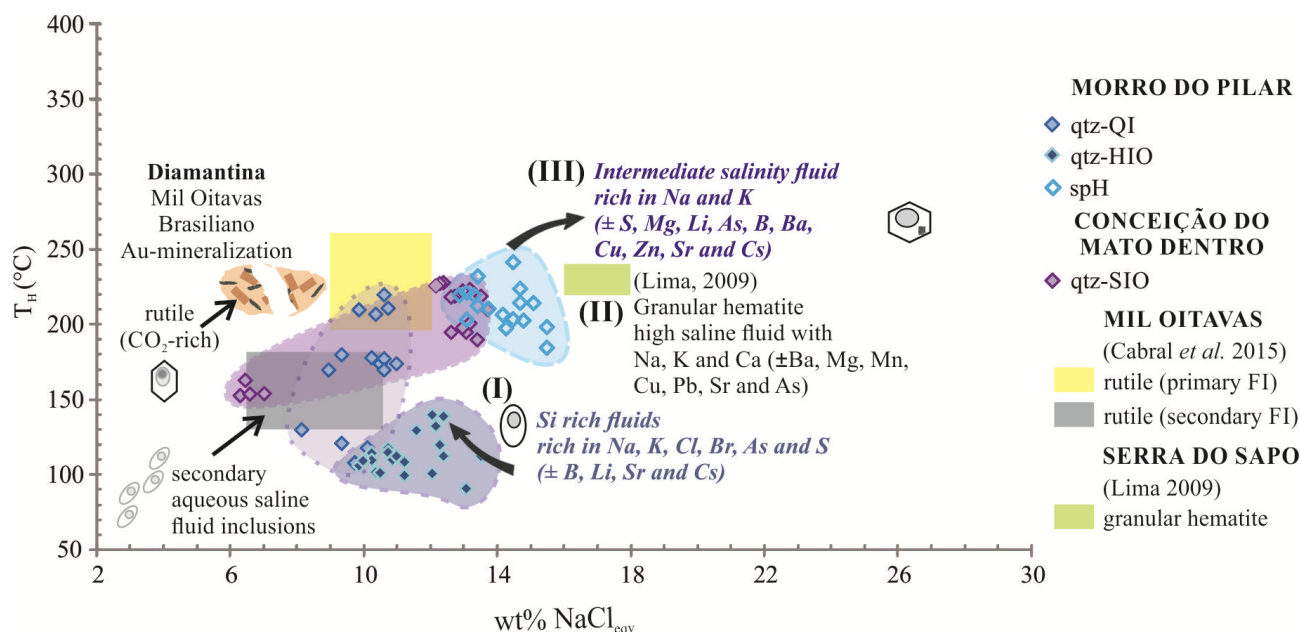


Figure 6.18. Diagram of homogenization temperature (T_H) versus salinity (wt% NaCl_{eqv}) illustrating the model for hydrothermal fluids associated with the Serra da Serpentina iron mineralization, Southern Espinhaço Range compared with fluid inclusion data obtained by Lima (2009) and Cabral *et al.* (2015b). (I) Silica-rich fluids represent the stages of silica leaching responsible for the concentration of the Fe-rich bands and formation of the ore bodies. These fluids have similar temperatures and salinity to the fluids studied by Cabral *et al.* (2015b) in secondary fluid inclusions trapped in rutile from Mil Oitavas Au deposit that have Brasiliano age. (II) Granular hematite from iron ore in Serra da Serpentina Group (Lima 2009) represents the first stage of Fe enrichment. (III) Specularite trapped fluids were responsible for the last stage of Fe enrichment with a significant increase of fluid salinity caused by loss of elements like Ca, Mg and Pb.

Figure 6.21a depicts the Raman spectrum of quartz hosting aqueous-carbonic fluid inclusions. The aqueous-saline phase of the fluid inclusions (Figure 6.21b) presents characteristic bands of SO_4^{2-} (981cm^{-1}), HCO_3^{2-} (1017cm^{-1}) and liquid water ($3050\text{-}3687\text{cm}^{-1}$). The Raman spectrum of the carbonic phases (Figures 6.21c and 6.21d) exhibits the two main vibration bands of CO_2 (1284 and 1385cm^{-1}). Vapor CO_2 phase (Figure 6.21d) presents a weak band that indicates the presence of N_2 molecules (2329cm^{-1}). Liquid CO_2 phase (Figure 6.21c) displays bands of SO_4^{2-} (981cm^{-1}), HCO_3^{2-} (1017cm^{-1}) and liquid water ($3050\text{-}3687\text{cm}^{-1}$) that are weaker than the ones observed in the aqueous-saline phase.

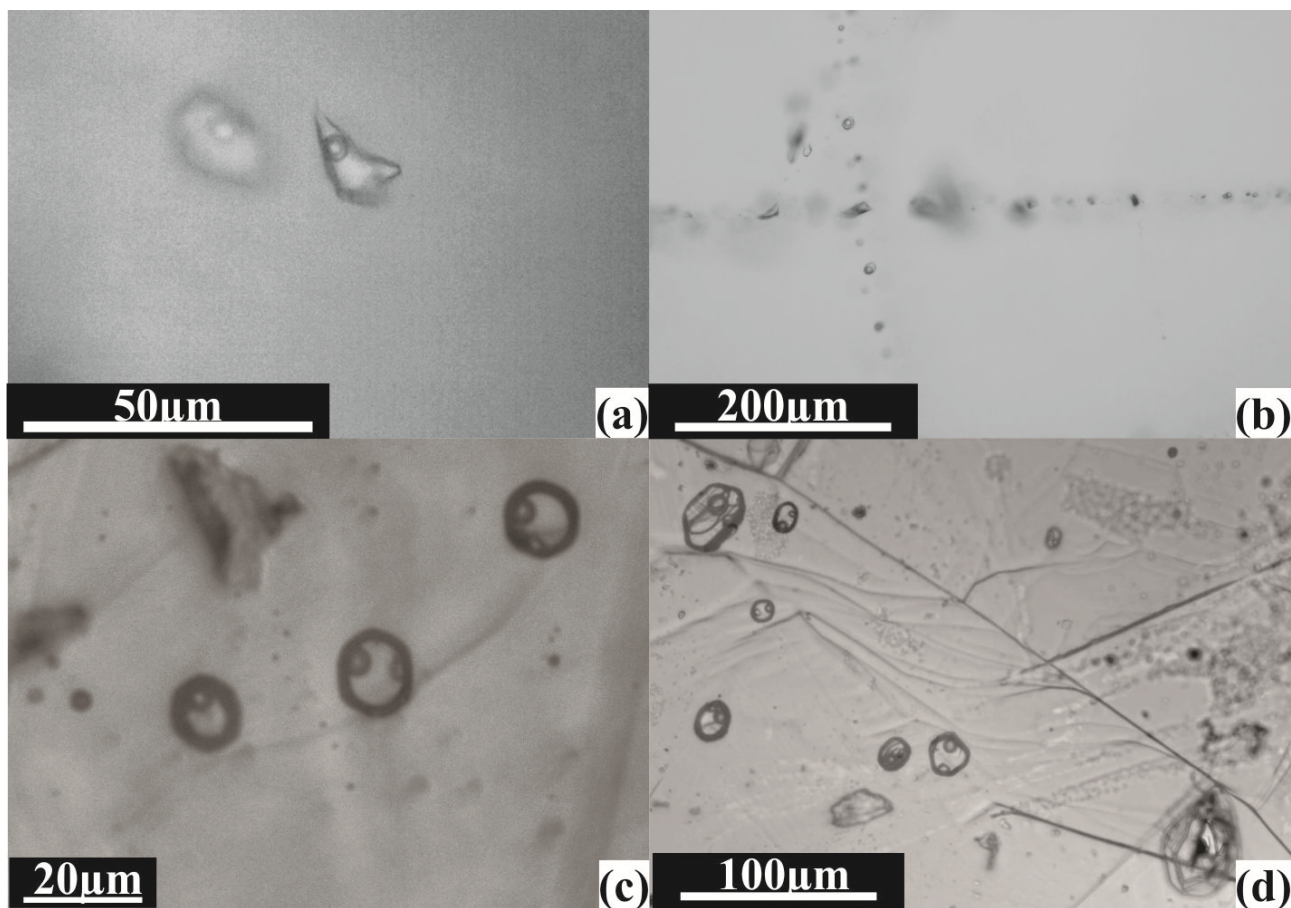


Figure 6.19. Fluid inclusion assemblages in quartz and specularite from the Catas Altas deposit, Quadrilátero Ferrífero. (a) Three-phase aqueous-carbonic fluid inclusions in quartz from a quartz vein in high-grade iron ore. (b) Secondary trails of two-phase, aqueous-saline fluid inclusions in quartz from a quartz vein in high-grade iron ore. (c) Three-phase aqueous-saline fluid inclusions in vugs-filling specularite crystal in the high-grade iron ore. (d) Three-phase aqueous-saline fluid inclusions in vein specularite high-grade iron ore hosted; (c) and (d) are NIR transmitted light microphotographs.

Fluid inclusions hosted by quartz crystals from Catas Altas contain Na (av. 2.7wt%) and Cl (2.9wt%). Potassium (av. 0.58wt%), S (av. 0.38wt%) and Br (av. 0.19wt%) are minor constituents. Arsenic (av. 873ppm), B (av. 794ppm), Cu (av. 487ppm), Mg (av. 335ppm), Li (av. 190ppm), Sr (av. 27ppm) and Cs (av. 10ppm) are also present but in lower concentrations (Figure 6.12a). Cl/Br molar ratio varies from 46 to 150, with an average value of 64 (Figure 6.13).

Quartz crystals also host trails of secondary fluid inclusion assemblages that are two-phase aqueous-saline (Figure 6.19b). These secondary inclusions have variable size and shape and were not considered here for data interpretation due to their unclear relationship with the mineralization process.

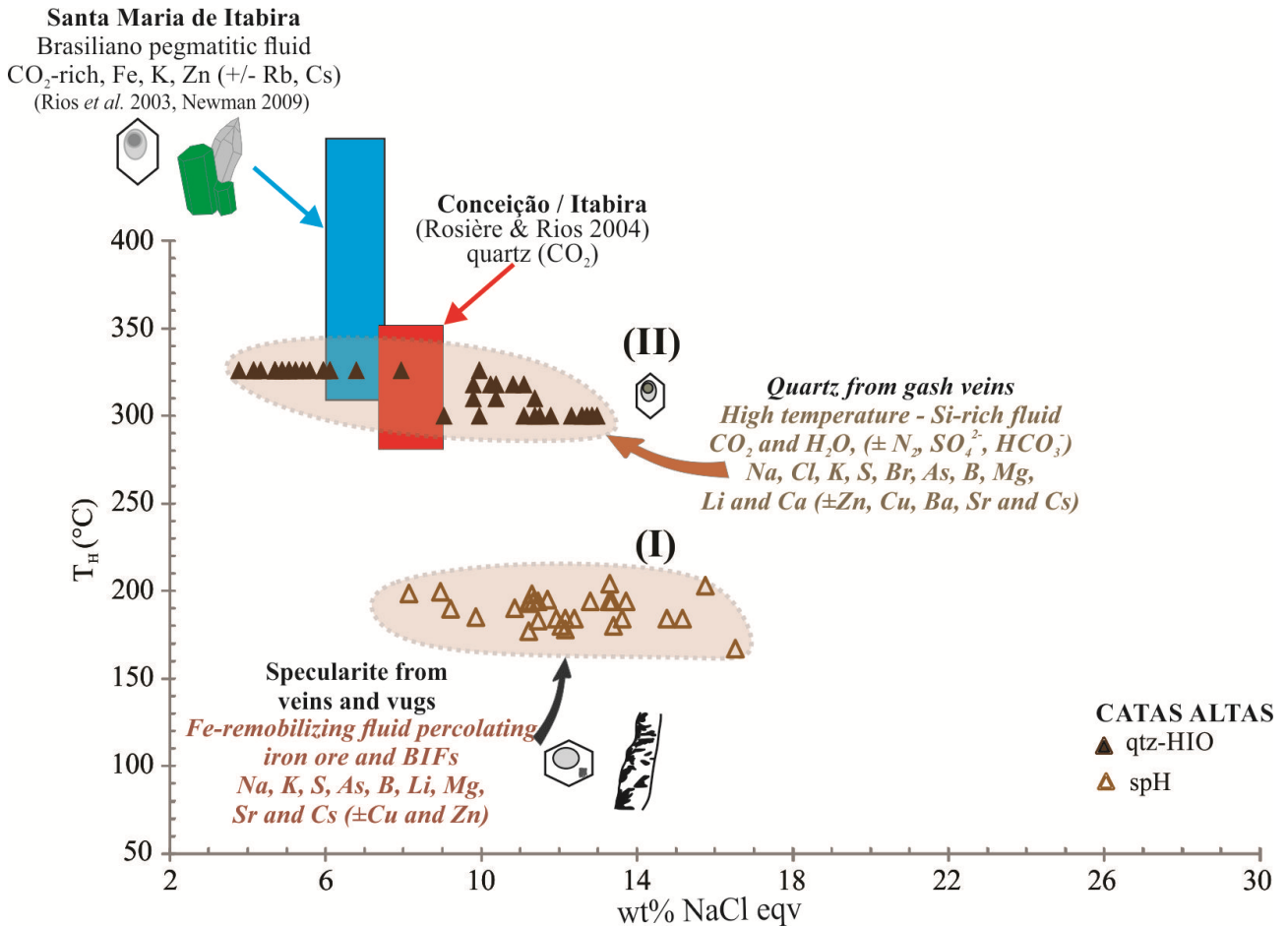


Figure 6.20. Diagram of homogenization temperature (T_H) versus salinity (wt% NaCl_{eqv}) showing a simplified model for hydrothermal fluids, that evolved to the fluids pathway at Catas Altas deposit, eastern high strain domain, Quadrilátero Ferrífero. (I) Fluid trapped in specularite crystals that represent a stage of Fe remobilization after the fluid percolates within the iron ore bodies from Quadrilátero Ferrífero. (II) Aqueous carbonic fluid trapped in quartz crystals in extensional veins that cut the high-grade iron ore discordant to the foliation. The results of aqueous carbonic fluids studied by Rosière & Rios (2004) in quartz veins from Itabira and by Rios *et al.* (2003) and Newman (2009) in the anatectic pegmatite bodies from Santa Maria de Itabira are used for comparison.

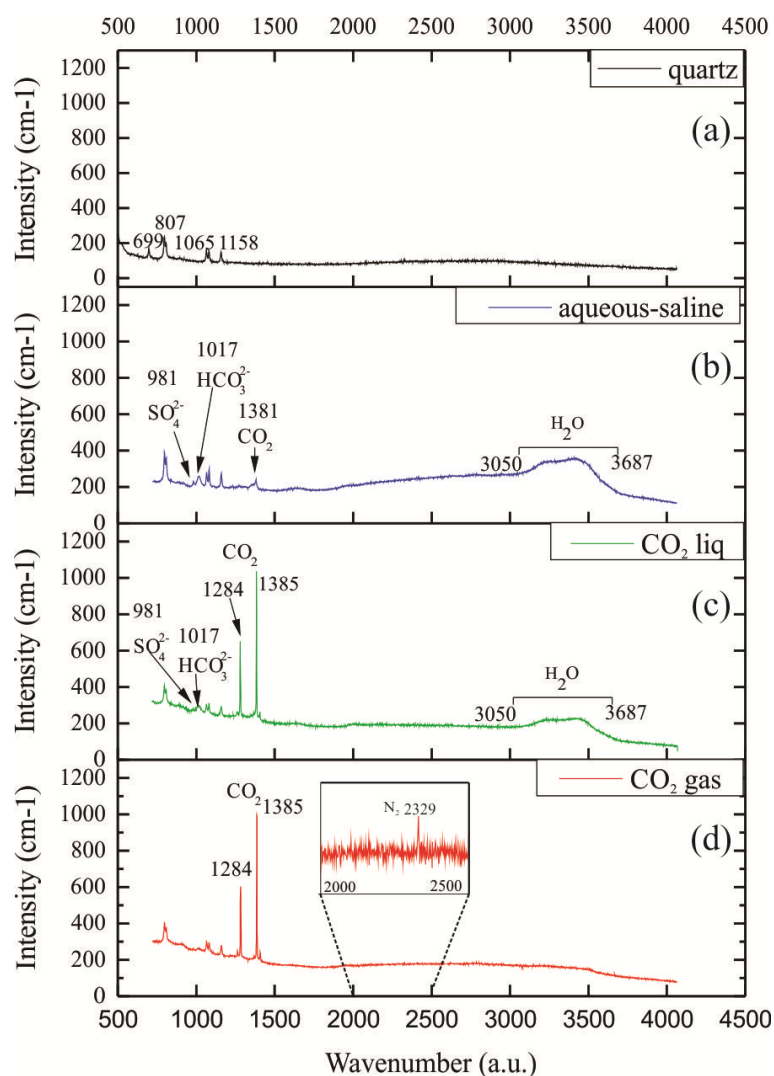


Figure 6.21. Raman spectra of (a) host quartz, (b) aqueous-saline, (c) liquid carbonic and (d) vapor carbonic phases of primary fluid inclusions in quartz crystals from a vein that cuts the hard high-grade iron ore from the Catas Altas deposit, eastern Quadrilátero Ferrífero.

Specularite (spH-CA):

Specularite crystals from the Catas Altas deposit show very good transparency under NIR light and host large fluid inclusions (average size of $30\mu\text{m}$). These crystals were collected from veins and contain primary fluid inclusion assemblages that are three-phase (solid + liquid + vapor) and display a negative crystal shape. The shape of some inclusions is controlled by mineral cleavage planes (Figures 6.19c and 6.19d). Even after heating above 300°C the solid phase did not dissolve, suggesting that it is not a daughter phase. Hydrohalite dissolution was observed using the sequential freezing technique described by Haynes (1985) and the temperature ($T_{\text{m-HH}}$) varied from -26.7°C to -21.7°C . Fluid inclusions present T_{eut} varying from -51.6°C to -31.9°C , $T_{\text{m-ice}}$ from

-12.6°C to -5.2°C, T_H from 167°C to 204°C and salinities from 8.1wt% to 16.5wt% NaCl_{eqv} (Figures 6.16e, 6.16f, 6.20 and Table 6.4). Calculated pressure varies from 1.22kbars to 2.64kbars (Figure 9a).

Fluid inclusions trapped in specularite grains from the Catas Altas deposit contain Na (av. 4wt%), K (av. 0.9 wt%), S (av. 0.55wt%), As (av. 901ppm) and B (av. 777ppm). Traces of Li (av. 749ppm), Mg (av. 347ppm), Sr (av. 125ppm), and Cs (av. 24ppm) are minor constituents (Figure 6.12b). The base metals Cu (17 to 7129ppm) and Zn (6 to 2457ppm) are present in variable amounts (Table 6.1).

6.6. DISCUSSION

6.6.1. Fluid Evolution During the Brasiliano Orogeny Along the Eastern Border of the Quadrilátero Ferrífero and the Southern Espinhaço Range

6.6.1.1. Fluids Associated with Au-PGE Jacutinga-type Mineralization

Two different fluids are involved in the Jacutinga-type mineralization in quartz veins at the eastern border of the Quadrilátero Ferrífero (Figure 6.15). The analyzed fluids from the Gongo Soco and Barão de Cocais deposits are aqueous-saline, of low to intermediate temperature (77°C to 305°C) and salinity (4.3wt% to 16.4wt% NaCl_{eqv} ; Figure 6.15). These fluids are rich in Na, Cl, K, Br, S and contain variable amounts of B, As, Li, Mg, Cu, Sb, Sr, Ba and Cs (Figure 6.10 and Table 6.1). Fluid inclusions trapped in the quartz veins from Gongo Soco and Barão de Cocais are similar to those described by Lüders *et al.* (2005) and Rosière & Rios (2004; Figure 6.15).

The Jacutinga-type veins at the Itabira deposit host co-existing aqueous-carbonic and aqueous-saline fluid inclusions with similar high-salinity (23.2wt% to 25.3wt% NaCl_{eqv} ; Figures 6.14d and 6.15) and T_H (276°C to 364°C). The aqueous carbonic type of fluid inclusions are dominant at Itabira and contain Na, K and S as the major elements with variable amounts of Li, Mg, B, As, Sr and Cs (Figure 6.10 and Table 6.1). This fluid contains considerable amounts of Cu, Zn, and Ba (Table 6.1). Fluid salinity in the vein from the Itabira deposit may have increased by phase separation and/or dissolution of evaporites (cf. Bodnar *et al.* 1985, Hanor 1987, Yardley & Graham 2002, Kesler 2005). Phase separation in a high metamorphic environment is usually associated with sudden depressurization during the uplift of tectonic blocks by thrust movements. Such a process

might explain the high salinity and the co-existence of two different types of fluid inclusions in the same assemblage.

The immiscibility between the phases that was observed in fluid inclusions from the Itabira area indicates that the precipitation of Au-PGE veins occurred probably due to the mixing of an aqueous-carbonic high-temperature/low-salinity fluid with a low-temperature aqueous-saline brine. According to this hypothesis the low-temperature aqueous-saline (metamorphic) fluid would have acquired higher salinity after percolating through evaporitic sequences, as already proposed by Lüders *et al.* (2005) and Cabral *et al.* (2012b) for this deposit, or by water loss during progressive syntectonic metamorphism (Yardley & Graham 2002).

The considerable amount of S as SO_4^{4-} , determined by Lüders *et al.* (2005) in Itabira, the absence of sulfide minerals and the presence of hematite and kaolinite in the Jacutinga veins indicate that the fluids were oxidizing and mildly acidic (Cabral 1996). The high contents of Cl in the low-temperature aqueous saline fluid associated with the previously predicted conditions indicates that Au was most probably transported as chlorine complexes such as AuCl_4^- (Krauskopf 1951, Helgelson & Garrels 1968, Mernagh *et al.* 1994). A strong oxidizing agent, such as Fe^{3+} (from iron formations), Mn-oxide (high-Mn contents in Jacutinga-type veins; Cabral *et al.* 2003) or Cu^{2+} (detected in considerable amounts in the fluid), is also required for the transportation of the metal (Krauskopf 1951). As a consequence, Au and PGE are likely to have been transported as Cl-complexes by low-temperature, acidic and high $f\text{O}_2$ fluids (Ghorfi *et al.* 2006, Hanley 2005, Wilde *et al.* 1989).

Two different mechanisms are proposed for metal precipitation in the Jacutinga-type deposits: i) Precipitation under reducing conditions or an increase in fluid pH (Barão de Cocais and Gongo Soco) caused by fluid interactions with the host dolomitic itabirite during magnetite oxidation, as already proposed by Cabral (1996) in Gongo Soco. ii) Mixing of a hot aqueous-carbonic fluid, derived from the anatectic pegmatite from Santa Maria de Itabira (Figure 6.15; Bilal *et al.* 1998, Rios *et al.* 2003, Newman 2009), with a low- to moderate-temperature aqueous saline fluid. In Itabira the drop of pressure and consequent phase immiscibility could have been caused by tectonic stacking of the thrust blocks (Chemale Jr. *et al.* 1987, 1994)

6.6.1.2. *Fluids Associated with Thrusts*

Foliation-concordant veins

In the Serra da Serpentina (Southern Espinhaço) Range deposits, an aqueous-saline hydrothermal fluid was responsible for silica leaching and minor Fe mobilization, generating lens-shaped Fe-enriched bodies in quartz itabirite and quartz-specularite veins. The presence of fluid trapped in quartz from the veins in the Morro do Pilar and Conceição do Mato Dentro deposits (Figure 6.18) suggest low to intermediate temperatures (91°C to 228°C) and intermediate salinities (6.3wt% to 13.7wt% NaCl_{eqv}). These fluids contain mainly Na, K, and Cl, with Br, As and S, and trace amounts of B, Li, Sr, Cs Ca, Mg, Sb, Ba, Cu and Zn (Figure 6.11 and Table 6.1).

The fluids trapped in quartz from the different Serpentina-type veins display slight chemical variations due to fluid/rock interactions with different country rocks. The low content of Mg and Ca in these fluids is also expressed through the absence of calcite and dolomite in the Serra do Sapo iron formation.

Fluids trapped in specularite crystals from the Morro do Pilar deposit display higher homogenization temperatures (185°C to 245°C) and salinity (12.9wt% to 15.5wt% NaCl_{eqv}) than fluids trapped in quartz from the same deposit (Figure 6.18). Specularite-trapped fluid contains mostly Na and K, with additional S, Mg, Li, As, B, Ba, Cu, Zn, Sr and Cs (Figure 6.11 and Table 6.1). Chlorine and bromine were not analyzed in these fluid inclusions.

Lima (2009) described the chemistry of fluids trapped in granular hematite and specularite grains from iron ore in the Serra do Sapo deposit (Figure 6.1). According to the author, granular hematite crystals host intermediate-temperature aqueous highly saline fluids (Figure 6.18). These inclusions are rich in Na, K and Ca with variable amounts of Ba, Mg, Mn, Cu, Pb, Sr and As (Lima 2009). The characteristics of the fluid that precipitated specularite crystals in these veins are similar to the fluids we described here for the Morro do Pilar platy hematite grains (specularite), representing a late stage of iron (re)mobilization as discussed below.

Homogenization temperatures and salinity from the fluid inclusions in rutile grains from the Brasiliano-aged Mil Oitavas Au-PGE quartz-kaolinite veins (Abreu 1991, Cabral *et al.* 2015b) are similar to those of quartz-hematite veins from the Serra do Sapo itabirites (Figure 6.18; Cabral *et al.* 2015b) suggesting a similar source (origin) of both fluids.

The estimated entrapment pressures of the analyzed fluid inclusions (Figure 6.9b) in quartz veins from the Morro do Pilar deposit presented higher values than all the other samples. In contrast, we observed lower fluid pressures in the specularite-hosted inclusions obtained from the same sample (Figure 6.9b). The variation in the confining pressure can be explained by variations in the local stress regime during the progressive deformation in a shear zone or by the quick change in the thickness of the tectonic pile caused by the juxtaposition of fault slices during the evolution of the Espinhaço fold and thrust belt.

Gash veins

Gash veins from the Catas Altas deposit display two very distinct data sets for fluid inclusions from hematite and quartz (Figure 6.20). Specularite hosts aqueous-saline fluids with low to intermediate salinity (8.1wt% to 16.5wt% NaCl_{eqv}) and intermediate temperatures (167°C to 204°C; Figure 6.20). This fluid contains variable amounts of Na, K, S, As, B, Li, Mg, Sr and Cs (\pm Cu and Zn; Figure 6.12 and Table 6.1). In contrast, milky quartz grains contain aqueous-carbonic fluid inclusions of low to intermediate salinity (3.8wt% to 13wt% NaCl_{eqv}) and high temperature (300°C to 326°C; Figure 6.20). They comprise mainly CO₂, H₂O (\pm N₂, SO₄²⁻, HCO₃⁻; Figure 6.21), Na, Cl, K, S, Br, As, B, Mg, Li and Ca (\pm Zn, Cu, Ba, Sr and Cs; Figure 6.12 and Table 6.1).

The chemical composition of the aqueous carbonic fluid in the quartz crystals is very different from the Transamazonian low-temperature and low- to intermediate-salinity fluid, that has been observed by Rosière & Rios (2004) in the first stage of hematite mineralization in Quadrilátero Ferrífero. These aqueous carbonic fluids are, nevertheless, very similar in composition, temperature, and salinity to the late, post-mineralization fluids analyzed by these authors in quartz veins from the Conceição deposit in Itabira (Figures 6.15 and 6.20). Fluid temperature and salinity results also resemble the values analyzed in the aqueous carbonic fluid by Newman (2009) and Rios *et al.* (2003) from Brasiliano-aged anatectic pegmatites from Santa Maria de Itabira (Figure 6.20).

The trapping pressure and the chemical composition of the fluid inclusions in specularite and quartz (Figure 6.9a) from the Catas Altas deposit indicate that the minerals crystallized from different fluids under distinct pressure conditions and are related to different tectonic phases. The physico-chemical characteristics of the fluids from the Catas Altas quartz-veins are very distinct from the Minas-type fluid inclusions (Rosière & Rios, 2004). This fact, together with the close association of Catas Altas ore with Jacutinga-type deposits and prospects, suggests that the aqueous

carbonic fluid is related to the Au-PGE mineralization in areas along the eastern border of Quadrilátero Ferrífero. Such fluids may have been sourced from anatectic pegmatites, as described by Bilal *et al.* (1998), Newman (2009) and Rios *et al.* (2003; Figure 6.20).

6.6.2. Cl/Br Ratios and the Interpreted Source of Fluids

Chlorine and bromine ratios permit the differentiation of saline fluids and provide information about their origin (Kesler *et al.* 1995, Banks *et al.* 2000, 2002), especially those related to hydrothermal events. This differentiation is only possible in the absence of halite when Cl and Br are conserved in solution, i.e. their concentrations are not affected by fluid/rock interactions (Banks *et al.* 2002).

Most Cl/Br molar ratios determined for quartz-hosted fluid inclusions (Figure 6.13) from Jacutinga-type and Serpentina-type thrust-related veins are lower than those reported values for seawater and the calculated seawater evaporation path (McCaffrey *et al.* 1987). At the Catas Altas deposit, Cl/Br molar ratios from aqueous-carbonic fluids range from 46 to 150, whereas in the aqueous saline Serpentina-type fluid (Morro do Pilar and Conceição do Mato Dentro) the molar ratio ranges between 25 to 420, and in the aqueous saline fluid from Gongo Soco and Barão de Cocais Jacutinga-type veins it varies between 13 to 436.

Despite the low Cl/Br molar ratios in all analyzed fluid inclusions in quartz, the total concentration of these elements (Table 6.1) is much higher than the typical values from seawater (Cl ~20300ppm and Br ~69.7ppm) and continental crust (Cl ~130ppm and Br ~2.5ppm; Marsala *et al.* 2013). Nevertheless, the hypothesis of halite dissolution must be rejected to explain the high Cl content in these fluids because this would generate a Br-deficient fluid (Fontes & Matray 1993).

The Cl/Br molar ratios are compared with data from Lüders *et al.* (2005) obtained from fluid inclusions from the Gongo Soco and Itabira deposits (Figure 6.13). Both datasets display a similar trend except for four data values of Lüders *et al.* (2005) which plot above the seawater field (Figure 6.13). However, the Au-PGE mineralizing fluids appear to have a Cl/Br signature much lower than previously considered (Lüders *et al.* 2005), which defines more precisely the source of the fluids as discussed below.

The possibility of considering halite crystallization from the fluid as the reason for these values must be rejected because, despite its potential contribution to increasing the Br content by

removing Cl from the fluid, this process would result in a bittern brine with much lower Cl content (Table 6.1). Our values are not compatible with the possibility of a magmatic source for the reason that Br in igneous fluids is present in higher concentrations (Behne 1953, Correns 1956) but Cl/Br ratios are higher than seawater (Stober & Bucher 1999). Our Cl contents are similar to that described by Yardley (2013; Figure 6.13) for basinal fluids, although with slightly higher Br concentrations (Cl/Br molar ~238).

In the aqueous carbonic fluid inclusions from Catas Altas quartz, Cl and Br have been fractionated as incompatible elements, suggesting a pegmatitic source related to intrusive bodies from Santa Maria de Itabira area (located 15km in a straight line from sample location). These pegmatite bodies are described by Bilal *et al.* (1998) as a product of an anatectic process, related to regional high-grade metamorphism. Chlorine and bromine would remain in the fluid, increasing the contents of both elements, but with a low Cl/Br molar ratio (<200). The studied fluids occupy in general a distinct field from the values of magmatic fluids compiled by Yardley (2013; Figure 6.13a), and also from the Na/Br values obtained for pegmatite from the Metamorphic Complex in Borujerd, Iran (Masoudi & Yardley 2005). According to these authors, the fluid inclusions from the Iranian pegmatite are predominantly aqueous low-saline although a CO₂-rich phase may be locally present. A metamorphic source for CO₂-rich inclusions has been proposed by Nabelek & Wilke (2002) and is supported by Masoudi & Yardley (2005) for the Borujerd Metamorphic Complex.

The aqueous saline fluids from the quartz crystals collected from Jacutinga and Serpentina-type veins are compatible with Yardley's (2013) low-grade metamorphic field (Figure 6.13a); the data display very similar Cl/Br molar ratios and absolute concentrations for Cl and Br.

Thorne *et al.* (2014) have studied the Cl/Br *versus* Na/Br relations for fluids associated with high-grade hematite ores from the Paraburdoo deposit, Hamersley Basin, Western Australia (Figure 6.13a). One of the fluid inclusion populations, associated with hydrothermal alteration displays Na/Br ratios from 90 to 430, similar to our values, but located above the halite dissolution line (Figure 6.13a). The second population of fluid inclusions is restricted to the high-grade hematite ore, according to the authors not related to the hydrothermal alteration. This population displays a wide range of Cl/Br ratios from 800 to 8000, diverging completely from the data obtained in this study.

The high salinity, as well as the high Cl/Br values of the specularite-hosted fluid inclusions from the Itabira Jacutinga vein, can be considered as a product of evaporite leaching although its source remains uncertain (Lüders *et al.* 2005).

6.6.3. Chemical Variation and Evolution of the Fluids

The chemical signature of the analyzed samples indicates that the fluid entrapped in the Jacutinga-type vein from Itabira is very different from all other Au-PGE veins. It is highly saline, much richer in Ba, Zn, Cu, K, Mg, Na, Li and contains carbonic phases. The fluid from the Itabira deposit typically displays a Na>K>Ca>>Mg pattern contrasting with the Na>Ca>K>>Mg relationship in the other Jacutinga-type deposits from the Gongo Soco and Barão de Cocais deposits.

Fluid inclusions in quartz from Serpentina-type deposits (Morro do Pilar and Conceição do Mato Dentro) on the other hand, are remarkably rich in As and, to a lesser extent, Sr compared with the other studied fluids. It is important to note that the fluids from Conceição do Mato Dentro display a distinct compositional pattern (Na>Ca>>K) compared with other fluids described in this study.

The ternary diagram from Figure 6.22 depicts the relative variations between the K, Ba, and Sr in all the studied fluids. The fluids from Serpentina-type deposits plot in a field (Field A; Figure 6.22) where K content is relatively low while Ba and Sr vary widely. This diagram also shows the chemical distinction between the Jacutinga- and the Serpentina-type fluids (Fields A, B and C; Figure 6.22). The Jacutinga fluid from the Itabira deposit is not only highly saline but also relatively enriched in Ba (Field B) while in the Gongo Soco/Barão de Cocais deposits, a higher proportion of K is available in solution (Field C), revealing two different fields for Jacutinga-type fluids. Catas Altas fluids on the other hand exhibit a highly-scattered pattern (Field D; Figure 6.22).

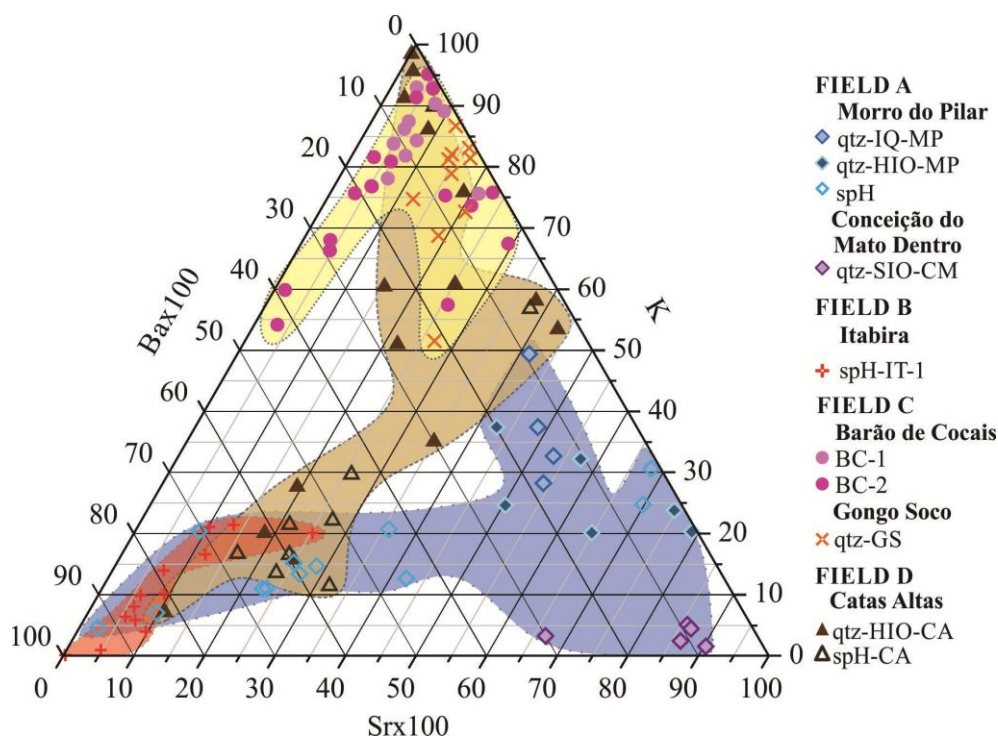


Figure 6.22. Ternary diagram showing the characteristic trends of K/Sr/Ba for the studied fluids. *Abbreviations:* qtz = quartz; spH = specularite; HIO = hard high-grade iron ore; QI = quartz itabirite; SIO = schistose high-grade iron ore; BC = Barão de Cocais; GS = Gongo Soco; IT = Itabira; MP = Morro do Pilar deposit; CM = Conceição do Mato Dentro deposit; CA = Catas Altas deposit.

Finally, the diagram of pressure *versus* temperature depicted in Figure 6.23 summarizes the evolution of the ore-forming fluids responsible for the Fe enrichment of the Serra do Sapo itabirite (Serpentina-type iron orebodies) and the Jacutinga-type Au-PGE mineralization in the Cauê itabirite at the eastern border of the São Francisco Craton during the Brasiliano orogeny. At least three main fluids participated in the alteration and mineralization of the host rocks:

1. A hydrothermal/metamorphic anatectic fluid is responsible for the formation of the Jacutinga-type mineralization in the Itabira region. This fluid follows the trend $K > Li > Ba > Sr$ and consists of a highly saline aqueous phase and a low CO_2 density aqueous-carbonic phase. The aqueous carbonic fluid inclusions from the Catas Altas and Mil Oitavas veins are probably cogenetic and associated with the Conceição/Itabira veins (Rosière and Rios 2004, Lüders *et al.* 2005).
2. Aqueous-saline (intermediate salinity and no CO_2) low- to moderated-temperature metamorphic fluids are hosted by quartz crystals from the Jacutinga-type veins collected

from the Barão de Cocais and Gongo Soco deposits. The fluid is relatively enriched in B; depleted in Li, Ba, Na, Cu, Zn and K; and follows the trend $K > Li > Ba \sim Sr$.

- The Serpentina-type hydrothermal fluid is depleted in Li, Na, Ba, Ca, K, Cu and Mg and enriched in As and Sr in comparison with the Itabira Jacutinga-vein type.

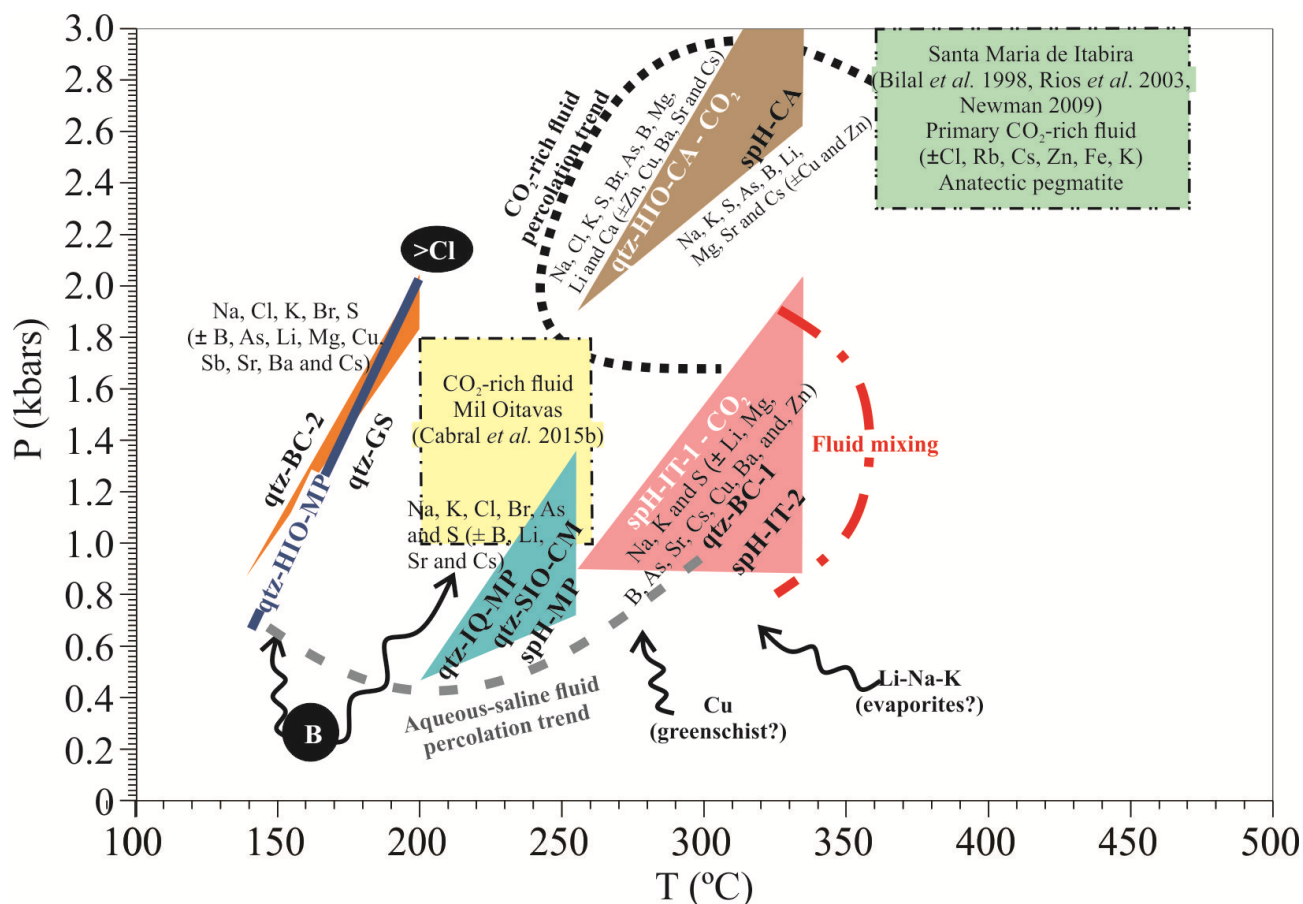


Figure 6.23. The proposed fluid model related to Fe enrichment of itabirites from Serra da Serpentina Group and Au-PGE deposition in the Jacutinga-type deposits from the Minas Supergroup during the Brasiliano orogeny. The diagram illustrates that several inputs of three distinct fluids (aqueous-carbonic and aqueous-saline) responsible for the mineralization processes along the eastern border of São Francisco Craton. The anatectic pegmatite bodies from Santa Maria de Itabira (Bilal *et al.* 1998, Rios *et al.* 2003, Newman 2009) are the source of the high-temperature aqueous carbonic fluids found at Catas Altas (this work), Itabira (Rosière & Rios 2004, Lüders *et al.* 2005 and this work) and Mil Oitavas (Cabral *et al.* 2015b) deposits. Different inputs of a metamorphic, low- to moderate-temperature fluids caused silica leaching and iron concentration at the deposits from Serra da Serpentina Group and Au-PGE mobilization and transport in the Jacutinga-type deposits from central Quadrilátero Ferrífero (Gongo Soco and Barão de Cocais). A mixing of fluids resulted in Au-PGE precipitation in the Itabira deposit. *Abbreviations:* qtz = quartz; sph = specularite; HIO = hard high-grade iron ore; QI = quartz itabirite; SIO = schistose high-grade iron ore; BC = Barão de Cocais; GS = Gongo Soco; IT = Itabira; MP = Morro do Pilar deposit; CM = Conceição do Mato Dentro deposit; CA = Catas Altas deposit.

6.7. CONCLUSIONS

During the Brasiliano orogeny several inputs of hydrothermal/low-grade metamorphic fluids with contribution from anatectic fluid from pegmatites, were responsible for widespread hydrothermal alteration along the Southern Espinhaço Range down to the eastern border of the Quadrilátero Ferrífero.

The fluid percolation was probably triggered by intensive pumping from the Araçuaí orogenic belt during the evolution of the thrust belt that controls the structure of the eastern border of the São Francisco Craton, leading to the development of: i) relatively thin lens-shaped high-grade Serpentina-type Fe-orebodies mostly by simple dissolution/leaching of quartz from the Serra do Sapo itabirite and; ii) the Fe-Au-PGE rich Jacutinga-type ore with complex mineralogy due to the alteration of the Cauê itabirite.

The differences in pressures of trapping are probably related to variations in tectonic pressure during the evolution of the Espinhaço thrust and fold belt due to uplift and juxtaposition of tectonic blocks. This interpretation opens new perspectives to the explanation of the tectonic position of the loci of the Jacutinga deposits, probably controlled by extensional sites on frontal ramps of thrust horses.

Acknowledgments

The financial support and infrastructure for this PhD study have been provided by Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Comissão Nacional de Energia Nuclear/Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CNEN/CDTN), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG - CRA PPM 00179/13), Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETH-Zurich), FCS-Switzerland, Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP - REDETEC 2715/09), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - MCT/CT-Mineral/VALE/CNPq 12/2009, 550348/2010-7, 307546/2011-0, 308781/2014-7). We would like to express our gratitude to the staff of Setor de Tecnologia Mineral (SETEM) from CDTN, Laboratory of Raman Spectroscopy (UFMG), ETH-Zürich and Department of Earth Sciences from Geneva University for all technical assistance and suggestions. A special thanks to S.P. Prates, A.S. Hensler, P.C. Rodrigues, S. Dantas, A.R. Cabral; V. Lüders, L.M. Lobato and V.K. Rolim. We also thank the helpful and constructive comments made by Dr. Paul Duuring and the anonymous reviewers.

CAPÍTULO 7. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

7.1. ESPECULARITA E A EVOLUÇÃO DOS FLUIDOS NOS DEPÓSITOS DE FERRO PALEOPROTEROZÓICOS: O DEPÓSITO DE ESPERANÇA

A interpretação dos resultados obtidos permitiu uma melhor compreensão das variações químicas que ocorreram durante o enriquecimento em ferro no depósito de Esperança levando a elaboração de um modelo conceitual (Figura 5.15). As assinaturas químicas observadas indicam que processos policíclicos são responsáveis pelo enriquecimento em ferro nesta região.

A hematita granular/martita com relictos de kenomagnetita foi definida como o principal mineral encontrado em ambos, no itabirito dolomítico (protominério; Figura 5.2) e no minério de ferro de alto teor (Figuras 5.3 e 5.4). Esta fase mineral apresenta teores de elementos traço mais elevados do que as demais gerações de óxido de ferro (Figura 5.6) e foi formada nos primeiros estágios de mineralização. Os padrões de ETR-Y (Figura 5.12) juntamente com as razões Y/Ho (Figura 5.14) são similares àqueles encontrados em FFB não mineralizadas, o que reflete uma afinidade química desta fase mineral com sua rocha encaixante (itabirito dolomítico). A assinatura microquímica dos grãos de hematita granular/martita encontrados no minério de alto teor comprova que estes grãos foram herdados do itabirito dolomítico.

A remobilização de ferro caracterizada pela precipitação de cristais hipogênicos de specularita em veios e *vugs* desempenhou um papel importante durante os processos de mineralização. As diferentes gerações de specularita são muito pobres em elementos traço, inclusive ETR-Y (Figuras 5.6, 5.7 e 5.12) e apresentam razões Y/Ho altamente variáveis (Figura 5.14). Foram observadas anomalias positivas de Ce (Figura 5.13) e a presença de Mn (Figuras 5.9 e 5.10) em sua estrutura indicando condições altamente oxidantes.

Os veios encontrados no depósito de Esperança foram formados durante a orogenia Transamazônica e, conforme descrito por Oliveira *et al.* (2012, 2015), estão estreitamente relacionados aos processos de (re)mobilização sin-tectônica de ferro ocorrida nesta região.

Os estudos de inclusões fluidas desenvolvidos indicam a ocorrência de pelo menos três estágios de fluxo de fluidos distintos que foram responsáveis pela (re)mobilização de Fe no depósito de Esperança (Figura 5.21).

O primeiro estágio está relacionado aos fluidos estudados por Oliveira *et al.* (2012) nos carbonatos dos veios que cortam o itabirito dolomítico (Figura 5.21; I). Segundo estes autores, este fluido seria rico em CO₂-Ca-Mg e estaria associado com a lixiviação de carbonato do itabirito dolomítico e consequente precipitação dos carbonatos hidrotermais nos veios.

O segundo estágio é associado ao processo de (re)mobilização de ferro que levou a precipitação dos cristais hidrotermais de especularita nos veios e *vugs* desenvolvidos durante a deformação (Figura 5.21; II). Este fluido tem salinidades (8 a 13%p/p NaCl_{eqv}) e temperaturas (189 a 232°C) intermediárias e, conteúdos significativos de Na, K, As, B, Li e Ba.

O terceiro estágio é representado por um fluido rico em sílica, que foi precipitada selando os veios e espaços abertos gerados durante a deformação (Figura 5.21; III). Este fluido de relativamente baixa temperatura e salinidades intermediárias apresenta variações locais quando comparados os dois tipos de veios em que se encontra:

1. Veio de quartzo-especularita em minério de alto teor: salinidade baixa (12 a 15%p/p NaCl_{eqv}; Figura 5.21; III), conteúdo elevado de Ca (Figura 5.20) e razão molar Cl/Br mais alta (Figura 5.19).
2. Veio de quartzo-carbonato-especularita cortando o itabirito dolomítico: salinidade mais alta (15 a 20%p/p NaCl_{eqv}; Figura 5.21; III), concentrações elevadas de elementos como K, Na, As, B, Br, Mg e Sr (Figura 5.18) e, menor razão molar Cl/Br (Figura 5.19).

Esta salinidade relativamente mais alta do fluido rico em Si encontrado em quartzo do itabirito dolomítico pode ser reflexo de uma interação do fluido com as rochas granito-gnáissicas presentes nas proximidades do depósito. O fluido menos salino, aprisionado nos veios de quartzo (sem carbonatos) que cortam o minério, seria uma evolução deste primeiro fluido que teria perdido parte dos cátions em seu caminho ou ainda passado por uma diluição devido à mistura com um terceiro fluido menos salino.

7.2. ESPECULARITA E A EVOLUÇÃO DOS FLUIDOS NOS DEPÓSITOS DE FERRO E AU-PGE DURANTE O BRASILIANO

A evolução de pelo menos um fluido metamórfico regional aquo-salino parece estar relacionada aos processos de lixiviação de sílica e mineralização em Fe ocorridos nas rochas do Grupo Serra da Serpentina durante o Brasiliano (Figura 6.18). Este fluido foi responsável pela formação dos corpos de minério de alto teor a partir da lixiviação de sílica do quartzo itabirito e precipitação de quartzo e especularita em veios.

O primeiro estágio da concentração de ferro é associado à lixiviação de sílica por um fluido de salinidade relativamente baixa e temperatura variável responsável pela cristalização de quartzo nos veios sin-tectônicos (Figura 6.18; I). Este fluido apresenta pequenas variações de composição que parecem ser locais e que possuem duas explicações possíveis: diferentes fontes para estes fluidos ou interações locais fluido/rocha.

Lima (2009) descreve um fluido aquo-salino primário encontrado em grãos de hematita granular no minério de alto teor da Serra do Sapo (Figura 6.18; II). Este fluido está relacionado a um segundo estágio de enriquecimento em ferro e é rico em K e Ca, com teores variáveis de Ba, Mg, Mn, Cu, Pb, Sr e As.

Um último estágio de fluxo de fluido na SEM está associado à precipitação de cristais de especularita a partir de um fluido de salinidade mais baixa (12.9%p/p a 15.5%p/p NaCl_{eqv}) e mesma faixa de temperatura (185°C a 242°C) daqueles descritos por Lima (2009) na hematita da Serra do Sapo (Figura 6.18; III). Este fluido é composto por Na, K, Mg, S, Li, B, As, Sr, Cs e Ba ($\pm\text{Cu}$ and Zn).

Variações na pressão de aprisionamento das inclusões fluidas também são observadas na SEM (Figura 6.9) e são explicadas pela diferença de pressão tectônica gerada durante a fase compressiva nos diferentes momentos de fluxo dos fluidos metamórficos.

Na região de Catas Altas dois tipos distintos de fluidos foram estudados (Figura 6.20). Um é aquo-salino de salinidade variável (8%p/p a 16%p/p NaCl_{eqv}), temperatura intermediária (167°C a 204°C) e encontra-se aprisionado nos cristais de especularita (Figura 6.20; I). O outro é aquo-carbônico de salinidade baixa a intermediária (4%p/p a 13 %p/p NaCl_{eqv}) e elevada temperatura (300°C a 326°C) que é encontrado nos cristais de quartzo dos veios extensionais (Figura 6.20; II).

O fluido aquo-salino encontrado nos cristais de especularita que preenchem *vugs* é bastante similar àqueles estudados na mesma fase mineral do depósito de Esperança e podem tanto estar relacionados a uma (re)mobilização de Fe tardi-Transamazônica quanto cedo-Brasileira. No entanto esta associação não pode ser confirmada com os dados disponíveis.

A composição química do fluido aquo-carbônico encontrado nos veios de quartzo extensionais, no entanto, é bem diferente daquela descrita por Rosière & Rios (2004) para os fluidos Transamazônicos responsáveis pela mineralização em Fe no QF. Considera-se, portanto que este fluido aquo-carbônico não teve parte nos processos mineralizadores em Fe ocorridos na região, mas sim está estreitamente relacionado ao transporte e precipitação de Au-PGE nas zonas de cisalhamento Brasileiras (Jacutingas). Este fluido aparenta ser uma evolução do fluido de alto grau metamórfico (magmático) encontrado nos pegmatitos anatóxicos Brasileiros de Santa Maria de Itabira.

Os fluidos encontrados nos depósitos do tipo Jacutinga podem ser separados em pelo menos dois tipos distintos: (i) aquo-salinos de baixa temperatura, (ii) aquo-carbônicos de alta temperatura. Segundo Mullis *et al.* (1994) e Rauchenstein-Martinek *et al.* (2014), estes dois tipos de fluidos são capazes de transportar Au e estas diferenças composicionais estão associadas ao grau de metamorfismo e deformação a que os fluidos foram submetidos.

Em Gongo Soco e Barão de Cocais o fluido responsável pelo transporte e precipitação de Au-PGE é aquo-salino de temperaturas e salinidades baixas a intermediárias e, composto principalmente por: Na, Li, B, K, Ca, As, Cl and Br. Elevados conteúdos de Cl indicam que o Au foi transportado como Cl-complexos sendo que a presença de pelo menos um agente oxidante forte como, por exemplo, Fe^{3+} (proveniente das FFB) ou óxidos de Mn (abundantes nas Jacutingas), se faz necessária. Neste caso três alternativas podem ser utilizadas para explicar a precipitação dos metais: (i) aumento do pH; (ii) diminuição das condições de oxidação devido à mistura com um fluido redutor ou interações fluido/rocha; ou e, mais provável, (iii) variação repentina da pressão gerada durante a formação da zona de cisalhamento.

O fluido encontrado em Itabira é heterogêneo, de elevadas temperatura e salinidade. A coexistência de um fluido aquo-salino com outro aquo-carbônico nesta região é interpretada como uma mistura de dois fluidos: (i) aquo-carbônico (pegmatítico de alto grau metamórfico) similar ao fluido encontrado nos veios extensionais de Catas Altas; (ii) aquo-salino de salinidade elevada causada por lixiviação de evaporitos ou por perda de água durante metamorfismo e deformação.

Esta mistura de fluidos teria gerado condições propícias para a precipitação do Au-paladiado na região de Itabira.

Os conteúdos de Cl e Br encontrados nas inclusões fluidas aprisionadas nos cristais de quartzo dos diferentes depósitos indicam que a fonte mais provável dos fluidos aquo-salinos é de origem metamórfica e, do fluido aquo-carbônico (Catas Altas) é de origem pegmatítica (anatótica). Estes elementos não foram quantificados nos cristais de especularita, mas as análises de *crush-leach* realizadas por Lüders *et al.* (2005) em amostras de Itabira indicam que o fluido desta região pode ter uma assinatura evaporítica conforme proposto por Cabral *et al.* (2012b).

7.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS FLUIDOS: TRANSAMAZÔNICOS VERSUS BRASILIANOS

Os resultados obtidos neste trabalho permitem apontar as principais diferenças observadas entre os fluidos originados nas diferentes épocas geológicas:

- Os fluidos aprisionados durante o Transamazônico em quartzo possuem salinidades mais elevadas do que os fluidos aprisionados neste mineral durante o Brasileiro.
- Os fluidos encontrados nos cristais de especularita têm salinidades menores no depósito de Esperança quando comparados com os depósitos do leste (Catas Altas, Itabira e Morro do Pilar).
- Os fluidos aquo-salinos gerados durante o período Brasileiro são, em geral, de menor temperatura do que os fluidos aquo-salinos Transamazônicos.
- Comparando os fluidos encontrados nos cristais de especularita dos diferentes depósitos estudados observa-se que, no depósito de Esperança, ao contrário dos demais depósitos, este fluido é mais rico em As e Sb, possui baixos teores de Mg e não apresenta teores detectáveis de S, Cu nem de Zn.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu F.R.A. 1991. *Estudo das mineralizações auríferas filonianas da região da cidade de Diamantina/MG*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 85 p.

Alkmim F.F. & Marshak S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**:29-58.

Alkmim F.F., Marshak S., Pedrosa-Soares A.C., Peres G.G, Cruz S.C.P, Whittington A. 2006. Kinematic evolution of the Araçuaí-West Congo orogen in Brazil and Africa: Nutcracker tectonics during the Neoproterozoic assembly of Gondwana. *Precambrian Research*, **149**:43–64.

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**:1767-1775.

Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **7**(4):349-364.

Almeida-Abreu P.A. 1995. O Supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço Meridional (Minas Gerais): O Rifte, a Bacia e o Orógeno. *Geonomos*, **3**(1):1-18.

Almeida-Abreu P.A. & Renger F.E. 2002. Serra do Espinhaço Meridional: Um Orógeno de colisão do Mesoproterozóico. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(1):1-14.

Almeida-Abreu, P.A. & Renger, F.E. 2007. Stratigraphy and facies of the southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, **158**:9-29.

Almeida-Abreu P.A., Quintão, N.H., Rolim, V.K., Abreu, F.R., Magalhães, P.M. 1988. Tectônica de *nappes* na região de Ouro Fino, Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, **18**:141-148.

Almeida-Abreu P.A., Knauer L.G., Hartmann M.B., Santos G.G.V. dos, Guimarães M.L.V., Abreu F.R., Schrank A., Pflug R. 1989. Estratigrafia, faciologia e tectônica do Supergrupo Espinhaço na região de Serro -Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais, Brasil. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, **5**(6): 857-873.

Anbar A.D. & Knoll A.H. 2002. Proterozoic ocean chemistry and evolution: A bioinorganic bridge? *Science*, **297**:1137-1142.

Arnold G.L., Anbar A.D, Barling J., Lyons T.W. 2004. Molybdenum isotope evidence for widespread anoxia in mid-Proterozoic oceans. *Science*, **304**:87-90.

Ávila C.A., Teixeira W., Cordani U.G., Moura C.A.V., Pereira R.M. 2010. Rhyacian (2.23 – 2.20 Ga) juvenile accretion in the southern São Francisco Craton, Brazil: geochemical and isotopic evidence from the Serrinha magmatic suite, Mineiro belt. *Journal of South American Earth Sciences*, **29**:464-482.

Babinski M., Chemale Jr. F., Van Schmus W.R. 1991. Geocronologia Pb/Pb em rochas carbonáticas do Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: SBGq, III Congresso Brasileiro de Geoquímica, *Anais*, p. 628.

Babinski M., Chemale Jr. F., Van Schmus W.R. 1995. The Pb/Pb age of Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil, and its implications to the correlation with BIFs from South Africa and Australia. *Precambrian Research*, **72**:235-245.

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**: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**:471-499.

Banks D.A., Green R., Cliff R.A., Yardley B.W.D., 2000. Chlorine isotopes in fluid inclusions: Determination of the origins of salinity in magmatic fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **64**(10):1785-1789.

Banks D.A., Boyce A.J., Samson I.M., 2002. Constraints on the Origins of Fluids Forming Irish Zn-Pb-Ba Deposits: Evidence from the Composition of Fluid Inclusions. *Economic Geology*, **97**:471-480.

Barley M.E., Pickard A.L., Hagemann S.G., Folkert S.L. 1999. Hydrothermal origin for the 2 billion year old Mount Tom Price giant iron ore deposit, Hamersley Province, Western Australia. *Mineralium Deposita*, **34**:784-789.

Bastos Neto A.C. 1982. *Geologia das quadrículas Dom Joaquim e parte sul de Ribeirão da Barra*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 112 p.

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**(3):323-333.

Bau M. & Möller P. 1993. Rare earth element systematics of the chemically precipitated component in Early Precambrian iron formations and the evolution of the terrestrial atmosphere-hydrosphere-lithosphere system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **57**:2239-2249.

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**:37-55.

Behne, W. 1953. Untersuchungen zur Geochemie des Chlor und Brom. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **3**:186-214.

Bekker A., Slak J.F., Planavsky N., Kraepz B., Hofmann A., Konhauser K.O., Rouxel O.J. 2010. Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes. *Economic Geology*, **105**:467-508.

Beukes N.J. 1986. The Transvaal sequence in Griqualand West. In: Anhaeusser C.R. & Maske S. (eds.) Mineral deposits of Southern Africa, Johannesburg, Geological Society of South Africa, **1**, p. 819-828.

Beukes N.J. & Klein C. 1992. Models for iron-formation deposition. In: Schopf J.W. and Klein C. (eds.). The Proterozoic biosphere: A multidisciplinary study. Cambridge, Cambridge Univ. Press, p. 147-151.

Beukes N.J., Klein C., Kaufman A.J., Hayes J.M. 1990. Carbonate Petrography, Kerogen Distribution, and Carbon and Oxygen Isotope Variations in an Early Proterozoic Transition from Limestone to Iron-Formation Deposition, Transvaal Supergroup, South Africa. *Bulletin of the society of Economic Geologists*, **85**(4):663-690.

Beukes N.J., Gutzmer J., Mukhopadhyay J. 2003. The geology and genesis of high-grade hematite iron ore deposits. *Applied Earth Science*, **112**:18-25.

Bilal E., Marciano V., Correia Neves J.M., Fuzikawa K., Riffel B.F., Nalini H.A., Fernandes M.L., Nasraoui M., 1998. Altération hydrothermale des monazites-(Ce) des pegmatites du district de Santa Maria de Itabira (Minas Gerais, Brésil). *Earth & Planetary Sciences*, **326**:693-700.

Bodnar R.J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **57**:683-684.

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 H₂O-NaCl to 1000°C and 1500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **49**:1861-1873.

Bodnar R.J., Vityk M.O. 1994. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. In: De Vivo, B.; Frezzotti, M.L. (eds.). Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Virginia Tech., Blacksburg, p.117-130.

Bowers T.S., Helgeson H.C. 1983. Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of non-ideal mixing in the system H₂O-CO₂-NaCl on phase relations in geological systems – equation of state for H₂O-CO₂-NaCl fluids at high pressures and temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **47**:1246-1275.

Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., Pimentel, M.M. 2014. The Brasiliano collage in South America: a review. *Brazilian Journal of Geology*, **44**(3):493-518.

Brown P.E. & Hagemann S.G. 1995. MacFlinCor and its application to fluids in Archaean lode-gold deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**:3943-3952.

Cabral A.R. 1996. *Mineralização de ouro paladiado em itabiritos: A Jacutinga de Gongo Soco, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 129 p.

Cabral A.R. 2006. *Palladiferous Gold Mineralisation (ouro preto) in Brazil: Gongo Soco, Itabira and Serra Pelada*. Tese de Doutorado, Herausgegeben von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und dem Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, Hannover, 115 p.

Cabral A.R., Lehmann B., Kwitko R., Jones R.D., Pires F.R.M., Rocha Filho O.G., Innocentini M.D. 2001. Palladium-oxygenated compounds of the Gongo Soco mine, Quadrilátero Ferrífero, central Minas Gerais, Brazil. *Mineralogical Magazine*, **65**(2):253-263.

Cabral A.R., Lehmann B., Kwitko R., Galbiatti H.F., Pereira M.C., 2002. Palladseite and its oxidation: evidence from Au-Pd vein-type mineralization (jacutinga), Cauê iron-ore mine, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Mineralogical Magazine*, **66**:327-336.

Cabral A.R., Rocha Filho O.G., Jones R.D. 2003. Hydrothermal origin of soft hematite ore in the Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil: petrographic evidence from the Gongo Soco iron ore deposit. *Applied Earth Science*, **112**:B279-B286.

Cabral A.R., Lehmann B., Tupinambá M., Schlosser S., Kwitko-Ribeiro R., Abreu F.R. 2009. The platiniferous Au-Pd belt of Minas Gerais, Brazil, and Genesis of its botryoidal Pt-Pd aggregates. *Economic Geology*, **104**:1265-1276.

Cabral A.R., Zeh A., Nikola K., Gomes Jr. A.A.S., Viana D.J., Lehmann B. 2012a. Dating the Itabira Iron Formation, Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil, at 2.65 Ga: Depositional U-Pb age of zircon from a metavolcanic layer. *Precambrian Research*, **204-205**:40-45.

Cabral A.R., Wiedenbeck M., Rios F.J., Gomes Jr, A.A.S., Rocha Filho, O.G., Jones, R.D. 2012b. Talc mineralisation associated with soft hematite ore, Gongo Soco deposit, Minas Gerais, Brazil: petrography, mineral chemistry and boron-isotope composition of tourmaline. *Mineralium Deposita*, **47**:411-424.

Cabral A.R. & Zeh A. 2015. Detrital zircon without detritus: a result of 496-Ma-old fluid-rock interaction during the gold-lode formation of Passagem, Minas Gerais, Brazil. *Lithos*, **212-215**:415-427.

Cabral A.R., Zeh A., Galbiatti H.F., Lehmann B., 2015a. Late Cambrian Au-Pd mineralization and Fe enrichment in the Itabira District, Minas Gerais, Brazil, at 496 Ma: constraints from U-Pb monazite dating of a Jacutinga lode. *Economic Geology*, **110**:263-272.

- Cabral A.R., Rios F.J., Oliveira L.A.R., Abreu F.R., Lehmann B., Zack T., Laufek F., 2015b. Fluid inclusion microthermometry and the Zr in rutile thermometer for hydrothermal rutile. *International Journal of Earth Sciences*, **104**(2):513-519.
- Cabral, A.R., Lehmann, B., Gomes Jr., A.A.S., Pasava, J. 2016. Episodic negative anomalies of cerium at the depositional onset of the 2.65-Ga Itabira iron formation, Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, **276**:101-109.
- Campbell A.R., Hackbarth C.J., Plumlee G.S., Petersen U. 1984. Internal features of Ore Minerals seen with the Infrared Microscope. *Economic Geology*, **79**:1387-1392.
- Canfield D.E. 1998. A new model for Proterozoic ocean chemistry. *Nature*, **396**:450-453.
- Canfield D.E. 2005. The Early History of an Atmospheric Oxygen: Homage to Robert M. Garrels. *Annu. Ver. Earth Planet.*
- Carneiro M.A. 1992. *O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero, MG): Litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do Arqueano*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 233 p.
- Chauvet A., Piantone P., Barbanson L., Nehlig P., Pedroletti I. 2001. Gold deposit formation during collapse tectonics: Structural, mineralogical, geochronological, and fluid inclusion constraints in the Ouro Preto gold mines, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Economic Geology*, **96**:25-48.
- Chemale Jr. F., Quade H., Santana F.C. 1987. Economic and structural geology of the Itabira Iron District, Minas Gerais, Brazil. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, **VI**(7/8):743-752.
- Chemale Jr. F., Rosière C.A., Endo I. 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, **65**:25-54.
- Chemale Jr. F., Dussin I.A., Alkmim F.F. Martins M.S., Queiroga G., Armstrong R., Santos M.N. 2012. Unraveling a Proterozoic basin history through detrital zircon geochronology: The case of the Espinhaço Supergroup, Minas Gerais, Brazil. *Gondwana Research*, **22**(1):200-206.
- Clout J.M.F. & Simonson B.M. 2005. Precambrian Iron Formation and Iron Formation-Hosted Iron Ore Deposits. *Economic Geology 100th Anniversary*, 643-679.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). 2004. Disponível em: <http://geobank.cprm.gov.br/>. Acesso: 10 mai. 2011.
- Cordani U.G., D'Agrella-Filho M.S., Brito-Neves B.B., Trindade R.I.F. 2003. Tearing up Rodinia: the Neoproterozoic palaeogeography of South American cratonic fragments. *Terra Nova*, **15**:350-359.
- Correns C.W. 1956. The geochemistry of the halogens. In: Ahrens L.F. *et al.* (eds.). *Physics and Chemistry of the Earth*. New York, McGraw-Hill, **1**:181-233.

- Costa L.A.M. & Inda H.A.V. 1982. O Aulacógeno do Espinhaço. *Ciências da Terra*, **2**:13-18.
- Dalstra H. & Guedes S. 2004. Giant Hydrothermal Hematite Deposits with Mg-Fe Metasomatism: a Comparison of the Carajás, Hamersley, and other iron ores. *Economic Geology*, **99**(8):1793-1800.
- Danielson A., Möller P., Dulski P. 1992. The europium anomalies in banded iron formations and the thermal history of the oceanic crust. *Chemical Geology*, **97**:89-100.
- Derry L.A. & Jacobsen S.B. 1990. The chemical evolution of Precambrian seawater: Evidence from REEs in banded iron formations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **54**:2965-2977.
- Dorr J.V.N. 1964. Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, **59**(7):1203-1239.
- Dorr J.V.N. 1965. Nature and origin of the high-grade hematite ores of Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, **60**(1):1-46.
- Dorr J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Geological Survey, Professional Paper* **641-A**:110 p.
- Dorr J.V.N. & Barbosa A.L.M. 1963. Geology and ore deposits of the Itabira district, Minas Gerais, Brazil. *Geological Survey, Professional Paper* **341-C**:110 p.
- Dossin I.A., Uhlein A., Dossin T.M. 1984. Geologia da Faixa Móvel Espinhaço em sua Porção Meridional, Minas Gerais. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 33, *Anais*, v. 2, p. 3118.
- Dossin I.A., Chaves M.L.S.C., Uhlein A., Alvarenga C.J.S. 1985. Geologia e depósitos diamantíferos da região de Sopa, Diamantina, Minas Gerais. In: SBG, III Simp. Geol. Minas Gerais, *Anais*, p. 276.
- Dossin I.A., Dossin T.M., Chaves M.L.S.C. 1990. Compartimentação estratigráfica do Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais – Os Grupos Diamantina e Conselheiro Mata. *Revista Brasileira de Geociências*, **20**(1-4):178-186.
- Eichler J.O. 1968. Enriquecimento residual e supergênico dos itabiritos através do intemperismo. *Geology*, **I**:29-40.
- Eichler J.O. 1973. Origin of the Precambrian banded iron-formations. In: Wolf K.H (ed.). Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits. Elsevier, Chapter 4, p.: 157-201.
- Eschwege W.L.V. 1822. *Geognostisches Gemälde von Brasilien und wahrscheinliches Muttergestein der Diamanten*. Weimar, 44 p.
- Fontes J.Ch. & Matray J.M. 1993. Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin, France: 2. Saline solutions associated with oil fields. *Chemical Geology*, **109**:177-200.

- Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. 2012. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, **112**:1-20.
- Fryer B.J. 1977. Rare earth evidence in iron-formations for changing Precambrian oxidation states. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **41**:361-367.
- Fryer B.J., Fyfe W.S., Kerrich R. 1979. Archaean volcanogenic oceans. *Chemical Geology*, **24**:25-33.
- Fuzikawa K. 1985. Inclusões fluidas: métodos usuais de estudo e aplicações. In: SBG, Contribuições à Geologia e à Petrologia, *Boletim Especial*, p. 29.
- Gair J.E. 1962. Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima Quadrangles, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey, Professional Paper 341-A*:65 p.
- Galbiatti H.F., Fonseca M.A., Pereira M.C., Polônia J.C. 2007. Structural control of Au-Pd mineralization (Jacutinga): An example from the Cauê Mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Ore Geology Reviews*, **32**:614-628.
- Gao S., Liu X., Yuan H., Hattendorf B., Gunther D., Hu S. 2002. Determination of forty two major and trace elements in SGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards Newsletter. The Journal of Geostandards and Geoanalysis*, **26**:181-196.
- Garcia A.J.V., Fonseca M.A., Bernardi A.V., Januzzi A. 1988. Contribuição ao reconhecimento dos paleoambientes deposicionais do Grupo Piracicaba na região de Dom Bosco-Quadrilátero Ferrífero-MG. *Acta Geologica Leopoldensia*, **27**(11):83-108.
- GEOREM. 2014. *GeoReM*: a new geochemical database for reference materials and isotopic standards. Disponível em: <http://georem.mpch-mainz.gwdg.de>. Acesso em: 20 out. 2014.
- Ghorfi M.E., Oberthür T., Melcher F., Lüders V., Boukhari A.E., Maacha L., Ziadi R., Baoutoul H. 2006. Gold-palladium mineralization at Bleïda Far West, Bou Azzer-El Graara Inlier, Anti-Atlas, Morocco. *Mineralium Deposita*, **41**:549-564.
- Goldschmidt V.M. 1954. *Geochemistry*. Clarendon Press, Oxford, 730 p.
- Goldstein R.H. & Reynolds T.J. 1994. *Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals*. SEPM Short Course 31, USA, 199 p.
- Goodwin A. M. 1973. Archaean volcanogenic iron-formation of Canada shield. In Genesis of Precambrian Iron and Manganese Deposits. *Proceedures of Kiev Symposium*, **9**:23-32.
- Graf Jr. J.L. 1978. Rare earth elements, iron formations and sea water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **42**:1845-1850.

Gross G.A. 1965. Geology of iron deposits in Canada. *In: General Geology and Evaluation of Iron Deposits. Economic Geology, Report N° 22.*

Gross G.A. 1973. The depositional environment of principal types of Pre-cambrian iron-formation in Genesis of Pre-cambrian Iron and Manganese Deposits. *Procedures of Kiev Symposium, 9:15-21.*

Gross G.A. 1980. A classification of iron formations based on depositional environments. *Canadian Mineralogist, 18:215-222.*

Grossi-Sad J.H., Magalhães J.M.M., Carelos P.M. 1989. Geologia do Distrito de Guanhães, Minas Gerais. *In: DOCEGEO - Rio Doce Geologia e Mineração / GEOSOL - Geologia e Sondagens Ltda. Relatório Interno, Belo Horizonte, 252 p.*

Grossi-Sad J.H., Mourão, M.A.A., Guimarães, M.L.V., Knauer L.G. 1997. Geologia da Folha Conceição do Mato Dentro. *In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa-Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coord. e eds.). PROJETO ESPINHAÇO EM CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais. p. 2533-2693.*

Guild P.W. 1953. Iron deposits of the Congonhas District, Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology, 48(8):639-676.*

Guild P.W. 1957. Geology and mineral resources of the Congonhas District, Minas Gerais, Brazil. *Geological Survey, Professional Paper 290:90 p.*

Guillong M., Meier D.L., Allan M.M., Heinrich C.A., Yardley B.W.D. 2008. Appendix A6: SILLS: A Matlab-based program for the reduction of Laser Ablation ICP-MS data of homogeneous materials and inclusions. *In: Sylvester P. (ed.). Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues. Short course series, Mineralogical Association of Canada, 40, Vancouver, BC, p. 328-333.*

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(9):939-944.*

Gutzmer J., Netshiozwi S., Beukes N.J. 2002. Hydrothermal origin of high-grade iron orebodies hosted by the Paleoproterozoic Penge Iron Formation, Thabazimbi, South Africa. *In: International Sedimentological Congress, 16, Abstract, CD-ROM.*

Hackspacher P.C. 1979. *Strukturelle und textuelle Untersuchungen zur internen Deformation des Eisenreicherzkörpers der Grube "Agua Clara" bei Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasilien, v. 34. Clausthaler, Geologische Abhandlungen, 164 p.*

Hagemann S.G., Barley M.E., Folkert S.L., Yardley B.W., Banks D.A. 1999. A hydrothermal origin for the Giant Tom Price Iron Ore Deposit. *In: Stanley C.J. (ed.). Mineral deposits: process to processing. Rotterdam, Balkema, p. 41-44.*

- Hagemann S.G., Rosière C.A., Lobato L.M., Baars F.J., Zucchetti M., Figueiredo e Silva R.C., Thorne W. 2005. Controversy in genetic models for high-grade BIF-related Fe deposits: unifying or discrete model(s)? In: Iron Ore 2005, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Perth, Austrália, *Publication Series*, **8**:67-71.
- Hagemann S.G., Rosière C., Gutzmer J., Beukes N.J (eds.). 2008. Banded iron formation-related high-grade iron ore. *Reviews in Economic Geology*, **15**. Littleton, Society of Economic Geologists, Inc., 424 p.
- Hamade T., Konhauser K.O., Raiswell R, Goldsmith S., Morris R.C. 2003. Using Ge/Si ratios to decouple iron and silica fluxes in Precambrian banded iron formations. *Geology*, **31**(1):35-38.
- Hanley, J.J., 2005. The aqueous geochemistry of the platinum-group elements (PGE) in surficial, low-T hydrothermal and high-T magmatic–hydrothermal environments. In: Mungall J. (ed.). Exploration for platinum-group element deposits, *Mineral. Ass. Canad. Short. Course*, **35**:35-56.
- Hanor, J.S. 1987. Origin and migration of subsurface sedimentary brines. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Short Course Notes 21, Tulsa, OK, p. 245.
- Harmsworth R.A., Kneeshaw M., Morris R.C., Robinson C.J., Shrivastava P.K. 1990. BIF-derived iron-ores of the Hamersley Province. In: Hughes F.E. (ed.). *Geology of the mineral deposits of Australia and Papua – New-Guinea*. Melbourne, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 617 p.
- Harnmeijer J.P. 2003. Banded Iron-Formation: A continuing enigma of geology. University of Washington.
- 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**:273-285.
- Hartt C.F. 1870. *Geology and physical geography of Brazil*. Boston; Fields, Osgood, & Co. 620 p.
- Haynes F.M. 1985. Determination of fluid inclusion compositions by sequential freezing. *Economic Geology*, **80**:1436–1439.
- Heinrich C.A., Pettke, T., Halter W.E., Aigner-Torres M., Audétat A., Günther D., Hattendorf B., Bleiner D., Guillong M., Horn I. 2003. Quantitative Multi-Element Analysis of Minerals, Fluid and Melt Inclusions by Laser-Ablation Inductively-Coupled-Plasma Mass-Spectrometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **67**:3473-3497.
- Helgelson H.C. & Garrels R.M. 1968. Hydrothermal transport and deposition of Gold. *Economic Geology*, **63**:622-635.
- Henwood W.J. 1871. On the gold mines of Minas Gerais, Brazil. *Transactions of Royal Geological Society of Cornwall*, **8**:168-370.

Herrgesell G. & Pflug R. 1986. The thrust belt of the Southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie*, **1**(9/10):1405-1414.

Horwitz W. 1982. Evaluation of analytical methods used for regulation of foods and drugs. *Analytical Chemistry*, **54**(1):67-76A.

Hussak E. 1904. Über das Vorkommen von Palladium und Platin in Brasilien. *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, **113**:379-466.

Hussak E. 1906. Über das Vorkommen von Palladium und Platin in Brasilien. *Z. prakt. Geol.*, **14**:284-293.

James H.L. 1954. Sedimentary facies of iron-formation. *Economic Geology*, **49**:235-293.

James H.L. 1966. Chemistry of the iron-rich sedimentary rocks. In: Fleischer M. (ed.). Data of Geochemistry, U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C., 6th edition, Paper 440-W.

James H.L. 1983. Distribution of Banded Iron-Formation in Space and Time. In: Developments in Precambrian Geology. Iron-Formations Facts and Problems, v. 6, Chapter 12, p. 471-490.

Kato Y., Ohta I., Tsunematsu T., Watanabe Y., Isozaki Y., Maruyama S., Imai N. 1998. Rare earth element variations in mid-Archean banded iron formations: Implications for the chemistry of ocean and continent and plate tectonics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **62**(21/22):3475-3497.

Kesler S. E. 2005. Ore Forming Fluids. *Elements*, **1**:13-13.

Kesler S.E., Appold M.S., Martini A.M., Walther L.M., Huston T.J., Kyle J.R. 1995. Na-Cl-Br systematics of mineralising brines in Mississippi Valley-type deposits. *Geology*, **23**:641-644.

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**:1473-1499.

Klein C. & Beukes N.J. 1989. Geochemistry and Sedimentology of facies transition from limestone to iron-formation deposition in the early proterozoic Transvaal Supergroup, South Africa. *Economic Geology*, **84**:1733-1774.

Klein C. & Beukes N.J. 1992. Time distribution, stratigraphy, and sedimentologic setting, and geochemistry of Precambrian Iron Formation. In: Schopf J.W. & Klein C. (eds.). The Proterozoic Biosphere: A multidisciplinary study, Cambridge University Press, New York, p. 139.

Klein C. & Ladeira E.A. 2004. Geochemistry and mineralogy of Neoproterozoic banded Iron-Formations and some selected, siliceous manganese formations from the Urucum district, Mato Grosso do Sul, Brazil. *Economic Geology*, **99**:1233-1244.

Knauer L.G. 1990. *Evolução geológica do Pré-Cambriano da porção centro-leste da Serra do Espinhaço Meridional e Metalogênese associada*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 198 p.

Knauer L. G. & Grossi-Sad J. H. 1997. Geologia da Folha Serro. In: Grossi-Sad J.H., Lobato L.M., Pedrosa- Soares A.C., Soares-Filho B.S. (coord. e eds.). PROJETO ESPINHAÇO EM CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 2057-2316.

Knauer L.G. 2007. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: Considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. *Geonomos*, **15**(1):81-90.

Knoll A.H. 2003. *Life on a young planet-the first three billion years of evolution on Earth*. Princeton, NJ., Princeton University Press, 277 p.

Konhauser K.O., Hamade T., Raiswell R., Morris R.C., Ferris F.G., Southam G., Canfield D.E. 2002. Could bacteria have formed the Precambrian banded iron-formations? *Geology*, **30**(12):1079-1082.

Konhauser K.O., Amskold L., Lalonde S.V., Posth N.R., Kappler A. Anbar A. 2007. Decoupling photochemical Fe(II) oxidation from shallow-water BIF deposition. *Earth and Planetary Science Letters*, **258**:87-100.

Krauskopf K.B. 1951. The solubility of Gold. *Economic Geology*, **46**:858-870.

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

Lascelles D. 2002. A new look at old rocks – An alternative model for the origin of in situ iron ore deposits derived from banded iron-formation. In: Iron Ore 2002, *Anais*, p.107-126.

Law J.D.M., Phillips G.N., Myers R. E. 2002. Relevance of the Archaean Atmosphere to the Genesis of Banded Iron Formations. In: International Conference on Iron Ores and their host rocks, p.33-40.

Leão de Sá E. & Borges N. 1991. Gold mineralization in the Cauê and Conceição mines. Itabira, MG. In: Brasil Gold'91 Symposium, *Field Guide Book*, p. 75.

Lima T.A.F. 2009. *Estudo de inclusões fluidas em hematitas e em quartzo associado das Formações Ferríferas da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro, MG*. Dissertação de Mestrado, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 187 p.

Lima T.A.F., Rios F.J., Rosière C.A., Meireles H.P., Yardley B.W.D. 2009. Fe-ore Forming Fluids in the Espinhaço Supergroup, Minas Gerais, Brazil. In: Williams J. *et al.* (eds.). Smart Science for Exploration and Mining, Univ. of Townsville, p. 564.

- Lobato L.M., Ribeiro-Rodrigues L.C., Zucchetti M., Noce C.M., Baltazar O.F., Silva L.C., Pinto C.P. 2001. Brazil's premier gold province. Part I. The tectonic, magmatic, and structural setting of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, **36**:228-248.
- Lobato L.M., Baltazar O.F., Reis L.B., Achtschin A.B., Baars F.J., Timbó M.A., Berni G.V., Mendonça B.R.V. de, Ferreira D.V. 2005. *Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG Nota Explicativa*. Belo Horizonte, CODEMIG.
- 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**:1-19.
- 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):169-178.
- Lüders V., Romer R.L., Cabral A.R., Schmidt C., Banks D.A., Schneider, J. 2005. Genesis of itabirite-hosted Au–Pd–Pt-bearing hematite-(quartz) veins, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: constraints from fluid inclusion infrared microthermometry, bulk crush-leach analysis and U–Pb systematics. *Mineralium Deposita*, **40**:289-306.
- Machado, N., Schrank, A., Abreu, F.R. de, Knauer, L.G., Almeida-Abreu, P.A., 1989. Resultados preliminares da geocronologia U/Pb na Serra do Espinhaço Meridional. In: SBG, Simp. Geol. Minas Gerais, Belo Horizonte, 5, 171-174.
- Machado N. & Carneiro M.A. 1992. U-Pb evidence of the late Archean tectono-thermal activity in the southern Sao Francisco shield, Brazil. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **29**:2341-2346.
- Machado N., Noce C.M., Ladeira E.A., Belo de Oliveira O.A. 1992. U-Pb Geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, southern São Francisco Craton, Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, **104**:1221-1227.
- Machado N., Schrank A., Noce C.M., Gauthier G. 1996. Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: implications for greenstone belt setting and evolution of a transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*, **141**:259-276.
- Maier W.D. 2005. Platinum-group element (PGE) deposits and occurrences: Mineralization styles, genetic concepts, and exploration criteria. *Journal of African Earth Sciences*, **45**:165-191.
- Maliva R.G., Knoll A.H., Simonson B.M. 2005. Secular change in the Precambrian silica cycle: insights from chert petrology. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **117**:835–845.
- Marciano, V.R.P.R.O., Rios, F.J., Achtschin A.B., Correia Neves, J.M., Svisero, D., 1994. Berilos de Pegmatitos de Santa Maria de Itabira, Minas Gerais - Brasil. *Geonomos*, **2**(2):41-50.

- Marsala A., Wagner T., Wälle M. 2013. Late-metamorphic veins record deep ingression of meteoric water: A LA-ICPMS fluid inclusion study from the fold-and-thrust belt of the Rhenish Massif, Germany. *Chemical Geology*, **351**:134-153.
- Masoudi F., Yardley B.W.D. 2005. Magmatic and Metamorphic Fluids in Pegmatite Development: Evidence from Borujerd Complex, Iran. *Journal of Sciences*, **16**(1):43-53.
- Maxwell C.H. 1972. Geology and ore deposits of the Alegria district, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey, Professional Paper*, **341-J**:72 p.
- McCaffrey M.A., Lazar B., Holland H.D. 1987. The evaporation path of seawater and the coprecipitation of Br and K with halite. *Journal of Sedimentary Resources*, **57**:928-937.
- McLennan S.B. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks. Influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin B.R. & McKay G.A. (eds.). *Geochemistry and mineralogy of the rare earth elements*. Washington, Mineralogical Society of America, p. 169-200.
- Melfi A.J., Pedro G., Nalovic L., Queiroz Neto J.P. 1976. Etude sur l'altération géochimique des itabirites du Brésil (dissolution du quartz et instabilité de l'hématite primaire en conditions tropicales hydrolysantes). *Cahiers Orstom Série Pédologie*, **XIV**(3):179-192.
- Mernagh T.P., Heinrich C.A., Leckie J.F., Carville D.P. Gilbert D.J., Valenta R.K., Wyborn L.A.I. 1994. Chemistry of Low-Temperature Hydrothermal Gold, Platinum, and Palladium (\pm Uranium) Mineralization at Coronation Hill, Northern Territory, Australia. *Economic Geology*, **89**:1053-1073.
- Minami M., Masuda A., Takahashi K., Adachi M., Shimizu H. 1998. Y-Ho fractionation and lanthanide tetrad effect observed in cherts. *Geochemical Journal*, **32**:405-419.
- Moore S.L. 1969. Geology and ore deposits of the Antônio dos Santos, Gongo Soco and Conceição do Rio Acima Quadrangles, Minas Gerais, Brazil. *U. S. Geological Survey, Professional Paper* **341-I**:50 p.
- Morgan R., Orberger B., Rosière C.A., Wirth R., Mota Carvalho C.D., Bellver-Baca M.T. 2013. The origin of coexisting carbonates in banded iron formations: a micro-mineralogical study of the 2.4 Ga Itabira Group, Brazil. *Precambrian Research*, **224**:491-511.
- Morris R.C.A. 1980. Textural and mineralogical study of the relationship of iron ore to banded iron formation in the Hamersley Iron Province of Western Australia. *Economic Geology*, **75**(2):184-209.
- Morris R.C.A. 1985. Genesis of iron ore in banded iron-formation by supergene and supergene-metamorphic processes – A conceptual model. In: *Handbook of Strata-Bound and Stratiform. Ore Deposits*, **13**:73.
- Morris R.C.A. 1987. Iron ores derived by enrichment of banded iron formation. In: Hein J.R (ed.). *The genesis of ores and petroleum associated with sedimentary siliceous deposits*. New York, Van Nostrand Reinhold Company, p. 231-267.

Morris R.C.A. 1993. Genetic modeling for banded iron formation of the Hamersley Group, Pilbara craton, Western Australia. *Precambrian Research*, **60**:243-286.

Mullis J., Dubessy J., Poty B., O'Neil J. 1994. Fluid regimes during late stages of a continental collision: Physical, chemical, and stable isotope measurements of fluid inclusions in fissure quartz from a geotraverse through the Central Alps, Switzerland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**(10):2239-2267.

Nabelek, P.I., Wilke, M., 2002. Carbonic fluid production during regional and contact metamorphism in the Black Hills, USA. *Goldschmidt Conference Abstracts*.

Nadoll P., Angerer T., Mauk J.L., French D., Walshe J. 2014. The chemistry of hydrothermal magnetite: a review. *Ore Geology Reviews*, **61**:1-32.

Newman D.T.C., 2009. *Estudos mineralógicos e microtermométricos de algumas espécies mineralógicas oriundas de pegmatitos dos distritos pegmatíticos de Santa Maria de Itabira e Governador Valadares, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 357 p.

Noce C.M. 1995. *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 128 p.

Noce C.M., Machado N., Teixeira W. 1998. U-Pb geochronology of gneisses and granitoids in the Quadrilátero Ferrífero (Southern São Francisco craton): age constraints for Archean and Paleoproterozoic magmatism and metamorphism. *Revista Brasileira de Geociências*, **28**:95-102.

Nozaki Y., Zhang J., Amakawa H. 1997. The fractionation between Y and Ho in the marine environment. *Earth and Planetary Science Letters*, **148**:329-340.

Oliveira L.A.R., Lima T.A.F., Rosière C.A., Rios F.J., Meireles H.P. 2012. Hydrothermal Mineralized Fluids from Quadrilátero Ferrífero Fe-orebody, Brazil: A comparison between NW (Esperança Mine) and E Sectors. In: SEG, *Bennial Meeting*, Poster 84.

Oliveira L.A.R., Rosière C.A., Rios F.J., Andrade S., Moraes R. de. 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):193-216.

Olivo G.R. 1994. *Les Gîtes d'or Palladifères des Mines de Cauê et de Conceição, dans les formations de fer du type Lac Supérieur du District D'Itabira, Craton São Francisco, Brésil: structure, minéralogie, géochronologie et métallogénie*. Tese de Doutorado, Université du Québec à Montréal, 209 p.

Olivo G.R., Gauthier M., Bardoux M. 1994. Palladian gold from the Cauê iron mine, Itabira district, Minas Gerais, Brazil. *Mineralogical Magazine*, **58**:579-587.

- Olivo G.R., Gauthier M., Bardoux M. Sá E.L., Fonseca J.T.F., Santana F.C. 1995. Palladium-bearing gold deposits hosted by Proterozoic Lake Superior-type iron-formation at Cauê region mine, Itabira District, southern São Francisco Craton, Brazil: geologic and structural controls. *Economic Geology*, **90**:118-134.
- Olivo G.R., Gauthier M., Garipey C., Carignan J. 1996. Transamazonian tectonism and Au-Pd mineralization at the Cauê mine, Itabira District, Brazil: Pb isotopic evidence. *Journal of South American Earth Science*, **9**:273-279.
- Olivo G.R., Archibald D.A., Ullrich T.D. 2011. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Evidence for the Brasiliano (ca. 500 Ma) Tectono-Thermal Event in the Southern Margin of the São Francisco Craton: Implications for the Remobilization and Preservation of Gold-PGE Deposits Hosted in the Minas Supergroup Iron-Formation. In: SGA, *Bennial Meeting*, **11**:867-870.
- Pedrosa-Soares A.C., Noce C.M., Wiedemann C.M., Pinto C.P., 2001. The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. *Precambrian Resources*, **110**:307-323.
- Pflug R. 1965. A geologia da parte meridional da Serra do Espinhaço e zonas adjacentes, Minas Gerais. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, *Bol.* **226**:1-51.
- Pflug R., Hoppe A., Brichta A. 1980. Paleogeografia do Pré-Cambriano na Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brasil. In: Geow. Lat. Koll., 3, *Anais*, p. 33.
- 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 Academia Brasileira de Ciências*, **67**:77-105.
- Planavsky N., Bekker A., Rouxel O.J., Kamber B., Hofmann A., Knudsen A., Lyons T.W. 2010. Rare earth element and yttrium compositions of Archean and Paleoproterozoic Fe formations revisited: new perspectives on the significance and mechanisms of deposition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**:6387-6405.
- Pomerene J.B. 1964. Geology and mineral deposits of the Belo Horizonte, Ibirité and Macacos quadrangles. *U.S. Geological Survey*, Professional Paper **341-D**:84 p.
- Powell A.C., Oliver N., Li Z.X., Martin B.D., Ronaszeki J. 1999. Synorogenic hydrothermal origin for giant Hamersley iron oxide ore bodies. *Geology*, **27**(2):175-178.
- Railsback L.B. 2003. An earth scientist's periodic table of the elements and their ions. *Geology*, **31**(9):737-740.
- Raman C.V. 1928. A new radiation. *Indian Journal of Physics*, 387-398.
- Rauchenstein-Martinek K., Wagner T., Wälle M., Heinrich C.A. 2014. Gold concentrations in metamorphic fluids: A LA-ICPMS study of fluid inclusions from the Alpine orogenic belt. *Chemical Geology*, **385**:70-83.

Reeves R.G. 1966. Geology and mineral resources of the Monlevade and Rio Piracicaba Quadrangles, Minas Gerais, Brazil. *U. S. Geological Survey, Professional Paper 341-E*:58 p.

Renger F.E., Noce C.M., Romano A.W., Machado N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500Ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, **2**:1-11.

Richards J.P., Kerrich R. 1993. Observations of zoning and fluid inclusions in pyrite using a transmitted infrared light microscope. *Economic Geology*, **88**:716-723.

Rios F.J., Souza, A.S., Correia Neves J.M., Fuzikawa K. 2003. Fluidos formadores das água-marinhas dos pegmatitos Sapé e Tatú, Santa Maria de Itabira, Minas Gerais. In: SBG Simpósio de Geologia de Minas Gerais, **1**:65-65.

Rios F.J., Fuzikawa K., Alves J.V., Gonçalves R.M., Chaves A.O., Souza A.M., Chaves A.M.D.V., Pereira A.R.P., Lima T.A.F., Correia Neves J.M., Pérez C.A., Guillot M.G., Mattos E.V., Rosière C.A., 2006a. Estudos por μ XRF-Sincrotron de fluidos mineralizadores detectados em minérios uraníferos, ferríferos e depósitos epitermais. *Revista Escola Minas*, **59**(4):373-377.

Rios F.J., Alves J.V., Pérez C.A., Costa E.C., Rosière C.A., Fuzikawa K., Correia Neves J.M., Chaves A.O., Prates S.P., Barrio R.E., 2006b. Combined investigations of fluid inclusions in opaque ore minerals by NIR/SWIR microscopy and microthermometry and synchrotron radiation X-ray fluorescence. *Applied Geochemistry*, **21**:813–819.

Roedder E. 1984. *Fluid Inclusions*. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, Washington, v.12, 664 p.

Roedder E. & Bodnar R.J. 1997. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. In: Barnes H.L. (ed.). *Fluid Inclusion Studies of Hydrothermal Ore Deposits*, John Wiley and Sons, p. 1-26. Tradução de Kazuo Fuzikawa.

Rolim V.K. 2016. *As Formações Ferríferas da Região de Conceição do Mato Dentro – MG: Posicionamento Estratigráfico, Evolução Tectônica, Características Geoquímicas e Gênese dos Minérios*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 242.

Rolim V.K. & Rosière C.A. 2011. The Conceição do Mato Dentro Iron Formation Province in southeastern Brazil. In: *Let's Talk Ore Deposits: Proceedings of the Eleventh Biennial SGA Meeting*, Antofagasta, Chile. Disponível em: https://sga.conference-services.net/resources/1054/2590/pdf/SGA2011_0237.pdf. Acesso em: 24 nov. 2012.

Rolim V.K.R., Rosière C.A., Santos J.O.S., McNaughton N.J. 2016. The Orosirian-Statherian Banded Iron Formation-Bearing Sequences of the Southern Border of the Espinhaço Range, Southeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **65**:43-66.

Ronchi L.H., Giuliani G., Beny C., Fogaça A.C.C. 1992. Caracterização Físico-Química dos Fluidos Associados aos Veios de Quartzo Auríferos de Costa Sena - MG. *Revista Brasileira de Geociências*, **22**(2):129-138.

Rosière C.A. 1981. *Strukturelle und Texturelle Untersuchungen in der Eisenerzlagerstaette "Pico de Itabira" bei Itabirito, Minas Gerais, Brasilien*. Geowissenschaftliche Dissertationen, v. 9. Clausthal Technische Universität Clausthal, 302 p.

Rosière C.A. & Chemale Jr. F. 1991. Textural and structural aspects of iron ores from Iron Quadrangle, Brazil. In: Pagel M. & Leroy J.L. (eds.). Source, transport and deposition of metals: proceedings of the 25 years. Nancy, Balkema, *Society for Geology Applied to Mineral Deposits Anniversary Meeting*, p. 485-489.

Rosière C.A. & Chemale Jr. F. 2000. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – Uma visão geral e discussão. *Geonomos*, **8**(2):27-43.

Rosière C.A., Siemes H., Quade H., Brokmeier H.G., Jansen E. 2001. Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. *Journal of Structural Geology*, **23**(8):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**:611-624.

Rosière C.A. & Rios F.J. 2006. Specularitic iron ores and shear zones in the Quadrilátero Ferrífero District. *Applied Earth Science, Institute of Materials, Minerals and Mining and The AusIMM*, **115**(4):1-5.

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**:223-254.

Rosière C.A., Garcia O.L., Siemens H., Schaeben H. 2013a. Domainal fabrics of hematite in schistose, shear zone-hosted high-grade Fe ores: the product of the interplay between deformation and mineralization. *Journal of Structural Geology*, **55**:150-166.

Rosière C.A., Sanglard J., Sabadini Jr. R., Hensler A.-S., Hagemann S., Santos J.O.S., McNaughton N., Fletcher I. 2013b. Iron mineralization in the Quadrilátero Ferrífero: structural control, age and mineral-chemical changes. In: 12th SGA Biennial Meeting, Mineral Deposit Research for a High-Tech World, Uppsala, *Annals*.

Sanglard J.C.D. 2013. *Geologia estrutural do segmento oeste da Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, e o controle tectônico das acumulações de alto teor em Fe*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 79 p.

Sanglard J.C.D., 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. In: 11th SGA Biennial Meeting, Antofagasta, p. 879-881.

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. *Geologia USP, Série científica*, **14**(1), 81-95.

Santos M.N., Chemale Jr. F., Dussin I.A., Martins M., Assis T.A.R., Jelinek A.R., Guadagnin F., Armstrong R. 2013. Sedimentological and paleoenvironmental constraints of the Statherian and Stenian Espinhaço rift system, Brazil. *Sediment. Geol.*, **290**:47-59.

Schlegel T.U., Wälle M., Steele-MacInnis M., Heinrich C.A. 2012. Accurate and precise quantification of major and trace element compositions of calcic-sodic fluid inclusions by combined microthermometry and LA-ICPMS analysis. *Chemical Geology*, **334**:144-153.

Seo J.H., Guillong M., Aerts M., Zajacz Z., Heinrich C.A. 2011. Microanalysis of S, Cl, and Br in fluid inclusions by LA-ICP-MS. *Chemical Geology*, **284**:35-44.

Shepherd T.J., Rankin A.H., Alderton D.H.M. 1985. *A practical guide to fluid inclusions studies*. Blakie, Glasgow-London, 237 p.

Silva A.M., Chemale Jr. F., Kuyumjian R.M., Heaman L. 1995. Mafic dike swarms of Quadrilátero Ferrífero and southern Espinhaço, Minas Gerais, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* **25**(2):124-137.

Silva L.C., Armstrong R., Noce C.M., Carneiro M.A., Pimentel M., Pedrosa-Soares P., Leite C.A., Vieira, V.S., Silva M.A., Paes V.J.C., Cardoso Filho J.M. 2002. Reavaliação da evolução geológica em terrenos pré-cambrianos brasileiros com base em novos dados U-Pb SHRIMP, Parte II: Orógeno Araucaí, Cinturão Mineiro e Cráton São Francisco Meridional. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(4):513-528.

Silveira Braga F.C. 2012. *A sequência portadora de formação ferrífera da Serra do Morro Escuro, Santa Maria de Itabira, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 299 p.

Silveira Braga, F.C., Rosière, C.A., Queiroga, G.N., Rolim, V.K., Schneider Santos, J.O., McNaughton, N.J., 2015. The Statherian itabirite-bearing sequence from the Morro Escuro Ridge, Santa Maria de Itabira, Minas Gerais, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **58**:33-53.

Simmons G.C. 1968. Geology and mineral resources of the Barão de Cocais area, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey, Professional Paper* **341-H**:46 p.

Smekal A. 1923. The quantum theory of dispersion. *Naturwissenschaften*, **11**:873-875.

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**:751-774.

- 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**:170-206.
- Spier C.A., Oliveira S.M.B., Rosière C.A., Ardisson J.D. 2008. Mineralogy and trace-element geochemistry of the high-grade iron ores of the Águas Claras Mine and comparison with the Capão Xavier and Tamanduá iron ore deposits, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Mineralium Deposita*, **43**:229-254.
- Steele-MacInnis B., Bodnar R.J., Naden J. 2011. Numerical model to determine the composition of H₂O–NaCl–CaCl₂ fluid inclusions based on microthermometric and microanalytical data. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **75**:21-40.
- Stober I. & Bucher K. 1999. Origin of salinity of deep groundwater in crystalline rocks. *Terra Nova*, **11**(4):181-185.
- Taylor D., Dalstra H.J., Harding A.E., Broadbent G.C., Barley M.E. 2001. Genesis of high-grade hematite orebodies of the Hamersley Province, Western Australia. *Economic Geology*, **96**(4):837-873.
- Teixeira W. & Figueiredo M.C.H. 1991. An outline of Early Proterozoic crustal evolution in the São Francisco Craton, Brazil: a review. *Precambrian Research*, **53**:1-22.
- Teixeira W., Carneiro M.A., Noce C.M., Machado N., Sato K., Taylor P.N. 1996. Pb, Sr and Nd isotope constraints on the Archean evolution of gneissic–granitoid complexes in the southern São Francisco craton, Brazil. *Precambrian Research*, **78**:151-164.
- Thorne W.S., Hagemann S.G., Sepe D., Dalstra H.J., Banks D.A. 2014. Structural Control, Hydrothermal Alteration Zonation, and Fluid Chemistry of the Concealed, High-Grade 4EE Iron Orebody at the Paraburdoo 4E Deposit, Hamersley Province, Western Australia. *Economic Geology*, **109**:1529-1562.
- Trendall A.F. 1983. Introduction. In: Trendall A.F. & Morris R.C. (eds.). *Iron-Formation: Facts and Problems*, Elsevier, Amsterdam, p. 1-11.
- Trompette R.R., Uhlein A., Silva M.E., Karmann I. 1992. O Cráton Brasileiro do São Francisco – Uma Revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, **22**(4):481-486.
- Vial D.S., Duarte B.P., Fuzikawa K., Vieira M.B.H. 2007. An epigenetic origin for the Passagem de Mariana gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Ore Geology Reviews*, **32**(3):596-613.
- Wallace R.M. 1965. Geology and mineral resources of the Pico do Itabirito District, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey, Professional Paper*, **341-F**:68 p.
- Webb A.D., Oliver N.H.S., Dickens G.R. 2002. Multistage evolution of high-grade hematite orebodies from Hamersley Province, Western Austrália. In: *Iron Ore 2002, Anais*.

Wilde A.R., Bloom, M.S., Wall V.J. 1989. Transport and deposition of gold, uranium, and platinum-group elements in unconformity related uranium deposits. In: Keays, R.D., Ramsay, W.R.H., Groves, D.I. (eds.). The geology of gold deposits - the perspective in 1988. Economic Geology Monogr., **6**:637-650.

Yardley B.W.D. 2013. The Chemical Composition of Metasomatic Fluids in the Crust. In: Harlov, D.E., Austrheim, H. (eds.). Metasomatism and the Chemical Transformation of Rock, Springer, Lecture Notes in Earth System Sciences, p. 17-51.

Yardley B.W.D. & Graham J.T. 2002. The origins of salinity in metamorphic fluids. *Geofluids*, **2**:249-256.

Yardley B.W.D. & Bodnar R.J. 2014. *Fluids in the continental crust*. Geochemical Perspectives, v. 3, n. 1. The Netherlands, European Association of Geochemistry, 127 p.

ANEXOS

ANEXO 1. DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA DAS AMOSTRAS COLETADAS.

SUPERGRUPO MINAS, QF:

Tabela 1. Relação das amostras coletadas no depósito de Alegria (AL).

Amostra	Descrição	Rocha
AL01	Rocha dobrada, bandada, de granulação fina, com bandas brancas (quartzo) e cinzas (hematita). Bandas centimétricas a milimétricas.	Itabirito quartzoso
AL02	Rocha friável escura acinzentada com partes avermelhadas indicando a presença de hidróxidos de ferro. Composta principalmente por hematita de granulação fina a grossa. Brechada com matriz predominantemente de hematita e hidróxido de ferro e os clastos de hematita microlamelar.	Minério friável e brechado
AL03	Rocha escura acinzentada com partes avermelhadas indicando a presença de hidróxidos de ferro. Composta principalmente por hematita de granulação média, especular e apresenta foliação. É possível ver na amostra de mão grãos milimétricos de quartzo acompanhando a foliação da rocha.	Minério xistoso
AL04	Quartzo leitoso apresentando hematita preenchendo as fraturas.	Veio de quartzo
AL05	Rocha de cor escura (cinza avermelhada), com grãos finos a médios predominantemente de hematita granular e micro lamelar e com evidências de alteração (presença de hidróxidos de ferro). Possui bandamento preservado e é brechada com a matriz constituída principalmente de hematita granular e hidróxidos e os clastos de hematita microlamelar.	Minério friável e brechado
AL06	Rocha escura acinzentada composta principalmente por hematita de granulação média, especular. Apresenta foliação. É possível ver na amostra de mão grãos milimétricos de quartzo acompanhando a foliação da rocha. Possui regiões avermelhadas indicando alteração do óxido (goethita).	Minério xistoso
AL07	Rocha de granulação fina a grossa. Coloração escura, cinza avermelhada indicando a presença de óxidos de ferro e alteração destes para hidróxidos. Possui porosidade com cristais grandes de quartzo preenchendo estes poros. Possui também especularita de grão grosso em sua superfície preenchendo plano de fratura da rocha.	Minério compacto
AL08	Amostra apresentando duas partes distintas: i) Rocha de granulação média, equigranular, de cor acinzentada com bandamento incipiente. Composta por quartzo e óxido de ferro. ii) Bandas centimétricas a milimétricas compostas predominantemente por quartzo e magnetita. A banda mais espessa (no meio da amostra) é aparentemente uma brecha onde a matriz possui grãos médios e prismáticos, de quartzo orientados e grãos centimétricos de magnetita. As demais bandas, milimétricas também são constituídas de quartzo e magnetita de grãos mais finos. O Contato entre as duas partes é brusco e caracterizado por uma faixa preta fortemente magnética (magnetita).	Quartzo itabirito com brecha
AL09	Rocha com bandamento incipiente com bandas milimétricas de quartzo e óxido de ferro. Sendo predominante o óxido. Algumas bandas de óxido possuem magnetismo indicando a presença de magnetita. Uma banda de aproximadamente 1 centímetro de quartzo leitoso de grão mais grosso que as demais bandas deste mineral. Nesta banda alguns cristais de óxidos podem ser vistos disseminados.	Transição entre quartzo itabirito e minério
AL10	Rocha bandada de granulação fina sendo as bandas de quartzo e hematita microlamelar.	Itabirito quartzoso

Tabela 2. Relação das amostras coletadas no depósito de Catas Altas (CA).

Amostra	Descrição	Rocha
CA01	Veio de quartzo-especularita cortando o minério. Possui especularita associada. Muito fraturado.	Veio de quartzo com especularita
CA02	Rocha cinza escuro de granulação fina, composta principalmente por óxido de ferro. Bandamento incipiente com poucas bandas de quartzo. Em contato com veio de quartzo-especularita.	Minério compacto
CA03	Veio de quartzo-especularita cortando o minério. Os cristais de especularita chegam a ser centimétricos.	Veio de quartzo com especularita
CA04	Rocha compacta, cinza escura, de granulação muito fina e não apresenta magnetismo. Grãos grossos de hematita especular preenchendo plano de fratura na rocha.	Minério compacto com especularita associada
CA05	Hematita especular com quartzo preenchendo plano de fratura no minério.	Especularita em plano de fratura do minério compacto
CA06	Rocha compacta, cinza escura, de granulação muito fina e não apresenta magnetismo. Grãos grossos de hematita especular preenchendo plano de fratura na rocha.	Minério compacto com especularita associada

Tabela 3. Relação das amostras coletadas no depósito de Esperança (ES).

Amostra	Descrição	Rocha
ES01	Rocha de cor cinza escura, de granulação muito fina, apresentando foliação incipiente. Cortada por quartzo muito fraturado (brechado) contendo cristais de óxido de ferro e carbonato (HCl positivo). Fracamente magnética. Furo de sondagem F24 – Profundidade 138 m.	Filito carbonoso
ES02	Rocha de granulação fina e bandada, com bandas avermelhadas (dolomita) e escuras (óxido de ferro). Cortada por um veio discordante com o bandamento composto de carbonato (calcita + dolomita), quartzo e especularita. Na parede do veio predomina calcita e na região interna dolomita, o quartzo é leitoso e está mais associado a especularita e a especularita cristaliza perpendicular a parede do veio. Aparente alteração hidrotermal onde as bandas da rocha parecem continuar para dentro do veio. Furo de sondagem F24 – Profundidade 248 m.	Itabirito dolomítico cortado por veio de quartzo-carbonato-especularita
ES03	Amostra de cor escura, preta a avermelhada; granulação fina; muito porosa com bandamento incipiente e alguns cristais grossos de hematita (brechada). Furo de sondagem F24 – Profundidade 19 m.	Minério friável e brechado
ES06	Rocha compacta de cor cinza escuro, granulação fina a média, fraturada e fortemente magnética. Localmente apresenta grãos mais grossos de especularita disseminados e um veio de especularita cortando a rocha. Furo de sondagem F24 – Profundidade 70 m.	Minério compacto com especularita hidrotermal
ES07	Rocha bandada de granulação fina. As bandas são brancas (<i>chert</i>) e cinzas (óxido de ferro). Apresenta uma dobra e fraturas e veios de quartzo cortando a dobra. Possui veios milimétricos de um mineral macio preenchendo fraturas, possivelmente talco. Furo de sondagem F24 – Profundidade 297 m.	Itabirito quartzoso
ES08	Rocha bandada com bandas vermelhas (carbonato) e escuras (óxido de ferro), granulação fina e apresenta magnetismo nas bandas escuras mais espessas. Possui um veio fino (menos de meio cm) cortando o bandamento com sinais de substituição/reacção da rocha original pelo fluido. O veio é composto predominantemente de carbonato (calcita) e especularita com algum quartzo. Apresenta também veios milimétricos de carbonato. Furo de sondagem F24 – Profundidade 249 m.	Itabirito dolomítico cortado por veio de quartzo-carbonato-especularita
ES09	Rocha compacta de granulação fina fortemente magnética, composta predominantemente por óxido de ferro. Cortada por veio hidrotermal de quartzo com especularita.	Minério compacto cortado por veio de quartzo e especularita

Tabela 4. Relação das amostras coletadas na Mina Pau Branco (PB).

Amostra	Descrição	Rocha
PB03	Rocha escura, preto avermelhada com especularita centimétrica. Composta basicamente de hematita e hidróxido (goetita). Muito porosa brechada e fraturada. A especularita em lentes dentro da rocha. Possui grãos médios a finos de quartzo.	Minério compacto com lentes de especularita
PB04	Veio de quartzo-especularita cortando o minério com, uma parte avermelhada de hidróxido de ferro.	Veio de quartzo com especularita
PB05	Amostra escura, preto avermelhada, de granulação fina composta de hematita e com sinais de alteração para hidróxido (goethita). Fracamente magnética e cristais bem desenvolvidos de especularita ocorrem como lentes dentro da rocha. E cristais menores deste mineral na região com mais goethita.	Minério compacto com lentes de especularita
PB06	Veio de quartzo com especularita cortando o minério. Oxido de ferro não apresenta magnetismo. O quartzo apresenta-se prismático e orientado e os cristais de especularita estão também orientados no mesmo sentido.	Veio de quartzo com especularita
PB07	Cristais centimétricos de especularita associada ao minério.	Especularita
PB08	Cristais de especularita e quartzo de veios que cortam o minério friável.	Especularita e quartzo de veio

Tabela 5. Descrição da amostra coletada próximo a Mina da Mutuca (MT).

Amostra	Descrição	Rocha
MT01	Veio de quartzo com especularita cortando o itabirito.	Veio de quartzo com especularita

Tabela 6. Descrição da amostra coletada na Mina de Fábrica (FB).

Amostra	Descrição	Rocha
FB01	Grãos de especularita e quartzo de veio em FF.	Especularita

GRUPO SERRA DA SERPENTINA, SEM:**Tabela 7.** Descrição da amostra coletadas nas regiões de Morro do Pilar (MP), Conceição do Mato Dentro (CM) e Serro (SR).

Amostra	Descrição	Rocha
MP01	Veio de quartzo com poucos cristais de especularita. Corta o milonito.	Veio de quartzo com especularita
MP02	Veio de quartzo leitoso cortando o itabirito.	Veio de quartzo
MP03	Grãos grossos de hematita especular de um veio de quartzo que corta o minério. A amostragem foi feita somente da especularita, poucos grãos de quartzo podem ser vistos.	Veio de quartzo com especularita
MP04	Veio de quartzo com cristais grossos de especularita. Muito fraturado e sinais de alteração. Corta o minério de ferro.	Veio de quartzo com especularita
MP05	Minério de ferro com grãos finos de hematita, cortado por veio de quartzo e especularita de grãos centimétricos.	Minério xistoso
MP06	Rocha de granulação média com cristais de hematita microlamelar finos. Preserva sinais de bandamento e relictos de bandas quartzosas. Muito friável provavelmente por ações supergênicas e/ou intempéricas.	Minério xistoso
MP07	Rocha de granulação média com cristais de hematita lamelar finos. Preserva sinais de bandamento e relictos de bandas quartzosas.	Minério compacto
MP08	Rocha de granulação fina composta predominantemente de hematita lamelar de grão fino a médio, bandamento fracamente preservado. Muito friável e localmente apresenta cristais grandes de hematita especular.	Minério friável
MP09	Rocha de granulação fina composta predominantemente de hematita granular e micro lamelar, bandamento preservado. Rocha dura e apresenta especularita de grão médio a grosso preenchendo suas zonas de fraqueza (bandamento).	Minério compacto
CM01	Rocha de granulação fina composta de hematita e com relictos de quartzo. Cortada por veios de quartzo com especularita boudinados.	Minério xistoso
CM02	Veios de quartzo com especularita cortando o minério.	Veio de quartzo com especularita
SR01	Rocha bandada com bandas milimétricas de quartzo e hematita. Possui em bandas escuras especularita de grão grosso. Furo de sondagem 97 – Profundidade 26,6 m	Itabirito quartzoso
FE01	Rocha de porosa, de granulação média, cor cinza composta de óxidos de ferro predominantemente hematita especular. Não apresenta magnetismo e possui poucos cristais de quartzo. As especularitas estão bem orientadas marcando a existência de uma foliação.	Minério xistoso

DEPÓSITOS DO TIPO JACUTINGA:**Tabela 8.** Descrição da amostra coletadas nas regiões de Antônio Pereira (AP), Cocais próximo a Mina de Brucutu (BC), Itabira (IT), Conceição (JA) e Gongo Soco (GS). Todas associadas à mineralização de Au-PGE.

AP01	Veio de quartzo.	Veio de quartzo
BC01	Veio de quartzo com cristais grandes especularita cortando a zona de cisalhamento.	Veio de quartzo com especularita
BC02	Rocha de granulação fina e cor cinza escuro, preservando o bandamento contendo hematita micro lamelar como mineral principal e sinais de oxidação (goethita). Apresenta em alguns planos cristais grandes de especularita. Rocha truncando o cisalhamento.	Rocha ferrífera
BC03	Rocha de granulação fina e cor cinza escuro, preservando o bandamento contendo hematita micro lamelar como mineral principal e sinais de oxidação (goethita). Apresenta em alguns planos cristais grandes de especularita. Rocha truncando o cisalhamento.	Rocha ferrífera
BC04	Veio de quartzo leitoso cortando a zona de cisalhamento próximo ao contato com o minério compacto.	Veio de quartzo
BC05	Veio de quartzo leitoso cortando a zona de cisalhamento. Contem cristais grandes de especularita associados.	Veio de quartzo com especularita
BC06	Rocha de coloração cinza avermelhada e granulação fina. Com bandamento preservado. Localizada no contato com a zona de cisalhamento. Apresenta forte magnetismo.	Hematita-magnetitito
BC07	Veio de quartzo com cristais grandes de especularita cortando o itabirito.	Veio de quartzo com especularita
BC08	Veio de quartzo com cristais grandes de especularita cortando o itabirito.	Veio de quartzo com especularita
BC09	Veio de quartzo com cristais grandes de especularita cortando o itabirito.	Veio de quartzo com especularita
IT01	Grãos de especularita e quartzo associados à Jacutinga.	Especularita
JA01	Amostra muito friável de coloração cinza claro contendo predominantemente hematita microlamelar (especularita) e caulinita. Possui também goetita e quartzo associado.	Jacutinga
GS01	Trata-se de fragmento de veio de quartzo com Au visível. Tais veios cortam o Itabirito. O fragmento foi recuperado na planta de minério de ferro (concentrador gravimétrico Knelson). Possui pequenos cristais de especularita.	Veio de quartzo

ANEXO 2. RESULTADOS DAS ANÁLISES DE LA-ICP-MS NAS GERAÇÕES DE ÓXIDO DE FERRO, DEPÓSITO DE ESPERANÇA

Quantitative data obtained for BHVO-2G reference material for quality control during the LA-ICP-MS analyses of iron oxides from Esperança Deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil.

Element	BHVO-2 (obtained)				Gao <i>et al.</i> (2002)			coefficients of variation (CV %)	Tolerance of CV (%)	
	Median	Mean	s	N	Value	s	N			
Li ⁷	4.62	4.64	0.40	9	5.00	0.40	26	93%	80%	120%
Na ²³	16211	15680	1456	9	17672	443	29	89%	80%	120%
Mg ²⁶	45094	45037	2161	9	42682	1071	25	106%	80%	120%
Al ²⁷	84134	82183	8367	9	71974	529	25	114%	80%	120%
Si ²⁹	278845	283269	24434	9	230460	467	EPMA ⁽¹⁾	123%*	80%	120%
P ³¹	1157	1225	142	9	1266	87	EPMA ⁽¹⁾	97%	80%	120%
Ti ⁴⁹	17573	17555	1152	9	15621	453	53	112%	80%	120%
V ⁵¹	353	354	14	9	329	9	42	108%	80%	120%
Cr ⁵³	310	308	13	9	285	14	51	108%	80%	120%
Mn ⁵⁵	1355	1394	105	9	1345	25	22	104%	80%	120%
Fe ⁵⁷	87836	87836	0	9	87836	777	EPMA ⁽¹⁾	100%	80%	120%
Co ⁵⁹	47.1	47.2	3.0	9	47.0	2.0	53	100%	80%	120%
Ni ⁶⁰	123	121	13	9	112	9	48	108%	80%	120%
Cu ⁶³	125	123	11	9	142	10	52	87%	80%	120%
Zn ⁶⁶	113	114	7	9	107	26	36	106%	80%	120%
Ga ⁷¹	22.0	21.9	1.6	9	21.0	1.0	44	104%	80%	120%
As ⁷⁵	0.84	0.87	0.18	7	n.d				80%	120%
Sr ⁸⁸	411	429	46	9	382	10	53	112%	80%	120%
Y ⁸⁹	23.9	23.9	2.6	9	23.0	1.0	57	104%	80%	120%
Zr ⁹⁰	173	167	24	9	160	8.0	56	104%	80%	120%
Nb ⁹³	17.8	19.3	2.4	9	16.4	0.7	56	118%	80%	120%
Mo ⁹⁵	4.43	4.22	0.50	9	n.d				80%	120%
Sb ¹²¹	0.12	0.12	0.06	6	0.21	0.04	10	56%**	80%	120%
Cs ¹³³	0.09	0.09	0.01	9	0.11	0.02	29	86%	80%	120%
Ba ¹³⁷	132	133	9	9	128	4	56	104%	80%	120%
La ¹³⁹	17.0	17.1	2.1	9	15.6	0.6	38	109%	80%	120%
Ce ¹⁴⁰	40.8	41.4	3.2	9	37.0	1.0	32	112%	80%	120%
Pr ¹⁴¹	5.47	5.63	0.49	9	5.00	0.30	33	113%	80%	120%
Nd ¹⁴⁴	23.4	23.3	2.3	9	24.0	1.0	32	97%	80%	120%
Sm ¹⁴⁷	6.57	6.44	0.79	9	5.80	0.50	32	111%	80%	120%
Eu ¹⁵³	2.29	2.30	0.14	9	2.00	0.10	28	115%	80%	120%
Gd ¹⁵⁶	6.17	6.16	0.84	9	5.90	0.40	30	104%	80%	120%
Tb ¹⁵⁹	0.91	0.91	0.08	9	0.86	0.06	31	105%	80%	120%
Dy ¹⁶¹	5.28	5.10	0.54	9	4.90	0.40	33	104%	80%	120%
Ho ¹⁶⁵	1.00	0.99	0.12	9	0.91	0.06	32	108%	80%	120%
Er ¹⁶⁶	2.38	2.31	0.30	9	2.30	0.20	28	101%	80%	120%
Tm ¹⁶⁹	0.31	0.30	0.02	9	0.30	0.05	32	101%	80%	120%
Yb ¹⁷³	2.11	2.01	0.29	9	2.00	0.20	30	101%	80%	120%
Lu ¹⁷⁵	0.28	0.27	0.03	9	0.26	0.04	29	103%	80%	120%
Pb ²⁰⁸	1.89	1.92	0.26	9	1.40	0.20	43	137%*	80%	120%
Bi ²⁰⁹	0.02	0.02	0.01	6	n.d				80%	120%
Th ²³²	1.27	1.27	0.15	9	1.18	0.09	48	107%	80%	120%
U ²³⁸	0.45	0.47	0.06	9	0.44	0.03	42	107%	80%	120%

EPMA⁽¹⁾: Electron Probe Micro-Analyser - GEOREM (2014); *probably this isotope needs more data to improve the results; **< QL (quantitation limit). CV (%) = (obtained value/Gao *et al.* (2002) value) * 100. CV: coefficients of variation; n: number of analysis; s: standard deviation; <LD: not detected.

Results obtained for BHVO-2G reference material for quality control during the LA-ICP-MS analyses of iron oxides from Esperança Deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil.

Element	HIO1		HIO2			DI			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Li ⁷	4.32	4.98	4.62	4.15	5.10	4.51	5.08	4.07	4.89
Na ²³	12711	15030	16920	16210	16251	16491	17554	15425	14521
Mg ²⁶	42799	48433	45094	43572	42728	45286	47115	47264	43038
Al ²⁷	71646	87946	85042	84133	83598	90131	93355	70833	72957
Si ²⁹	284253	313726	262238	258036	265656	297545	278845	263095	326014
P ³¹	1349	1469	1094	1082	1116	1119	1157	1278	1360
Ti ⁴⁹	16011	18881	17134	17572	16862	18660	18345	15885	18645
V ⁵¹	330	362	357	361	353	344	346	348	381
Cr ⁵³	290	333	315	311	316	300	295	310	299
Mn ⁵⁵	1538	1595	1386	1355	1325	1297	1408	1327	1308
Fe ⁵⁷	87836	87836	87836	87836	87836	87836	87836	87836	87836
Co ⁵⁹	47.1	52.9	49.2	48.7	46.8	45.6	47.9	42.2	44.5
Ni ⁶⁰	103	132	132	134	126	122	118	115	100
Cu ⁶³	104	115	127	125	122	140	130	129	110
Zn ⁶⁶	115	112	121	110	114	113	100	127	108
Ga ⁷¹	19.6	22.0	24.6	22.7	22.6	22.8	21.6	21.8	19.6
As ⁷⁵	1.06	<0.64	0.84	0.59	1.13	0.78	0.91	<0.77	0.76
Sr ⁸⁸	408	528	410	406	400	385	412	424	480
Y ⁸⁹	21.2	24.6	23.8	25.0	23.8	25.7	27.7	18.8	23.8
Zr ⁹⁰	135	154	172	179	174	190	201	131	159
Nb ⁹³	17.3	22.8	17.8	17.6	17.0	22.0	22.1	17.3	19.6
Mo ⁹⁵	3.10	4.55	4.43	4.51	3.76	4.35	4.61	4.12	4.58
Sb ¹²¹	<0.119	<0.129	0.06	0.14	0.06	0.10	0.14	<0.119	0.21
Cs ¹³³	0.09	0.12	0.09	0.09	0.09	0.11	0.09	0.08	0.09
Ba ¹³⁷	126	153	134	128	133	136	131	122	131
La ¹³⁹	17.0	21.5	17.4	17.6	17.3	16.1	16.5	13.6	16.3
Ce ¹⁴⁰	41.0	49.3	39.6	39.6	40.7	38.6	39.2	42.1	41.9
Pr ¹⁴¹	5.47	6.82	5.38	5.28	5.36	5.52	5.89	5.28	5.64
Nd ¹⁴⁴	20.7	26.3	25.0	23.3	22.8	24.3	24.8	18.9	23.3
Sm ¹⁴⁷	5.81	7.76	6.60	6.57	6.40	6.88	6.51	4.85	6.60
Eu ¹⁵³	2.43	2.54	2.29	2.31	2.42	2.12	2.27	2.10	2.26
Gd ¹⁵⁶	5.02	7.46	6.21	6.17	6.09	7.10	6.63	5.01	5.74
Tb ¹⁵⁹	0.87	0.77	0.99	0.96	0.91	0.97	0.97	0.79	0.91
Dy ¹⁶¹	4.09	5.48	5.14	5.29	5.67	5.28	5.65	4.58	4.69
Ho ¹⁶⁵	0.84	1.21	0.97	1.00	1.03	1.02	1.06	0.81	0.93
Er ¹⁶⁶	2.14	2.27	2.46	2.38	2.42	2.58	2.76	1.72	2.09
Tm ¹⁶⁹	0.26	0.28	0.32	0.31	0.31	0.33	0.33	0.29	0.29
Yb ¹⁷³	2.11	2.20	2.04	2.17	1.95	2.34	2.20	1.58	1.51
Lu ¹⁷⁵	0.23	0.26	0.29	0.29	0.30	0.30	0.28	0.23	0.24
Pb ²⁰⁸	1.89	1.82	1.89	1.68	1.73	1.89	1.69	2.41	2.32
Bi ²⁰⁹	0.05	<0.024	0.02	0.01	<0.0096	0.02	0.03	<0.033	0.03
Th ²³²	1.06	1.42	1.27	1.33	1.27	1.51	1.25	1.06	1.22
U ²³⁸	0.45	0.61	0.47	0.45	0.44	0.50	0.51	0.42	0.41

*All values in ppm.

HIO1: high-grade iron ore 1; HIO2: high-grade iron ore 2; DI: dolomitic itabirite.

Results of statistics calculations for the detection limit of the trace elements obtained by LA-ICPMS during analyzes of iron oxides from dolomitic itabirite and high-grade iron ore from Esperança Deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil.

Element	Detection Limit obtained				DL	QL
	Median	Mean	s	N		
Li ⁷	0.36	0.41	0.22	33	0.41	1.35
Na ²³	0.43	0.44	0.22	38	0.44	1.47
Mg ²⁶	3.18	3.39	1.67	38	3.39	11.3
Al ²⁷	0.67	0.70	0.33	38	0.70	2.33
Si ²⁹	179	187	88	38	187	623
P ³¹	11.3	12.0	5.68	38	12.0	39.9
Ti ⁴⁹	0.70	0.79	0.39	29	0.79	2.62
V ⁵¹	0.10	0.11	0.05	38	0.11	0.35
Cr ⁵³	1.43	1.45	0.67	38	1.45	4.82
Mn ⁵⁵	0.30	0.30	0.14	38	0.30	1.00
Fe ⁵⁷	8.21	8.73	4.31	38	8.73	29.07
Co ⁵⁹	0.06	0.06	0.03	22	0.06	0.20
Ni ⁶⁰	0.24	0.25	0.12	23	0.25	0.82
Cu ⁶³	0.10	0.11	0.06	31	0.11	0.37
Zn ⁶⁶	0.50	0.50	0.20	38	0.50	1.66
Ga ⁷¹	0.07	0.07	0.03	28	0.07	0.25
As ⁷⁵	0.39	0.42	0.19	38	0.42	1.39
Sr ⁸⁸	0.01	0.01	0.01	23	0.01	0.05
Y ⁸⁹	0.01	0.02	0.01	16	0.02	0.05
Zr ⁹⁰	0.03	0.03	0.02	18	0.03	0.11
Nb ⁹³	0.02	0.02	0.02	25	0.02	0.08
Mo ⁹⁵	0.10	0.10	0.04	19	0.10	0.32
Sb ¹²¹	0.05	0.05	0.03	27	0.05	0.18
Cs ¹³³	0.02	0.02	0.01	37	0.02	0.08
Ba ¹³⁷	0.09	0.10	0.06	15	0.10	0.33
La ¹³⁹	0.01	0.01	0.00	33	0.01	0.02
Ce ¹⁴⁰	0.01	0.01	0.00	31	0.01	0.02
Pr ¹⁴¹	0.01	0.01	0.00	27	0.01	0.02
Nd ¹⁴⁴	0.03	0.03	0.02	25	0.03	0.10
Sm ¹⁴⁷	0.05	0.05	0.03	28	0.05	0.17
Eu ¹⁵³	0.01	0.01	0.01	26	0.01	0.05
Gd ¹⁵⁶	0.04	0.05	0.03	26	0.05	0.18
Tb ¹⁵⁹	0.01	0.01	0.00	32	0.01	0.03
Dy ¹⁶¹	0.04	0.04	0.02	29	0.04	0.14
Ho ¹⁶⁵	0.01	0.01	0.00	22	0.01	0.03
Er ¹⁶⁶	0.02	0.02	0.01	29	0.02	0.07
Tm ¹⁶⁹	0.01	0.01	0.00	26	0.01	0.03
Yb ¹⁷³	0.05	0.05	0.03	23	0.05	0.17
Lu ¹⁷⁵	0.01	0.01	0.01	24	0.01	0.03
Pb ²⁰⁸	0.03	0.03	0.02	30	0.03	0.11
Bi ²⁰⁹	0.02	0.02	0.01	19	0.02	0.07
Th ²³²	0.02	0.02	0.01	18	0.02	0.08
U ²³⁸	0.02	0.02	0.01	15	0.02	0.07

Median: central number of a set (ppm); Mean: average (ppm); s: standard deviation; n: number of analysis; DL: detection limit of 99% of CL (~ 3 s); QL: quantitation limit of 99% CL (~ 10 s or 3.33 DL); CL: confidence limit.

Results of trace elements by LA-ICP-MS of iron oxide generations from dolomitic itabirite and high grade iron ore from Esperança deposit. Quadrilátero Ferrífero, with their respective standard deviation (s) and relative standard deviation (rsd).

Sample	DI											
	gHmA-1			gHmA-2			gHmA-3			gHmA-4		
	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd
Li7	5.10	0.94	18%	1.88	0.47	25%	2.70	0.63	23%	2.38	0.58	24%
Na23	64.2	2.6	4%	58.6	2.3	4%	46.3	1.9	4%	51.9	2.2	4%
Mg26	71273	2518	4%	11294	402	4%	30545	1083	4%	44422	1575	4%
Al27	398	17	4%	450	19.1	4%	268	11.8	4%	97.5	4.7	5%
Si29	1667	202	12%	1320	132	10%	1255	172	14%	1246	182	15%
P31	<21.7			<10.3			<18.9			<23.3		
Ti49	397	17	4%	210	9	5%	262	11.8	5%	294	13	4%
V51	19.2	0.8	4%	22.3	0.9	4%	23.2	0.97	4%	26.4	1.0	4%
Cr53	102	5	5%	95.1	4.1	4%	106	4.68	4%	97.2	4.4	5%
Mn55	5885	181	3%	955	29.6	3%	2305	71.2	3%	3746	115	3%
Fe57	699035	22139	3%	699035	22131	3%	699035	22136	3%	699035	22138	3%
Co59	2.88	0.26	9%	7.78	0.43	6%	4.70	0.33	7%	4.38	0.33	8%
Ni60	4.06	0.68	17%	17.6	1.3	7%	13.1	1.17	9%	11.0	1.11	10%
Cu63	1.07	0.24	22%	0.90	0.19	21%	2.48	0.34	14%	3.22	0.38	12%
Zn66	2.57	0.64	25%	2.55	0.56	22%	5.09	0.79	16%	4.05	0.72	18%
Ga71	0.58	0.13	22%	0.93	0.15	16%	0.91	0.16	18%	1.16	0.18	16%
As75	15.3	1.2	8%	19.4	1.2	6%	22.5	1.5	7%	26.2	1.7	6%
Sr88	40.8	1.3	3%	11.1	0.41	4%	27.0	0.9	3%	35.1	1.2	3%
Y89	8.56	0.37	4%	1.45	0.10	7%	3.02	0.17	6%	4.20	0.22	5%
Zr90	9.27	0.48	5%	4.49	0.27	6%	1.24	0.15	12%	8.29	0.44	5%
Nb93	0.80	0.10	13%	0.58	0.07	12%	0.68	0.09	13%	0.80	0.10	12%
Mo95	0.29	0.13	45%	0.14	0.09	65%	0.26	0.12	46%	0.39	0.15	38%
Sb121	0.93	0.16	17%	1.29	0.15	12%	1.43	0.18	13%	2.02	0.22	11%
Cs133	0.05	0.02	51%	0.07	0.02	31%	0.07	0.02	36%	0.06	0.03	44%
Ba137	2.24	0.36	16%	4.53	0.44	10%	4.11	0.45	11%	2.60	0.37	14%
La139	1.37	0.07	5%	1.05	0.05	5%	1.16	0.06	5%	1.29	0.07	5%
Ce140	2.39	0.10	4%	1.48	0.07	5%	1.71	0.08	5%	2.35	0.10	4%
Pr141	0.28	0.03	11%	0.12	0.02	14%	0.22	0.03	11%	0.32	0.03	10%
Nd144	0.93	0.11	12%	0.63	0.08	12%	0.88	0.10	11%	1.00	0.11	11%
Sm147	0.19	0.06	33%	0.16	0.05	33%	0.17	0.06	38%	0.20	0.06	32%
Eu153	0.17	0.03	19%	0.03	0.01	45%	0.05	0.02	39%	0.14	0.03	20%
Gd156	0.48	0.11	23%	0.13	0.04	33%	0.24	0.08	32%	0.31	0.09	28%
Tb159	0.09	0.02	21%	0.01	0.01	49%	0.04	0.01	28%	0.04	0.01	34%
Dy161	0.72	0.12	17%	0.13	0.05	35%	0.11	0.05	45%	0.39	0.09	23%
Ho165	0.16	0.03	16%	0.02	0.01	38%	0.04	0.01	31%	0.08	0.02	22%
Er166	0.68	0.07	11%	0.12	0.03	21%	0.22	0.04	20%	0.35	0.05	15%
Tm169	0.08	0.02	24%	0.02	0.01	37%	0.06	0.01	23%	0.05	0.02	28%
Yb173	0.53	0.11	21%	<0.056			0.26	0.07	28%	0.21	0.08	36%
Lu175	0.11	0.02	21%	0.02	0.01	42%	0.04	0.01	33%	0.05	0.02	30%
Pb208	1.33	0.15	11%	1.32	0.13	10%	1.48	0.15	10%	1.59	0.16	10%
Bi209	0.07	0.03	38%	0.06	0.03	42%	0.06	0.02	41%	0.06	0.03	50%
Th232	0.96	0.11	11%	0.98	0.10	10%	0.62	0.08	14%	0.99	0.11	11%
U238	6.11	0.31	5%	7.49	0.33	4%	7.57	0.35	5%	8.45	0.38	4%

Value = ppm; s = standard deviation (ppm); rsd = relative standard deviation (%)

Results of trace elements by LA-ICP-MS of iron oxide generations from dolomitic itabirite and high grade iron ore from Esperança deposit. Quadrilátero Ferrífero, with their respective standard deviation (s) and relative standard deviation (rsd).

Sample	DI			HIO1						HIO2			
	gHmA-5			gHmB-1			gHmB-2			gHmB-3			
	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd	
Li7	3.41	0.60	18%	1.02	0.39	38%	<0.56				8.28	0.90	11%
Na23	67.0	2.5	4%	46.9	2.5	5%	25.0	1.3	6%	15.2	1.0	7%	
Mg26	912	35	4%	72.8	8.9	12%	165	17.7	11%	99.8	8.4	8%	
Al27	274	11	4%	498	75	15%	369	56	15%	248	14	6%	
Si29	1224	127	10%	862	156	18%	884	140	16%	933	95	10%	
P31	<11.43			<11.77			9.58	4.68	49%	192	38	20%	
Ti49	396	15	4%	59.5	6.0	10%	85.7	7.5	9%	47.4	5.1	11%	
V51	50.9	1.7	3%	32.2	1.4	5%	23.7	1.0	5%	46.9	2.2	5%	
Cr53	78.2	3.3	4%	112	5.6	5%	88.8	4.2	5%	81.1	4.8	6%	
Mn55	337	10	3%	342	10.	3%	159	5	3%	103	7	7%	
Fe57	699035	22126	3%	699035	2213	3%	699036	22122	3%	699035	22113	3%	
Co59	0.82	0.11	13%	17.63	1.48	8%	6.04	0.53	9%	0.69	0.08	12%	
Ni60	2.20	0.38	17%	40.49	2.37	6%	15.94	1.07	7%	2.08	0.29	14%	
Cu63	2.98	0.30	10%	0.95	0.23	24%	0.94	0.18	19%	37.05	3.51	9%	
Zn66	6.90	0.75	11%	5.39	1.01	19%	3.49	0.65	19%	1.70	0.29	17%	
Ga71	0.48	0.09	19%	1.27	0.22	17%	0.92	0.15	16%	0.64	0.09	15%	
As75	18.0	1.1	6%	15.7	1.9	12%	11.0	1.3	12%	22.9	2.1	9%	
Sr88	1.07	0.08	7%	2.11	0.14	7%	0.68	0.06	8%	1.84	0.19	10%	
Y89	1.49	0.10	7%	2.36	0.18	8%	0.90	0.08	8%	2.33	0.23	10%	
Zr90	11.0	0.5	4%	5.43	0.37	7%	1.59	0.14	9%	0.62	0.08	12%	
Nb93	1.50	0.11	7%	0.29	0.05	18%	0.60	0.06	10%	0.23	0.03	13%	
Mo95	0.40	0.12	30%	1.66	0.31	19%	0.57	0.14	25%	6.55	0.73	11%	
Sb121	0.99	0.12	12%	2.45	0.22	9%	1.36	0.12	9%	2.69	0.22	8%	
Cs133	0.06	0.02	35%	0.23	0.04	15%	0.14	0.02	16%	0.05	0.01	22%	
Ba137	13.3	0.7	6%	4.71	0.47	10%	2.16	0.24	11%	1.17	0.17	15%	
La139	1.50	0.06	4%	0.55	0.04	7%	0.39	0.03	7%	2.43	0.23	9%	
Ce140	2.01	0.08	4%	3.20	0.21	7%	1.14	0.08	7%	5.35	0.42	8%	
Pr141	0.23	0.02	9%	0.24	0.04	17%	0.15	0.03	17%	0.59	0.06	10%	
Nd144	0.52	0.06	12%	1.41	0.13	9%	0.47	0.06	12%	2.15	0.18	8%	
Sm147	0.11	0.05	42%	0.23	0.07	29%	0.18	0.05	26%	0.62	0.08	12%	
Eu153	0.05	0.02	28%	0.08	0.02	28%	0.05	0.01	26%	0.14	0.02	16%	
Gd156	0.12	0.04	35%	0.36	0.08	23%	0.10	0.04	37%	0.59	0.07	12%	
Tb159	0.02	0.01	40%	0.05	0.01	28%	0.03	0.01	28%	0.08	0.01	15%	
Dy161	0.18	0.05	29%	0.43	0.09	20%	0.12	0.04	31%	0.51	0.07	14%	
Ho165	0.04	0.01	24%	0.10	0.02	20%	0.04	0.01	24%	0.09	0.01	13%	
Er166	0.17	0.03	17%	0.27	0.04	16%	0.15	0.02	16%	0.22	0.02	11%	
Tm169	0.01	0.01	59%	0.06	0.01	25%	0.02	0.01	36%	0.04	0.01	17%	
Yb173	0.10	0.04	38%	0.38	0.09	24%	0.22	0.05	25%	0.29	0.05	16%	
Lu175	0.02	0.01	36%	0.07	0.02	24%	0.03	0.01	27%	0.05	0.01	16%	
Pb208	1.29	0.12	9%	5.04	0.29	6%	3.63	0.19	5%	5.67	0.49	9%	
Bi209	0.07	0.02	31%	0.31	0.05	16%	0.09	0.02	24%	1.33	0.10	7%	
Th232	0.83	0.08	10%	1.28	0.16	13%	0.61	0.08	13%	0.16	0.02	14%	
U238	12.6	0.48	4%	4.54	0.24	5%	3.22	0.16	5%	5.34	0.41	8%	

Results of trace elements by LA-ICP-MS of iron oxide generations from dolomitic itabirite and high grade iron ore from Esperança deposit. Quadrilátero Ferrífero, with their respective standard deviation (s) and relative standard deviation (rsd).

Sample	HIO2									HIO1		
	gHmB-4			gHmB-5			gHmB-6			spH1A-1		
	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd
Li7	9.84	1.04	11%	0.82	0.21	26%	0.87	0.20	23%	<0.38		
Na23	17.4	1.1	7%	25.6	1.7	7%	16.1	1.1	7%	10.9	0.6	6%
Mg26	126	10	8%	138	12	9%	43.4	4.3	10%	28.1	3.7	13%
Al27	233	14	6%	582	36	6%	273	17	6%	184	27	15%
Si29	690	75	11%	2170	213	10%	1166	123	11%	<168		
P31	245	48.6	20%	21.4	5.3	25%	7.30	3.26	45%	<10.54		
Ti49	49.9	5.4	11%	76.8	8.7	11%	72.9	8.5	12%	211	17	8%
V51	41.6	2.0	5%	27.5	1.4	5%	33.1	1.7	5%	52.5	2.2	4%
Cr53	71.0	4.3	6%	79.0	5.0	6%	78.7	5.1	7%	87.4	4.1	5%
Mn55	99.9	6.8	7%	157	11.4	7%	108	8.1	8%	110	3.5	3%
Fe57	699035	22113	3%	699035	22115	3%	699035	22114	3%	699035	22120	3%
Co59	0.95	0.11	12%	7.37	0.71	10%	2.99	0.31	10%	0.15	0.04	26%
Ni60	2.28	0.31	14%	14.6	1.4	10%	1.82	0.28	15%	<0.27		
Cu63	63.0	6.0	10%	111	11	10%	99.2	10.3	10%	0.32	0.09	29%
Zn66	2.34	0.36	15%	4.74	0.62	13%	0.38	0.19	50%	1.96	0.43	22%
Ga71	0.49	0.08	16%	0.77	0.12	16%	0.79	0.12	15%	0.94	0.14	15%
As75	22.4	2.0	9%	23.7	2.3	10%	17.3	1.7	10%	2.64	0.42	16%
Sr88	1.93	0.21	11%	1.29	0.15	12%	0.76	0.09	12%	0.10	0.02	20%
Y89	2.79	0.27	10%	1.51	0.16	11%	0.98	0.11	11%	0.36	0.04	11%
Zr90	1.72	0.19	11%	1.50	0.18	12%	0.53	0.07	14%	1.08	0.10	9%
Nb93	0.24	0.03	13%	0.38	0.05	13%	0.28	0.04	13%	4.57	0.24	5%
Mo95	3.85	0.46	12%	0.93	0.16	17%	0.71	0.13	18%	0.38	0.11	29%
Sb121	2.86	0.24	8%	3.18	0.28	9%	2.39	0.22	9%	0.37	0.06	16%
Cs133	0.04	0.01	24%	0.05	0.01	27%	0.05	0.01	24%	0.07	0.01	19%
Ba137	0.98	0.15	15%	3.20	0.42	13%	1.35	0.21	16%	0.12	0.05	41%
La139	2.42	0.23	10%	1.01	0.10	10%	0.56	0.06	11%	0.15	0.01	10%
Ce140	6.06	0.48	8%	2.15	0.18	8%	1.30	0.11	8%	0.39	0.03	8%
Pr141	0.69	0.07	10%	0.24	0.03	11%	0.17	0.02	12%	0.04	0.01	23%
Nd144	2.62	0.22	8%	0.89	0.09	10%	0.41	0.05	12%	0.13	0.03	23%
Sm147	0.77	0.09	12%	0.31	0.05	17%	0.17	0.03	20%	0.03	0.02	58%
Eu153	0.15	0.02	15%	0.07	0.02	20%	0.05	0.01	22%	0.02	0.01	47%
Gd156	0.68	0.08	12%	0.28	0.05	17%	0.14	0.03	22%	0.05	0.02	51%
Tb159	0.12	0.02	14%	0.05	0.01	19%	0.03	0.01	23%	0.01	0.00	60%
Dy161	0.57	0.08	14%	0.19	0.04	20%	0.20	0.04	20%	0.06	0.02	36%
Ho165	0.11	0.01	12%	0.05	0.01	17%	0.05	0.01	16%	0.01	0.00	60%
Er166	0.25	0.03	10%	0.16	0.02	13%	0.14	0.02	14%	0.02	0.01	41%
Tm169	0.03	0.01	18%	0.02	0.01	23%	0.03	0.01	21%	<0.0111		
Yb173	0.24	0.04	17%	0.25	0.05	19%	0.17	0.04	21%	<0.060		
Lu175	0.06	0.01	16%	0.04	0.01	19%	0.03	0.01	21%	0.01	0.00	39%
Pb208	5.52	0.49	9%	15.95	1.45	9%	8.75	0.83	9%	0.57	0.06	11%
Bi209	1.52	0.11	7%	3.52	0.25	7%	3.30	0.24	7%	0.04	0.02	41%
Th232	0.22	0.03	13%	0.37	0.04	11%	0.26	0.03	12%	0.61	0.08	13%
U238	5.71	0.44	8%	4.90	0.40	8%	3.62	0.31	9%	1.37	0.09	6%

Value = ppm; s = standard deviation (ppm); rsd = relative standard deviation (%)

Results of trace elements by LA-ICP-MS of iron oxide generations from dolomitic itabirite and high grade iron ore from Esperança deposit. Quadrilátero Ferrífero, with their respective standard deviation (s) and relative standard deviation (rsd).

Sample	HIO1						HIO1					
	spH1A-2			spH1A-3			spH1B-1			spH1B-2		
	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd
Li7	<0.28			0.59	0.28	47%	<0.75			0.59	0.28	47%
Na23	1.83	0.23	13%	21.1	1.1	6%	32.7	1.7	5%	22.0	1.2	5%
Mg26	3.70	1.47	40%	5.65	1.61	28%	<3.73			<3.28		
Al27	125	19.0	15%	88.0	13.4	15%	62.5	9.5	15%	178	27	15%
Si29	<178			<164			<215			<170		
P31	<11.2			<10.0			<11.8			<10.1		
Ti49	289	23.3	8%	250	20.3	8%	455	36.4	8%	263	21	8%
V51	55.7	2.3	4%	48.8	2.0	4%	55.6	2.3	4%	53.0	2.2	4%
Cr53	87.9	4.1	5%	84.5	4.0	5%	91.4	4.4	5%	78.4	3.7	5%
Mn55	123	3.9	3%	105	3.4	3%	103	3.3	3%	107	3.4	3%
Fe57	699036	22121	3%	699035	22120	3%	699035	22124	3%	699035	22121	3%
Co59	0.08	0.03	36%	0.12	0.04	33%	0.09	0.05	50%	0.07	0.03	39%
Ni60	<0.34			<0.185			<0.34			<0.187		
Cu63	0.39	0.10	24%	0.27	0.08	28%	<0.089			0.18	0.07	37%
Zn66	<0.52			0.66	0.29	44%	0.52	0.24	46%	0.36	0.20	56%
Ga71	1.13	0.16	14%	1.01	0.15	15%	1.22	0.18	15%	1.00	0.15	15%
As75	<0.49			2.46	0.41	17%	0.96	0.30	31%	3.05	0.47	15%
Sr88	0.07	0.02	22%	0.16	0.02	15%	0.04	0.01	39%	0.38	0.04	10%
Y89	0.05	0.01	27%	0.13	0.02	18%	<0.019			0.03	0.01	38%
Zr90	0.45	0.06	14%	0.70	0.08	11%	1.13	0.11	10%	0.13	0.03	26%
Nb93	5.13	0.26	5%	5.39	0.27	5%	7.29	0.37	5%	1.44	0.10	7%
Mo95	0.10	0.05	51%	0.30	0.09	30%	<0.133			<0.104		
Sb121	0.26	0.05	20%	0.50	0.07	14%	0.10	0.03	33%	0.19	0.04	22%
Cs133	<0.025			0.09	0.02	20%	0.04	0.01	29%	0.10	0.02	21%
Ba137	<0.094			0.28	0.08	28%	0.08	0.05	58%	0.15	0.06	38%
La139	0.03	0.01	19%	0.12	0.01	11%	0.01	0.01	36%	0.04	0.01	18%
Ce140	0.17	0.02	10%	0.27	0.02	9%	0.02	0.01	33%	0.09	0.01	13%
Pr141	0.01	0.01	52%	0.02	0.01	31%	<0.0102			0.01	0.00	48%
Nd144	0.06	0.02	35%	0.08	0.02	27%	<0.027			0.04	0.02	37%
Sm147	<0.056			0.05	0.02	46%	<0.084			<0.053		
Eu153	<0.0184			<0.0121			0.02	0.01	52%	0.00	0.00	100%
Gd156	<0.037			0.06	0.03	47%	<0.078			<0.050		
Tb159	<0.0071			<0.0066			<0.0086			0.00	0.00	100%
Dy161	<0.049			<0.055			<0.072			<0.032		
Ho165	<0.0075			0.01	0.00	51%	0.00	0.00	100%	0.00	0.00	71%
Er166	<0.0193			0.03	0.01	39%	<0.0234			<0.0129		
Tm169	0.01	0.00	49%	0.01	0.00	50%	0.00	0.00	69%	<0.0064		
Yb173	0.02	0.02	71%	<0.041			0.04	0.02	58%	<0.042		
Lu175	0.00	0.00	71%	0.01	0.00	51%	<0.0090			<0.0071		
Pb208	0.25	0.04	16%	0.64	0.06	10%	0.13	0.03	26%	0.20	0.04	18%
Bi209	<0.00			0.04	0.02	37%	<0.0194			0.01	0.01	51%
Th232	0.02	0.02	63%	0.16	0.03	20%	<0.027			<0.0212		
U238	0.45	0.05	10%	1.83	0.10	5%	0.40	0.05	12%	0.22	0.03	14%

Value = ppm; s = standard deviation (ppm); rsd = relative standard deviation (%)

Results of trace elements by LA-ICP-MS of iron oxide generations from dolomitic itabirite and high grade iron ore from Esperança deposit. Quadrilátero Ferrífero, with their respective standard deviation (s) and relative standard deviation (rsd).

Sample	HIO1			DI								
	spH1B-3			spH2A-1			spH2A-2			spH2A-3		
	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd
Li7	1.24	0.32	26%	1.41	0.47	33%	0.63	0.26	41%	0.68	0.64	94%
Na23	75.63	3.83	5%	17.3	1.0	6%	21.5	1.0	5%	54.5	2.9	5%
Mg26	<2.57			84.4	6.8	8%	296	13.7	5%	68.8	9.0	13%
Al27	82.9	12.64	15%	92.4	4.5	5%	83.3	3.9	5%	91.6	5.5	6%
Si29	<160			105443	7309	7%	35879	2489	7%	52640	3684	7%
P31	<10.61			<6.54			<3.35			<10.8		
Ti49	299	24	8%	297	13	5%	259	11	4%	338	20	6%
V51	48.2	2.0	4%	38.6	1.5	4%	37.3	1.3	4%	41.9	1.9	5%
Cr53	81.9	3.9	5%	72.9	3.7	5%	70.3	3.1	5%	76.3	5.4	7%
Mn55	91.4	2.9	3%	233	7	3%	108	3	3%	181	6	3%
Fe57	699035	22120	3%	699035	22143	3%	699035	22129	3%	699035	22196	3%
Co59	<0.068			0.17	0.07	37%	0.10	0.04	38%	0.10	0.08	80%
Ni60	<0.180			<0.24			0.41	0.18	44%	1.93	0.73	38%
Cu63	0.13	0.05	38%	<0.00			0.78	0.16	21%	0.68	0.29	43%
Zn66	0.93	0.28	30%	<0.29			1.04	0.30	29%	1.18	0.69	58%
Ga71	1.07	0.15	14%	0.94	0.18	19%	0.64	0.11	17%	0.79	0.25	32%
As75	1.89	0.35	19%	1.59	0.38	24%	3.94	0.46	12%	1.03	0.49	48%
Sr88	0.15	0.02	16%	2.65	0.16	6%	0.42	0.05	11%	1.45	0.17	12%
Y89	0.05	0.01	28%	0.49	0.07	14%	0.07	0.02	28%	0.34	0.09	25%
Zr90	0.17	0.04	21%	1.01	0.14	14%	0.68	0.09	13%	0.84	0.20	24%
Nb93	1.76	0.11	6%	2.05	0.17	8%	1.48	0.11	7%	1.46	0.21	14%
Mo95	0.12	0.06	45%	<0.065			0.15	0.08	54%	0.15	0.15	100%
Sb121	0.16	0.04	27%	0.45	0.11	24%	0.70	0.11	16%	0.29	0.14	48%
Cs133	0.07	0.02	22%	0.05	0.02	44%	0.04	0.01	33%	0.04	0.03	70%
Ba137	0.02	0.02	100%	0.11	0.08	71%	0.30	0.11	37%	0.65	0.31	48%
La139	0.02	0.01	27%	0.91	0.05	6%	0.07	0.01	15%	0.58	0.06	11%
Ce140	0.08	0.01	14%	1.18	0.07	6%	0.24	0.02	9%	0.70	0.07	10%
Pr141	<0.0054			0.10	0.02	18%	0.02	0.01	32%	0.09	0.03	31%
Nd144	0.02			0.32	0.07	20%	0.05	0.02	41%	0.33	0.11	33%
Sm147	<0.036			0.10	0.06	57%	<0.00			<0.00		
Eu153	0.01	0.01	58%	0.02	0.01	58%	<0.0065			<0.00		
Gd156	<0.048			0.02	0.02	100%	<0.0204			0.08	0.08	92%
Tb159	<0.0091			<0.0055			<0.00			0.01	0.01	129%
Dy161	0.04	0.02	57%	<0.029			<0.011			<0.034		
Ho165	<0.0068			0.02	0.01	45%	0.01	0.00	58%	0.04	0.02	51%
Er166	<0.0124			0.07	0.02	33%	<0.0071			0.04	0.03	77%
Tm169	0.00	0.00	58%	0.02	0.01	43%	0.00	0.00	100%	<0.00		
Yb173	<0.040			0.09	0.05	55%	0.03	0.02	71%	0.06	0.06	100%
Lu175	0.00	0.00	100%	0.02	0.01	48%	<0.00			<0.012		
Pb208	0.19	0.04	18%	0.31	0.07	24%	2.55	0.18	7%	2.77	0.34	12%
Bi209	0.01	0.01	71%	<0.0202			0.04	0.02	44%	<0.033		
Th232	<0.020			6.75	0.36	5%	293.53	9.06	3%	<0.0214		
U238	0.59	0.05	9%	0.40	0.07	17%	2.32	0.14	6%	2.75	0.28	10%

Value = ppm; s = standard deviation (ppm); rsd = relative standard deviation (%)

Results of trace elements by LA-ICP-MS of iron oxide generations from dolomitic itabirite and high grade iron ore from Esperança deposit. Quadrilátero Ferrífero, with their respective standard deviation (s) and relative standard deviation (rsd).

Sample	DI											
	spH2A-4			spH2A-5			spH2A-6			spH2A-7		
	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd
Li7	1.75	0.66	38%	<0.69			<0.75			<0.71		
Na23	16.8	1.1	7%	3.90	0.47	12%	15.2	1.3	9%	2.12	0.50	24%
Mg26	899	37	4%	149	10	7%	23.4	5.2	22%	1182	66.7	6%
Al27	169	7	5%	73.4	4.3	6%	106	6	6%	116	7	6%
Si29	152577	10504	7%	5389	386	7%	3887	328	8%	16055	1114	7%
P31	<28.8			<11.7			<16.0			<18.6		
Ti49	311	14	5%	82.4	6.2	7%	135	11	8%	128	10.4	8%
V51	40.2	1.5	4%	36.9	1.9	5%	53.3	2.9	5%	44.1	2.4	5%
Cr53	74.3	4.1	6%	68.9	4.1	6%	93.2	6.4	7%	86.2	5.8	7%
Mn55	250	8	3%	89.5	4.5	5%	130	6	5%	197	10	5%
Fe57	699035	22147	3%	699035	22134	3%	699035	22176	3%	699035	22164	3%
Co59	<0.135			0.20	0.06	31%	0.31	0.12	39%	0.18	0.08	45%
Ni60	1.24	0.45	36%	0.24	0.14	58%	0.60	0.35	58%	0.33	0.24	73%
Cu63	0.97	0.23	24%	<0.076			0.39	0.19	49%	<0.110		
Zn66	1.14	0.59	52%	<0.57			0.79	0.56	71%	<0.70		
Ga71	1.09	0.21	19%	0.80	0.15	19%	1.05	0.26	25%	0.56	0.18	32%
As75	5.80	0.82	14%	<0.41			2.22	0.64	29%	1.10	0.48	44%
Sr88	2.68	0.17	6%	0.27	0.04	16%	0.32	0.07	23%	1.92	0.17	9%
Y89	1.18	0.11	9%	0.05	0.02	38%	0.08	0.04	47%	0.15	0.05	33%
Zr90	2.28	0.23	10%	0.23	0.06	25%	0.66	0.16	24%	0.17	0.07	41%
Nb93	2.29	0.19	8%	1.55	0.12	8%	2.20	0.22	10%	1.05	0.13	12%
Mo95	0.78	0.24	31%	0.14	0.08	59%	0.11	0.11	100%	<0.00		
Sb121	1.44	0.21	15%	0.12	0.05	39%	0.67	0.18	27%	0.17	0.08	46%
Cs133	0.07	0.03	44%	<0.031			<0.030			<0.026		
Ba137	1.93	0.35	18%	0.08	0.06	72%	<0.10			<0.00		
La139	0.33	0.03	9%	0.02	0.01	33%	0.10	0.02	23%	0.06	0.02	27%
Ce140	0.51	0.04	8%	0.03	0.01	28%	0.14	0.03	19%	0.10	0.02	21%
Pr141	0.05	0.02	31%	0.00	0.00	70%	0.02	0.01	63%	0.01	0.01	71%
Nd144	0.25	0.06	24%	<0.023			0.06	0.05	78%	<0.066		
Sm147	<0.171			<0.053			<0.045			0.09	0.06	71%
Eu153	0.09	0.03	32%	<0.0173			0.02	0.02	91%	<0.0178		
Gd156	0.14	0.07	50%	<0.034			0.06	0.06	87%	0.03	0.03	100%
Tb159	0.02	0.01	69%	<0.0090			<0.0132			<0.0093		
Dy161	0.16	0.06	38%	<0.052			<0.044			<0.093		
Ho165	0.03	0.01	41%	<0.0071			0.01	0.01	85%	0.01	0.01	71%
Er166	0.09	0.03	38%	<0.021			<0.021			<0.018		
Tm169	0.02	0.01	45%	<0.0088			0.01	0.01	100%	<0.0090		
Yb173	<0.179			<0.057			<0.069			0.04	0.04	103%
Lu175	<0.025			0.02	0.01	41%	0.01	0.01	100%	<0.0141		
Pb208	4.36	0.31	7%	0.40	0.08	19%	1.13	0.20	18%	0.34	0.10	29%
Bi209	0.15	0.04	29%	0.01	0.01	100%	0.04	0.03	71%	<0.00		
Th232	0.20	0.05	27%	0.01	0.01	100%	0.09	0.04	49%	0.04	0.03	72%
U238	3.60	0.24	7%	0.21	0.04	20%	1.45	0.18	12%	0.18	0.05	30%

Value = ppm; s = standard deviation (ppm); rsd = relative standard deviation (%)

Results of trace elements by LA-ICP-MS of iron oxide generations from dolomitic itabirite and high grade iron ore from Esperança deposit. Quadrilátero Ferrífero, with their respective standard deviation (s) and relative standard deviation (rsd).

Sample	DI											
	spH2A-8			spH2A-9			spH2A-10			spH2A-11		
	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd
Li7	<0.36			0.09	0.09	101%	0.34	0.34	100%	0.30	0.30	100%
Na23	1.93	0.37	19%	0.83	0.24	29%	4.84	0.74	15%	8.70	0.97	11%
Mg26	3.51	2.01	57%	<4.76			2675	145	5%	6.37	3.41	54%
Al27	82.98	4.98	6%	96.5	5.5	6%	67.0	4.7	7%	85.4	5.6	7%
Si29	<229			<215			<235			<259		
P31	<15.8			<14.8			<16.5			<18.4		
Ti49	315	18	6%	204	11.9	6%	148	12	8%	136	11	8%
V51	47.1	2.4	5%	41.4	2.0	5%	42.5	2.4	6%	37.9	2.1	6%
Cr53	72.8	4.5	6%	72.2	4.0	6%	78.0	5.8	7%	84.2	5.9	7%
Mn55	90.3	4.6	5%	102	5.1	5%	454	22.8	5%	102	5	5%
Fe57	699035	22138	3%	699035	22126	3%	699035	22182	3%	699035	22173	3%
Co59	<0.102			0.13	0.04	32%	0.30	0.13	43%	1.48	0.27	18%
Ni60	<0.23			0.17	0.10	59%	1.22	0.54	44%	4.71	0.99	21%
Cu63	<0.137			<0.091			<0.100			0.30	0.19	63%
Zn66	0.86	0.39	45%	<0.52			0.68	0.45	66%	1.57	0.72	46%
Ga71	0.69	0.15	22%	0.61	0.11	18%	1.13	0.29	26%	0.73	0.21	29%
As75	0.96	0.37	39%	0.45	0.23	51%	1.98	0.63	32%	8.96	1.23	14%
Sr88	0.05	0.02	37%	0.06	0.02	28%	4.95	0.33	7%	0.23	0.06	26%
Y89	0.02	0.01	73%	0.01	0.01	72%	0.36	0.09	26%	0.22	0.07	30%
Zr90	2.44	0.26	11%	0.53	0.08	15%	0.35	0.12	34%	0.35	0.11	31%
Nb93	2.06	0.15	7%	0.88	0.08	9%	1.48	0.18	12%	1.11	0.15	14%
Mo95	0.05	0.05	100%	0.13	0.08	66%	<0.00			<0.00		
Sb121	0.26	0.09	32%	0.07	0.03	42%	0.22	0.10	45%	0.44	0.14	32%
Cs133	<0.030			<0.022			0.02	0.02	96%	0.03	0.02	77%
Ba137	0.09	0.06	70%	0.17	0.07	41%	0.10	0.10	100%	0.46	0.21	46%
La139	<0.0137			0.01	0.00	57%	0.16	0.03	18%	0.13	0.03	19%
Ce140	0.03	0.01	30%	0.01	0.00	38%	0.30	0.04	14%	0.18	0.03	17%
Pr141	<0.0115			0.00	0.00	73%	0.06	0.02	33%	0.03	0.01	48%
Nd144	0.05	0.02	51%	0.02	0.01	67%	0.12	0.06	53%	0.04	0.04	95%
Sm147	<0.068			<0.045			<0.100			<0.078		
Eu153	<0.0221			<0.0147			<0.0162			<0.0178		
Gd156	<0.00			<0.058			<0.078			0.04	0.04	100%
Tb159	<0.0116			0.00	0.00	71%	<0.0120			<0.0132		
Dy161	<0.067			<0.063			0.04	0.04	100%	0.08	0.06	72%
Ho165	<0.0090			<0.0085			<0.0162			<0.00		
Er166	<0.00			0.01	0.01	71%	0.07	0.03	46%	<0.00		
Tm169	<0.0113			<0.0075			0.01	0.01	92%	0.01	0.01	100%
Yb173	<0.074			<0.069			0.05	0.05	100%	<0.00		
Lu175	<0.0124			0.00	0.00	100%	<0.0091			<0.0100		
Pb208	0.21	0.06	26%	<0.062			0.17	0.08	44%	0.50	0.13	26%
Bi209	0.03	0.02	52%	<0.0273			<0.021			0.05	0.03	57%
Th232	<0.025			0.03	0.01	52%	<0.026			0.19	0.06	34%
U238	1.09	0.11	10%	0.40	0.05	13%	1.11	0.16	14%	1.62	0.18	11%

Value = ppm; s = standard deviation (ppm); rsd = relative standard deviation (%)

Results of trace elements by LA-ICP-MS of iron oxide generations from dolomitic itabirite and high grade iron ore from Esperança deposit. Quadrilátero Ferrífero, with their respective standard deviation (s) and relative standard deviation (rsd).

Sample	HIO2											
	spH2B-1			spH2B-2			spH2B-3			spH2B-4		
	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd
Li7	<0.45			<0.37			1.28	0.60	47%	0.61	0.28	46%
Na23	77.3	5.3	7%	<0.45			28.3	2.2	8%	11.1	0.9	9%
Mg26	119	13	11%	<3.66			19.4	4.0	21%	44.7	5.6	13%
Al27	6148	370	6%	52.5	3.4	7%	1679	108	6%	704	46	7%
Si29	8506	812	10%	<179.0			5594	576	10%	1333	157	12%
P31	64.8	16.3	25%	<11.9			49.0	13.4	27%	33.7	8.8	26%
Ti49	47.2	6.9	15%	18.3	2.5	14%	63.1	8.7	14%	74.0	9.8	13%
V51	38.3	2.1	6%	43.7	2.1	5%	58.0	3.1	5%	34.8	1.9	6%
Cr53	93.3	6.9	7%	65.3	4.3	7%	80.4	6.2	8%	68.8	5.1	8%
Mn55	559	39	7%	84.3	6.0	7%	318	24	8%	398	31	8%
Fe57	699035	22161	3%	699035	22121	3%	699035	22147	3%	699035	22132	3%
Co59	0.43	0.13	30%	0.08	0.04	47%	0.40	0.12	30%	0.81	0.14	17%
Ni60	5.46	1.10	20%	<0.20			6.10	1.06	17%	2.41	0.51	21%
Cu63	14.5	1.7	12%	<0.109			11.8	1.5	13%	5.05	0.69	14%
Zn66	31.4	3.8	12%	<0.60			10.9	1.7	16%	0.53	0.30	57%
Ga71	1.92	0.36	19%	0.73	0.13	18%	1.80	0.33	18%	0.82	0.17	21%
As75	5.38	0.95	18%	<0.31			4.86	0.82	17%	17.0	1.9	12%
Sr88	0.30	0.07	23%	<0.0138			0.20	0.05	25%	0.31	0.06	18%
Y89	0.43	0.08	20%	<0.00			0.55	0.09	17%	1.19	0.15	13%
Zr90	0.64	0.15	23%	0.01	0.01	101%	1.40	0.23	16%	2.55	0.34	13%
Nb93	0.07	0.04	51%	<0.0170			0.29	0.06	22%	0.40	0.07	17%
Mo95	<0.18			<0.148			<0.142			1.44	0.31	22%
Sb121	0.37	0.13	35%	0.15	0.05	31%	0.49	0.12	24%	2.15	0.26	12%
Cs133	<0.036			<0.0227			<0.037			0.04	0.02	45%
Ba137	8.86	1.28	14%	<0.095			2.12	0.44	21%	3.66	0.59	16%
La139	0.28	0.04	15%	0.02	0.00	32%	0.16	0.03	17%	0.47	0.06	12%
Ce140	1.56	0.15	10%	0.04	0.01	20%	0.88	0.09	11%	1.45	0.14	10%
Pr141	0.03	0.01	43%	<0.0073			0.02	0.01	50%	0.14	0.02	17%
Nd144	0.11	0.05	45%	<0.032			0.10	0.04	39%	0.41	0.07	17%
Sm147	<0.00			0.02	0.01	70%	<0.074			0.16	0.06	35%
Eu153	0.03	0.02	69%	0.01	0.00	72%	<0.0170			0.03	0.01	54%
Gd156	0.06	0.04	70%	<0.00			0.09	0.06	65%	0.25	0.07	26%
Tb159	0.03	0.01	45%	<0.0065			<0.0088			0.05	0.01	28%
Dy161	0.15	0.07	46%	<0.033			0.15	0.06	40%	0.27	0.07	26%
Ho165	0.05	0.02	36%	0.00	0.00	71%	<0.0090			0.06	0.01	24%
Er166	0.06	0.03	52%	<0.0205			0.08	0.03	37%	0.15	0.03	21%
Tm169	0.01	0.01	83%	<0.0090			0.01	0.01	63%	0.02	0.01	40%
Yb173	<0.048			<0.069			0.13	0.06	46%	0.39	0.09	23%
Lu175	0.02	0.01	50%	<0.0068			<0.0130			0.02	0.01	38%
Pb208	33.87	3.05	9%	0.09	0.03	29%	2.80	0.35	13%	5.79	0.62	11%
Bi209	1.13	0.15	13%	<0.031			0.79	0.11	14%	1.37	0.14	10%
Th232	0.19	0.06	31%	0.01	0.01	100%	0.06	0.03	55%	0.45	0.07	15%
U238	0.67	0.12	18%	0.06	0.02	30%	0.60	0.10	16%	5.57	0.52	9%

Value = ppm; s = standard deviation (ppm); rsd = relative standard deviation (%)

Results of trace elements by LA-ICP-MS of iron oxide generations from dolomitic itabirite and high grade iron ore from Esperança deposit. Quadrilátero Ferrífero, with their respective standard deviation (s) and relative standard deviation (rsd).

Sample	HIO2								
	spH2B-5			spH2B-6			spH2B-7		
	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd
Li7	<0.307			<0.217			<0.136		
Na23	11.7	1.1	9%	1.90	0.24	13%	4.00	0.47	12%
Mg26	8.49	2.61	31%	2.11	0.82	39%	14.5	2.6	18%
Al27	1263	88.8	7%	62.3	4.6	7%	129	9	8%
Si29	1342	182	14%	119	47	40%	1540	187	12%
P31	64.3	15.4	24%	<6.68			<4.28		
Ti49	53.4	7.9	15%	41.7	6.0	15%	43.9	7.0	16%
V51	54.2	3.1	6%	61.5	3.5	6%	65.2	3.9	6%
Cr53	76.9	6.2	8%	73.5	5.6	8%	67.3	5.7	8%
Mn55	810	70	9%	115	10	9%	99.2	9.2	9%
Fe57	699035	22135	3%	699035	22117	3%	699035	22132	3%
Co59	0.47	0.11	23%	0.11	0.03	29%	0.05	0.03	59%
Ni60	2.80	0.61	22%	0.18	0.09	46%	<0.106		
Cu63	4.34	0.66	15%	0.10	0.04	40%	0.16	0.08	50%
Zn66	2.64	0.71	27%	<0.36			0.47	0.23	49%
Ga71	1.19	0.24	20%	0.89	0.15	17%	1.08	0.22	20%
As75	3.31	0.63	19%	1.13	0.22	19%	2.15	0.43	20%
Sr88	0.24	0.05	21%	0.01	0.01	54%	0.05	0.02	41%
Y89	0.51	0.08	16%	0.03	0.01	35%	0.08	0.02	30%
Zr90	0.76	0.14	18%	0.81	0.12	15%	1.97	0.31	16%
Nb93	0.10	0.03	30%	0.15	0.03	19%	0.56	0.09	16%
Mo95	0.34	0.14	41%	0.08	0.04	52%	<0.038		
Sb121	0.37	0.09	25%	0.46	0.07	16%	0.37	0.09	24%
Cs133	<0.030			<0.0114			0.02	0.01	65%
Ba137	7.06	1.09	15%	0.26	0.08	29%	0.07	0.06	84%
La139	0.12	0.02	18%	0.01	0.00	35%	0.85	0.11	13%
Ce140	1.06	0.12	11%	0.12	0.02	13%	1.64	0.18	11%
Pr141	0.01	0.01	62%	0.00	0.00	61%	0.08	0.02	21%
Nd144	0.11	0.04	34%	0.05	0.01	30%	0.55	0.09	16%
Sm147	0.02	0.02	100%	<0.03			<0.014		
Eu153	0.04	0.02	41%	0.01	0.00	52%	<0.0046		
Gd156	0.10	0.05	46%	<0.029			0.06	0.03	51%
Tb159	0.03	0.01	40%	<0.0054			<0.0024		
Dy161	0.19	0.06	33%	0.01	0.01	100%	<0.0172		
Ho165	0.02	0.01	48%	<0.01			<0.00244		
Er166	0.11	0.03	24%	<0.0121			0.02	0.01	53%
Tm169	0.02	0.01	42%	<0.0065			<0.00233		
Yb173	0.06	0.04	67%	0.02	0.01	59%	0.05	0.03	65%
Lu175	<0.0079			<0.0056			<0.0043		
Pb208	3.85	0.47	12%	0.62	0.09	14%	2.26	0.30	13%
Bi209	0.90	0.11	12%	0.28	0.04	14%	0.33	0.06	17%
Th232	0.16	0.04	25%	0.08	0.02	23%	0.11	0.03	29%
U238	0.34	0.06	18%	0.33	0.05	14%	0.56	0.09	15%

Value = ppm; s = standard deviation (ppm); rsd = relative standard deviation (%)

Results of trace elements by LA-ICP-MS of iron oxide generations from dolomitic itabirite and high grade iron ore from Esperança deposit. Quadrilátero Ferrífero, with their respective standard deviation (s) and relative standard deviation (rsd).

Sample	HIO2								
	spH2B-8			spH2B-9			spH2B-10		
	value	s	rsd	value	s	rsd	value	s	rsd
Li7	<0.100			<0.21			<0.66		
Na23	0.40	0.14	35%	6.68	0.69	10%	14.60	1.45	10%
Mg26	2.66	1.08	41%	7.42	1.73	23%	<4.24		
Al27	66.2	5.2	8%	139	11	8%	75.3	6.2	8%
Si29	<73.0			81.5	47.1	58%	12841	1569	12%
P31	<4.72			<5.33			<14.57		
Ti49	34.2	5.5	16%	65.2	10.4	16%	36.1	6.3	18%
V51	58.6	3.6	6%	67.6	4.2	6%	61.5	3.9	6%
Cr53	75.9	6.3	8%	68.4	5.9	9%	70.5	6.4	9%
Mn55	92.9	8.8	10%	99.3	9.8	10%	94.1	9.6	10%
Fe57	699035.81	22123.96	3%	699035.81	22126.38	3%	699035.81	22131.17	3%
Co59	0.11	0.04	35%	0.12	0.04	36%	0.08	0.04	54%
Ni60	0.17	0.10	59%	<0.095			<0.26		
Cu63	<0.052			0.53	0.14	26%	0.25	0.11	44%
Zn66	<0.30			1.62	0.43	27%	<0.77		
Ga71	0.82	0.16	20%	0.68	0.15	22%	0.77	0.18	23%
As75	0.65	0.19	29%	1.24	0.29	23%	1.57	0.41	26%
Sr88	0.01	0.01	60%	0.03	0.01	48%	0.06	0.02	37%
Y89	0.04	0.01	37%	0.06	0.02	32%	0.06	0.02	35%
Zr90	0.97	0.16	16%	1.64	0.27	16%	0.68	0.14	21%
Nb93	0.19	0.04	20%	0.37	0.07	18%	0.26	0.05	21%
Mo95	<0.056			0.05	0.05	98%	<0.130		
Sb121	0.10	0.04	39%	0.70	0.12	17%	0.37	0.09	24%
Cs133	<0.0114			<0.0138			0.04	0.02	48%
Ba137	0.07	0.05	71%	0.11	0.06	59%	0.04	0.04	103%
La139	0.10	0.02	17%	0.21	0.03	16%	0.12	0.02	18%
Ce140	0.14	0.02	15%	0.33	0.04	13%	0.28	0.04	14%
Pr141	0.01	0.00	47%	0.01	0.01	36%	0.02	0.01	42%
Nd144	0.01	0.01	100%	0.07	0.02	35%	0.05	0.02	41%
Sm147	<0.0147			<0.025			<0.083		
Eu153	<0.0048			0.01	0.01	60%	0.01	0.01	73%
Gd156	0.01	0.01	100%	<0.023			<0.063		
Tb159	0.00	0.00	93%	<0.00300			0.01	0.00	73%
Dy161	<0.013			0.03	0.02	70%	<0.059		
Ho165	<0.0036			0.01	0.00	58%	<0.0118		
Er166	<0.0079			0.01	0.01	70%	<0.030		
Tm169	0.00	0.00	100%	<0.0051			0.00	0.00	100%
Yb173	<0.0154			<0.0265			<0.051		
Lu175	0.00	0.00	100%	<0.00310			<0.00		
Pb208	1.08	0.16	15%	1.20	0.18	15%	1.01	0.16	16%
Bi209	0.12	0.03	22%	0.53	0.07	14%	0.04	0.02	48%
Th232	0.01	0.01	71%	0.14	0.03	22%	<0.042		
U238	0.09	0.02	26%	0.36	0.06	16%	0.21	0.04	21%

Value = ppm; s = standard deviation (ppm); rsd = relative standard deviation (%)

ANEXO 3. RESULTADOS MICROTERMOMÉTRICOS DAS INCLUSÕES FLUIDAS.

Tabela 1. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo do veio que corta o itabirito dolomítico do depósito de Esperança, QF.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{f-gelo}	T _{HH}	T _H	T _H para	NaCl _{eqv}	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d	
		µm	°C	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³	
Quartzo hospedado no veio de quartzo-carbonato-especularita que corta o itabirito dolomítico (ES02)	FIA1-IF1	15	-40.2	-13.5	-23.1	163.5	L	17.34	3.59	0.061	536.0	654.0	20.1	1.021	
	FIA1-IF2	25	-34.2	-13.1	-22.8	159.0	L	16.99	3.50	0.059	532.0	644.0	20.0	1.022	
	FIA1-IF3	35	-38.4	-13.2	-22.5	179.8	L	17.08	3.52	0.060	533.0	647.0	20.3	1.007	
	FIA1-IF4	42	-41.0	-16.9	-22.2	167.4	L	20.15	4.31	0.072	571.0	743.0	20.1	1.040	
	FIA2-IF1	20	-47.0	-15.5	-22.0	141.5	L	19.05	4.02	0.068	556.0	706.0	19.7	1.053	
	FIA2-IF2	30	-45.0	-14.4	-22.0	129.5	L	18.13	3.79	0.064	545.0	677.0	19.5	1.054	
	FIA2-IF3	18	-48.0	-15.0	-24.0	146.2	L	18.55	3.92	0.066	551.0	693.0	19.8	1.045	
	FIA3-IF1	50	-43.5	-14.2	-23.5	103.4	L	17.96	3.74	0.063	543.0	672.0	19.1	1.075	
	FIA3-IF2	28	-50.0	-10.8	-22.9	100.0	L	14.77	2.97	0.051	510.0	585.0	19.2	1.048	
	FIA4-IF1	40	-49.4	-12.8	-22.9	167.2	L	16.71	3.43	0.058	529.0	636.0	20.1	1.014	
	FIA4-IF2	20	-49.0	-12.9	-23.6	177.5	L	16.80	3.45	0.059	530.0	639.0	20.3	1.007	
	FIA4-IF3	30	-43.0	-14.5	-22.6	148.0	L	18.22	3.81	0.064	546.0	680.0	19.8	1.040	
	FIA4-IF4	42	-44.2	-14.6	-23.2	156.0	L	18.30	3.83	0.065	547.0	682.0	20.0	1.034	
	FIA4-IF5	15	-44.5	-12.9	-23.3	167.5	L	16.80	3.45	0.059	530.0	639.0	20.1	1.014	
	FIA5-IF1	20	-40.1	-14.7	-23.9	135.0	L	18.38	3.85	0.065	584.0	685.0	19.6	1.052	
	FIA5-IF2	25	-44.5	-13.1	-23.8	139.0	L	16.99	3.50	0.059	532.0	644.0	19.7	1.037	
	FIA5-IF3	30	-47.2	-11.7	-22.3	122.3	L	15.67	3.18	0.054	518.0	608.0	19.4	1.039	
	FIA5-IF4	15	-48.1	-10.9	-23.9	113.5	L	14.87	2.99	0.051	511.0	587.0	19.3	1.039	
	FIA5-IF5	45	-42.0	-12.1	-24.3	166.8	L	16.05	3.27	0.056	522.0	618.0	20.1	1.010	
	FIA5-IF6	50	-45.0	-12.6	-23.5	127.0	L	16.50	3.39	0.057	527.0	631.0	19.5	1.043	
	FIA5-IF7	25	-43.8	-12.1	-24.2	143.5	L	16.05	3.27	0.056	522.0	618.0	19.8	1.027	
	FIA5-IF8	32	-44.1	-13.1	-23.7	143.8	L	16.99	3.50	0.059	532.0	644.0	19.7	1.034	
	FIA6-IF1	48	-42.3	-13.2	-22.4	128.4	L	17.08	3.52	0.060	533.0	647.0	19.5	1.046	
	FIA6-IF2	32	-44.8	-11.8	-23.1	142.3	L	15.76	3.20	0.055	519.0	611.0	19.7	1.026	
	FIA6-IF3	15	-39.8	-12.6	-24.1	131.5	L	16.53	3.39	0.057	527.0	631.0	19.6	1.039	
	<i>Média</i>		30	-44.0	-13.3	-23.2	144.0	-	17.11	3.54	0.060	535.4	648.8	19.8	1.035
	<i>DP</i>		12	3.7	1.4	0.7	21.7	-	1.27	0.32	0.005	17.3	37.0	0.3	0.017

Tabela 2. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo do veio que corta o minério compacto do depósito de Esperança, QF.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{f-gelo}	T _{HH}	T _H	T _H para	NaCl _{equiv}	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d
		µm	°C	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³
Quartzo hospedado no veio de quartzo-especialarita que corta o minério de ferro de alto teor (ES09)	FIA1-IF1	20	-42.8	-10.6	-25.4	146.8	L	14.57	-	-	-	-	-	-
	FIA1-IF2	15	-45.8	-9.5	-25.5	151.4	L	13.40	2.65	0.046	497.0	550.0	19.8	1.003
	FIA1-IF3	20	-44.0	-10.6	-35.0	151.4	L	14.57	2.92	0.050	508.0	579.0	19.8	1.011
	FIA1-IF4	15	-45.8	-9.6	-23.7	151.4	L	13.51	2.67	0.046	498.0	553.0	19.8	1.004
	FIA1-IF5	18	-41.5	-10.6	-25.9	142.0	L	14.57	2.92	0.050	508.0	579.0	19.7	1.017
	FIA1-IF6	22	-42.2	-10.6	-25.3	148.0	L	14.57	2.92	0.050	508.0	579.0	19.8	1.013
	FIA1-IF5	25	-46.8	-10.2	-24.9	158.3	L	14.15	2.82	0.048	504.0	569.0	19.9	1.003
	FIA1-IF6	32	-47.2	-10.6	-23.8	157.0	L	14.60	2.92	0.050	508.0	579.0	19.9	1.007
	FIA1-IF7	42	-45.6	-10.9	-24.8	153.4	L	14.87	2.99	0.051	511.0	587.0	19.9	1.011
	FIA1-IF8	28	-48.1	-10.2	-24.5	151.4	L	14.15	2.82	0.048	504.0	569.0	19.8	1.008
	FIA1-IF9	50	-45.8	-10.6	-24.5	174.5	L	14.57	2.92	0.050	508.0	579.0	20.2	0.994
	FIA1-IF10	25	-45.8	-10.4	-25.1	133.0	L	14.36	2.87	0.049	506.0	574.0	19.6	1.022
	FIA1-IF11	15	-45.8	-9.6	-23.6	137.0	L	13.51	2.67	0.046	498.0	553.0	19.6	1.013
	FIA2-IF1	30	-35.6	-9.6	N.O.	137.0	L	13.51	2.67	0.046	498.0	553.0	19.6	1.013
	FIA2-IF2	30	-40.9	-9.9	N.O.	128.0	L	13.83	2.75	0.047	501.0	561.0	19.5	1.022
	FIA2-IF3	50	-44.3	-10.8	-24.7	159.0	L	14.77	2.97	0.051	510.0	585.0	20.0	1.007
	FIA2-IF4	20	-45.1	-10.6	-27.5	157.6	L	14.57	2.92	0.050	508.0	579.0	19.9	1.006
	FIA2-IF5	35	-38.6	-9.7	-25.0	127.0	L	13.62	2.70	0.046	499.0	555.0	19.5	1.021
	FIA2-IF6	40	-40.9	-9.4	-24.5	150.0	L	13.29	2.62	0.045	496.0	547.0	19.8	1.003
	FIA3-IF1	45	-32.0	-9.0	N.O.	117.0	L	12.85	2.52	0.043	492.0	536.0	19.3	1.022
	FIA3-IF2	30	-32.4	-9.2	N.O.	125.1	L	13.07	2.57	0.044	494.0	542.0	19.4	1.018
	FIA3-IF3	12	-32.5	-9.7	N.O.	128.3	L	13.62	2.70	0.046	499.0	555.0	19.5	1.020
	FIA3-IF4	26	-31.9	-8.8	N.O.	123.0	L	12.62	2.47	0.043	490.0	531.0	19.4	1.016
	FIA3-IF5	38	-31.6	-8.4	N.O.	123.8	L	12.16	2.37	0.041	485.0	519.0	19.4	1.013
	FIA3-IF6	28	-31.2	-9.3	N.O.	124.0	L	13.18	2.60	0.045	495.0	545.0	19.5	1.020
	FIA4-IF1	23	-44.5	-9.4	-26.3	131.8	L	13.29	2.62	0.045	496.0	547.0	19.5	1.015
	FIA4-IF2	15	-42.1	-9.1	-28.1	125.3	L	12.96	2.55	0.044	493.0	539.0	19.5	1.017
	FIA5-IF1	45	-40.2	-9.4	-28.4	128.4	L	13.29	2.62	0.045	496.0	547.0	19.5	1.018
	FIA5-IF2	26	-39.8	-9.6	-27.5	134.0	L	13.51	2.67	0.046	498.0	553.0	19.6	1.015
	FIA5-IF3	35	-44.3	-9.2	-26.6	132.3	L	13.07	2.57	0.044	494.0	542.0	19.5	1.013
	FIA5-IF4	42	-40.8	-9.6	-27.7	131.4	L	13.51	2.67	0.046	498.0	553.0	19.5	1.017
	FIA5-IF5	25	-38.7	-9.7	-28.1	135.5	L	13.62	2.70	0.046	499.0	555.0	19.6	1.015
	Média	29	-41.1	-9.8	-26.1	139.8	-	13.74	2.72	0.047	500.0	557.9	19.7	1.013
DP	11	5.3	0.7	2.4	14.0	-	0.70	0.16	0.003	6.6	17.4	0.2	0.007	

Tabela 3. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em cristais de especularita encontradas em veios e *vugs* no minério compacto do depósito de Esperança.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{r-gelo}	T _H	T _H para	NaCl _{eqv}	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d
		μm	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³
Especularita de veios e vugs no minério de ferro de alto teor (ES06, ES09)	IF1	10	-23.4	-5.8	200.0	L	8.95	1.68	0.029	456.0	439.0	20.5	0.936
	IF2	7	-22.1	-6.2	196.0	L	9.47	1.79	0.031	461.0	452.0	20.4	0.943
	IF3	15	22.9	-6.4	200.0	L	9.73	1.84	0.032	463.0	459.0	20.5	0.942
	IF4	9	-23.2	-6.2	218.0	L	9.50	1.95	0.034	468.0	472.0	20.9	0.929
	IF5	16	-23.0	-7.0	200.0	L	10.49	2.00	0.035	470.0	478.0	20.5	0.947
	IF7	45	-26.5	-6.1	200.0	L	9.34	1.76	0.031	460.0	449.0	20.5	0.939
	IF8	22	-25.5	-5.1	194.0	L	8.00	1.48	0.026	448.0	415.0	20.4	0.935
	IF9	18	-24.1	-5.4	200.0	L	8.41	1.56	0.027	451.0	425.0	20.5	0.932
	IF10	27	-27.0	-5.2	210.0	L	8.14	1.51	0.026	449.0	419.0	20.7	0.921
	IF11	15	-26.0	-5.4	189.0	L	8.41	1.56	0.027	451.0	425.0	20.3	0.942
	IF12	35	-25.8	-5.7	200.0	L	8.81	1.65	0.029	455.0	436.0	20.5	0.935
	IF13	15	-25.7	-5.5	206.0	L	8.55	1.59	0.028	453.0	429.0	20.6	0.928
	IF1	28	-33.0	-5.7	250.0	L	8.81	1.65	0.029	455.0	436.0	21.7	0.883
	IF2	35	-33.2	-5.8	232.0	L	8.95	1.68	0.029	456.0	439.0	21.2	0.905
	IF3	18	-32.8	-5.5	250.0	L	8.55	1.59	0.028	453.0	429.0	21.8	0.881
	IF4	15	-32.5	-5.6	258.0	L	8.68	1.62	0.028	454.0	432.0	22.0	0.872
	IF5	27	-25.0	-9.4	250.0	L	13.29	2.62	0.045	496.0	547.0	21.5	0.922
	IF6	20	-24.0	-7.9	250.0	L	11.58	2.24	0.039	480.0	505.0	21.6	0.908
	IF7	35	-25.9	-7.1	250.0	L	10.61	2.03	0.035	471.0	481.0	21.6	0.900
	IF8	16	-33.4	-7.0	262.0	L	10.49	2.00	0.035	470.0	478.0	22.0	0.885
	IF9	63	-24.5	-7.5	250.0	L	11.10	2.14	0.037	476.0	493.0	21.6	0.904
	IF10	18	-27.2	-7.7	250.0	L	11.34	2.19	0.038	478.0	499.0	21.6	0.906
	IF11	27	-25.5	-7.1	245.0	L	10.61	2.03	0.035	471.0	481.0	21.5	0.905
	IF12	20	-27.2	-7.3	250.0	L	10.86	2.08	0.036	474.0	487.0	21.6	0.902
	IF13	12	-24.1	-7.4	259.0	L	10.98	2.11	0.037	475.0	490.0	21.9	0.893
	IF14	12	-27.2	-7.2	250.0	L	10.73	2.06	0.036	473.0	484.0	21.6	0.901
	IF15	27	-27.0	-7.8	250.0	L	11.46	2.22	0.038	479.0	502.0	21.6	0.907
	IF16	10	-30.0	-8.1	255.0	L	11.81	2.29	0.040	482.0	511.0	21.7	0.905
	IF17	26	-34.1	-7.1	250.0	L	10.61	2.03	0.035	471.0	481.0	21.6	0.900
	Média	22	-25.4	-6.6	230.1	-	9.9	1.9	0.0	465.5	464.6	21.2	0.914
	DP	12	9.9	1.1	25.7	-	1.3	0.3	0.0	12.1	33.5	0.6	0.021

Tabela 4. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo do veio que corta o minério compacto de Catas Altas, QF.

Amostra	IF	Tamanho μm	T _{eut} °C	T _{CO2} °C	T _{clat} °C	T _{h CO2} °C	T _h °C	T _{H para}	NaCl _{eqv} %p/p	fase aquosa			Fase Carbônica			Composição total				
										d _(aq) g/cm ³	M _{NaCl} mol/kg	X _{NaCl}	V _{CO2}	d _{CO2} g/cm ³	V _{molar CO2} cm ³ /mol	X _{H2O}	X _{CO2}	X _{NaCl}	d _r g/cm ³	V _{molar} cm ³ /mol
Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita no minério de ferro de alto teor	FIA1-IF1	60	-22.0	-58.8	2.4	27.5	300.0	L	12.72	1.089	2.49	0.043	20%	0.667	65.9	0.896	0.064	0.040	1.004	21.2
	FIA1-IF2	20	-24.4	-58.4	3.3	26.2	300.0	L	11.51	1.080	2.22	0.038	20%	0.692	63.6	0.898	0.067	0.036	1.002	21.1
	FIA1-IF3	50	-26.5	-58.5	3.1	24.1	300.0	L	11.79	1.079	2.28	0.039	20%	0.725	60.7	0.894	0.070	0.037	1.008	21.1
	FIA1-IF4	25	-23.0	-58.4	2.7	25.9	300.0	L	12.32	1.086	2.40	0.041	20%	0.697	63.1	0.894	0.067	0.039	1.009	21.1
	FIA1-IF5	50	-25.6	-58.7	3.4	29.7	300.0	L	11.38	1.077	2.19	0.038	20%	0.608	72.4	0.905	0.059	0.036	0.983	21.3
	FIA1-IF6	30	-23.8	-57.3	2.3	23.8	300.0	L	12.85	1.091	2.52	0.043	20%	0.729	60.4	0.890	0.070	0.040	1.019	21.1
	FIA1-IF7	15	-24.0	-57.7	2.3	20.9	300.0	L	12.85	1.092	2.52	0.043	20%	0.764	57.6	0.887	0.073	0.040	1.027	21.0
	FIA1-IF8	20	-23.7	-57.3	2.5	21.1	300.0	L	12.59	1.090	2.46	0.042	20%	0.762	57.7	0.888	0.073	0.039	1.025	21.0
	FIA1-IF9	20	-21.6	-57.5	2.2	28.8	300.0	L	12.98	1.090	2.54	0.044	20%	0.637	69.1	0.897	0.062	0.041	0.999	21.3
	FIA1-IF10	30	-21.6	-57.2	2.5	25.3	300.0	L	12.59	1.089	2.46	0.042	20%	0.707	62.3	0.893	0.068	0.039	1.012	21.1
	FIA2-F1	15	-21.8	-57.9	5.7	23.0	326.0	L	7.94	1.053	1.46	0.026	10%	0.739	59.5	0.925	0.051	0.024	1.006	20.2
	FIA2-F2	15	-23.3	-58.1	6.8	20.1	326.0	L	6.11	1.039	1.10	0.019	10%	0.773	56.9	0.929	0.053	0.018	0.999	20.2
	FIA2-F3	15	-27.5	-57.3	4.4	27.5	326.0	L	9.95	1.067	1.88	0.033	20%	0.667	65.9	0.905	0.064	0.031	0.987	21.2
	FIA3-IF1	45	-25.5	-57.5	7.1	18.5	326.0	L	5.59	1.035	1.00	0.018	10%	0.790	55.7	0.929	0.054	0.017	0.998	20.1
	FIA3-IF2	23	-24.6	-57.9	7.5	28.1	326.0	L	4.88	1.027	0.86	0.015	10%	0.654	67.3	0.940	0.045	0.015	0.971	20.4
	FIA3-IF3	23	-25.0	-57.1	6.9	28.5	326.0	L	5.94	1.035	1.06	0.019	10%	0.644	68.3	0.937	0.045	0.018	0.976	20.4
	FIA3-IF4	45	-25.9	-57.3	6.9	14.9	326.0	L	5.94	1.039	1.06	0.019	10%	0.823	53.5	0.926	0.056	0.018	1.007	20.1
	FIA3-IF5	20	-25.3	-57.3	6.4	15.4	326.0	L	6.79	1.046	1.23	0.022	10%	0.819	53.8	0.924	0.056	0.020	1.012	20.1
	FIA3-IF6	30	-25.6	-57.3	7.4	15.6	326.0	L	5.06	1.032	0.90	0.016	10%	0.817	53.9	0.949	0.036	0.015	1.010	19.4
	FIA3-IF7	30	-26.4	-57.3	6.8	14.0	326.0	L	6.11	1.041	1.10	0.019	10%	0.830	53.0	0.925	0.057	0.018	1.009	20.0
	FIA4-IF1	20	-24.6	-57.4	7.5	13.2	326.0	L	4.88	1.031	0.86	0.015	10%	0.837	52.6	0.928	0.057	0.014	1.002	20.0
	FIA4-IF2	20	24.2	-57.4	7.6	13.6	326.0	L	4.70	1.029	0.83	0.015	10%	0.834	52.8	0.929	0.057	0.014	1.000	20.1
	FIA4-IF3	23	-26.5	-57.5	7.9	14.4	326.0	L	4.15	1.025	0.73	0.013	10%	0.827	53.2	0.931	0.057	0.012	0.995	20.1
	FIA4-IF4	50	24.2	-57.4	7.4	13.7	326.0	L	5.06	1.032	0.90	0.016	10%	0.833	52.8	0.928	0.057	0.015	1.002	20.1
	FIA4-IF5	50	-24.2	-57.4	7.9	14.0	326.0	L	4.15	1.025	0.73	0.013	10%	0.830	53.0	0.931	0.057	0.012	0.996	20.1
	FIA4-IF6	25	-22.7	-57.6	7.7	15.8	326.0	L	4.70	1.027	0.80	0.014	10%	0.815	54.0	0.931	0.056	0.013	0.995	20.1
	FIA4-IF7	25	-23.0	-57.5	8.1	20.3	326.0	L	3.77	1.020	0.66	0.012	10%	0.771	57.1	0.936	0.053	0.011	0.983	20.2
	FIA5-IF1	15	-23.4	-57.4	7.4	16.7	326.0	L	5.06	1.031	0.90	0.016	10%	0.807	54.5	0.930	0.055	0.015	0.998	20.1

Continuação: Tabela 4. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo do veio que corta o minério compacto de Catas Altas, QF.

Amostra	IF	Tamanho μm	T _{eut} °C	T _{CO2} °C	T _{clat} °C	T _{h CO2} °C	T _h °C	T _{H para}	NaCl _{eqv} %p/p	fase aquosa			Fase Carbônica			Composição total				
										d _(aq) g/cm ³	M _{NaCl} mol/kg	X _{NaCl}	V _{CO2}	d _{CO2} g/cm ³	V _{molar CO2} cm ³ /mol	X _{H2O}	X _{CO2}	X _{NaCl}	d _T g/cm ³	V _{molar} cm ³ /mol
Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita no minério de ferro de alto teor	FIA5-IF2	45	-24.9	-57.7	7.6	29.3	326.0	L	4.70	1.025	0.83	0.015	10%	0.622	70.8	0.943	0.043	0.014	0.965	20.4
	FIA5-IF3	30	-24.2	-57.5	7.6	28.1	326.0	L	4.70	1.025	0.83	0.015	10%	0.654	67.3	0.941	0.045	0.014	0.970	20.4
	FIA5-IF4	32	-24.0	-57.6	7.2	29.4	326.0	L	5.41	1.031	0.96	0.017	10%	0.625	70.4	0.940	0.043	0.016	0.970	20.4
	FIA6-IF1	48	-24.8	-57.4	3.4	28.6	300.0	L	11.38	1.078	2.19	0.038	20%	0.642	68.6	0.902	0.062	0.036	0.991	21.3
	FIA6-IF2	25	-23.2	-57.6	3.6	30.0	300.0	L	11.10	1.075	2.13	0.037	20%	0.596	73.9	0.907	0.058	0.035	0.979	21.4
	FIA7-IF2	38	-19.3	-57.1	4.4	21.9	300.0	L	9.95	1.069	1.88	0.033	20%	0.753	58.5	0.898	0.072	0.030	1.006	21.0
	FIA8-IF1	15	-23.2	-57.3	7.8	27.2	326.0	L	4.33	1.023	0.76	0.014	10%	0.674	65.3	0.940	0.047	0.013	0.970	20.4
	FIA8-IF2	16	-22.0	-57.2	7.3	14.9	326.0	L	5.23	1.033	0.93	0.016	10%	0.823	53.5	0.928	0.056	0.016	1.002	20.1
	FIA9-IF1	20	N.O.	-57.8	3.4	29.3	310.0	L	11.38	1.077	2.19	0.038	20%	0.622	70.8	0.904	0.060	0.036	0.986	21.3
	FIA9-IF2	25	N.O.	-56.8	4.1	28.2	310.0	L	10.38	1.070	1.97	0.034	20%	0.652	67.5	0.905	0.063	0.032	0.986	21.2
	FIA9-IF3	15	N.O.	-57.4	4.5	28.7	310.0	L	9.80	1.065	1.85	0.032	10%	0.639	68.8	0.925	0.044	0.031	1.001	20.4
	FIA10-IF1	20	N.O.	-57.2	4.1	28.0	318.0	L	10.38	1.070	1.97	0.034	20%	0.657	67.0	0.905	0.063	0.032	0.987	21.2
	FIA10-IF2	12	N.O.	-57.4	3.8	26.1	318.0	L	10.82	1.074	2.07	0.036	20%	0.694	63.4	0.900	0.067	0.033	0.998	21.1
	FIA10-IF3	32	-34.0	-57.8	4.5	27.1	318.0	L	9.80	1.066	1.85	0.032	10%	0.676	65.1	0.923	0.047	0.031	1.007	20.3
	FIA10-IF4	15	N.O.	-57.6	3.6	27.8	318.0	L	11.10	1.076	2.13	0.037	20%	0.661	66.6	0.902	0.064	0.035	0.993	21.2
	FIA10-IF5	20	N.O.	-57.3	4.2	26.8	318.0	L	10.24	1.069	1.94	0.034	20%	0.681	64.6	0.903	0.066	0.032	0.992	21.2
	<i>Média</i>	28	-21.7	-57.6	5.3	23.1	316.0	-	8.31	1.055	1.56	0.027	0.14	0.720	61.8	0.917	0.057	0.026	0.996	20.6
	<i>DP</i>	12	11.2	0.4	2.1	5.9	11.7	-	3.22	0.025	0.66	0.011	0.05	0.078	6.7	0.018	0.009	0.010	0.015	0.5

Tabela 5. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em cristais de especularita encontradas em veios e *vugs* no minério compacto do depósito de Catas Altas.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{f-gelo}	T _{HH}	T _h	T _{H para}	NaCl _{eqv}	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d
		µm	°C	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³
Especularita de veios e vugs no minério de ferro de alto teor (CA03, CA05)	IF1	30	-44.1	-5.2	-23.4	198.5	L	8.14	1.51	0.026	449.0	419.0	20.5	0.932
	IF2	25	-42.6	-5.8	-23.2	199.5	L	8.95	1.68	0.029	456.0	439.0	20.5	0.937
	IF3	38	-42.8	-6.0	-22.0	189.7	L	9.21	1.73	0.030	459.0	446.0	20.3	0.947
	IF4	32	-45.4	-9.8	-24.6	194.0	L	13.72	2.72	0.047	500.0	558.0	20.5	0.974
	IF5	40	-47.1	-7.6	-23.8	194.0	L	11.22	2.16	0.038	477.0	496.0	20.4	0.957
	IF6	26	-46.0	-10.4	-21.7	194.0	L	14.36	2.87	0.049	506.0	574.0	20.4	0.978
	IF7	16	-45.2	-9.4	-24.4	194.0	L	13.29	2.62	0.045	496.0	547.0	20.4	0.971
	IF8	36	-48.9	-9.4	-24.6	204.1	L	13.30	2.62	0.045	496.0	547.0	20.6	0.936
	IF9	22	-44.7	-7.7	-22.4	198.0	L	11.30	2.19	0.038	478.0	499.0	20.5	0.955
	IF10	115	-51.6	-11.8	-25.1	202.9	L	15.76	3.20	0.055	519.0	611.0	20.7	0.980
	IF11	18	-38.0	-9.5	-24.5	180.0	L	13.40	2.65	0.046	497.0	550.0	20.2	0.982
	IF12	18	-44.4	-6.5	-23.8	185.0	L	9.86	1.87	0.033	465.0	462.0	20.3	0.955
	IF13	16	-33.0	-7.7	-24.4	194.0	L	11.34	2.19	0.038	478.0	499.0	20.4	0.958
	IF14	18	-33.5	-9.1	-23.2	194.0	L	12.80	2.55	0.044	493.0	539.0	20.4	0.969
	IF1	60	-32.4	-12.6	-26.7	167.0	L	16.53	3.39	0.057	527.0	631.0	20.1	1.013
	IF2	18	-32.0	-8.6	-25.2	184.1	L	12.39	2.42	0.042	488.0	525.0	20.3	0.973
	IF3	20	-32.5	-8.4	-25.0	178.0	L	12.16	2.37	0.041	485.0	519.0	20.2	0.976
	IF4	18	-33.1	-7.6	-25.4	176.9	L	11.22	2.16	0.038	477.0	496.0	20.1	0.971
	IF5	46	-32.8	-7.6	-25.0	193.0	L	11.22	2.16	0.038	477.0	496.0	20.4	0.958
	IF6	33	-32.0	-7.3	-25.5	190.0	L	10.86	2.08	0.036	474.0	487.0	20.3	0.958
	IF7	26	-32.8	-8.3	-25.3	180.0	L	12.05	2.35	0.041	484.0	517.0	20.2	0.974
	IF8	15	-32.6	-7.8	-25.9	183.0	L	11.46	2.22	0.038	479.0	502.0	20.2	0.968
	IF9	40	-32.4	-8.4	-25.4	184.1	L	12.16	2.37	0.041	485.0	519.0	20.3	0.971
	IF10	21	-32.0	-8.0	-24.7	195.0	L	11.70	2.27	0.039	481.0	508.0	20.4	0.960
	IF11	18	-32.3	-7.8	-24.0	194.0	L	11.46	2.22	0.038	479.0	502.0	20.4	0.959
	IF12	14	-32.4	-8.2	-26.3	184.1	L	11.93	2.32	0.040	483.0	514.0	20.2	0.970
	IF13	45	-31.9	-10.8	-26.7	184.1	L	14.77	2.97	0.051	510.0	585.0	20.3	0.988
IF14	25	-33.5	-9.7	-25.4	184.1	L	13.62	2.70	0.046	499.0	555.0	20.3	0.981	
IF15	32	-32.9	-11.2	-24.8	184.1	L	15.17	3.06	0.052	513.0	595.0	20.3	0.991	
Média	30	-37.8	-8.6	-24.6	189.1	-	12.3	2.4	0.0	486.6	522.0	20.3	0.967	
DP	20	6.6	1.7	1.3	8.5	-	2.0	0.4	0.0	18.2	49.6	0.1	0.017	

Tabela 6. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo e especularita dos veios que cortam as litologias da SEM.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{f-gelo}	T _H	T _H para	NaCl (eqv)	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d		
		μm	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³		
Morro do Pilar	Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita do quartzo itabirito	FIA1-IF1	25	-49.0	-6.4	108.0	L	9.73	1.84	0.032	463.0	459.0	19.2	1.007	
		FIA1-IF2	30	-50.2	-6.1	121.0	L	9.34	1.76	0.031	460.0	449.0	19.3	0.997	
		FIA1-IF3	32	-48.0	-6.7	118.0	L	10.11	1.92	0.033	467.0	468.0	19.3	1.003	
		FIA1-IF4	60	-45.5	-7.1	220.0	L	10.61	2.03	0.035	471.0	481.0	20.9	0.930	
		FIA1-IF5	55	-48.2	-5.8	169.9	L	8.95	1.68	0.029	456.0	439.0	20.0	0.961	
		FIA1-IF6	45	-44.5	-5.2	130.0	L	8.14	1.51	0.026	449.0	419.0	19.4	0.984	
		FIA1-IF7	58	-43.5	-6.9	207.0	L	10.36	1.98	0.034	469.0	475.0	20.6	0.094	
		FIA1-IF8	35	-44.0	-6.5	210.0	L	9.86	1.87	0.033	465.0	462.0	20.7	0.934	
		FIA1-IF9	25	-39.0	-6.1	180.0	L	9.34	1.76	0.031	460.0	449.0	20.2	0.956	
		FIA1-IF10	30	-40.5	-7.0	174.0	L	10.49							
		FIA1-IF11	28	-44.8	-7.1	177.4	L	10.61	2.03	0.035	471.0	481.0	20.1	0.966	
		FIA1-IF12	32	-41.8	-7.2	211.0	L	10.73							
		FIA1-IF13	15	-42.9	-7.1	169.9	L	10.61	2.03	0.035	471.0	481.0	20.0	0.972	
		FIA1-IF14	25	-42.7	-7.4	174.0	L	10.98	2.11	0.037	475.0	490.0	20.1	0.971	
		FIA1-IF15	38	-44.0	-6.8	178.0	L	10.24	1.95	0.034	468.0	472.0	20.1	0.963	
			<i>Média</i>	36	-44.6	-6.6	169.9	-	10.01	1.88	0.033	465.0	463.5	20.0	0.903
	<i>DP</i>	13	3.2	0.6	35.8	-	0.78	0.17	0.003	7.2	20.1	0.6	0.244		

Continuação: Tabela 6. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo e especularita dos veios que cortam as litologias da SEM.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{f-gelo}	T _H	T _H para	NaCl (eqv)	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d	
		µm	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³	
Morro do Pilar	Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita no minério de ferro de alto teor compacto	FIA1-IF1	40	-42.0	-9.2	90.9	L	13.07	2.57	0.044	494.0	542.0	19.0	1.040
		FIA1-IF2	30	-38.0	-8.6	112.5	L	12.39	2.42	0.042	488.0	525.0	19.3	1.022
		FIA1-IF3	35	-43.0	-8.3	140.0	L	12.05	2.35	0.041	484.0	517.0	19.6	1.002
		FIA1-IF4	20	-42.5	-7.2	118.0	L	10.73	2.35	0.041	484.0	517.0	19.4	1.016
		FIA1-IF5	50	-41.8	-9.6	112.5	L	13.51	2.67	0.046	498.0	553.0	19.3	1.029
		FIA1-IF6	10	-43.0	-8.4	132.5	L	12.16	2.37	0.041	485.0	519.0	19.5	1.007
		FIA1-IF7	25	-44.0	-8.6	139.0	L	12.39	2.42	0.042	488.0	525.0	19.6	1.005
		FIA1-IF8	35	-38.9	-7.2	115.0	L	10.73	2.06	0.036	473.0	484.0	19.3	1.009
		FIA1-IF9	35	-40.9	-7.3	110.0	L	10.86	2.08	0.036	474.0	487.0	19.2	1.013
		FIA1-IF10	50	-40.8	-8.5	120.0	L	12.28	2.40	0.041	486.0	522.0	19.4	1.016
		FIA1-IF11	15	-41.3	-7.9	129.6	L	11.58	2.24	0.039	480.0	505.0	19.5	1.005
		FIA1-IF12	50	-46.5	-7.4	112.5	L	10.98	2.11	0.037	475.0	490.0	19.3	1.012
		FIA1-IF13	100	-40.0	-6.8	114.5	L	10.24	1.95	0.034	468.0	472.0	19.3	1.006
		FIA1-IF14	100	-41.6	-7.0	100.8	L	10.49	2.00	0.035	470.0	478.0	19.1	1.016
		FIA1-IF15	30	-42.0	-6.8	109.8	L	10.24	1.95	0.034	468.0	472.0	19.2	1.009
		FIA1-IF16	15	-38.0	-6.9	102.0	L	10.36	1.98	0.034	469.0	475.0	19.1	1.014
		FIA1-IF17	20	-39.0	-7.6	99.6	L	11.22	2.16	0.038	477.0	496.0	19.1	1.021
		FIA1-IF18	40	-40.1	-6.5	106.1	L	9.86	1.87	0.033	465.0	462.0	19.2	1.009
		FIA1-IF19	35	-44.5	-6.9	101.8	L	10.36	1.98	0.034	469.0	475.0	19.1	1.014
		FIA1-IF20	40	-37.5	-8.3	100.9	L	12.05	2.35	0.041	484.0	517.0	19.2	1.026
		FIA1-IF21	20	-36.0	-7.0	101.4	L	10.49	2.00	0.035	470.0	478.0	19.1	1.015
		FIA1-IF22	25	-42.6	-7.6	108.6	L	11.22	2.16	0.038	477.0	496.0	19.2	1.016
		FIA1-IF23	30	-44.0	-6.6	109.4	L	9.98	1.90	0.033	466.0	465.0	19.2	1.008
		<i>Média</i>	37	-41.2	-7.7	112.5	-	11.27	2.19	0.038	477.9	498.8	19.3	1.014
<i>DP</i>	23	2.5	0.9	12.8	-	1.03	0.23	0.004	9.4	25.7	0.2	0.009		

Continuação: Tabela 6. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo e especularita dos veios que cortam as litologias da SEM.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{f-gelo}	T _H	T _H para	NaCl (eqv)	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d	
		µm	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³	
Morro do Pilar	Especularita de veios hospedados no minério de alto teor compacto	IF1	15	-26.4	-9.8	211.0	L	13.72	2.72	0.047	500.0	558.0	20.7	0.960
		IF2	62	-23.0	-9.0	220.0	L	12.85	2.52	0.043	492.0	536.0	20.9	0.947
		IF3	30	-24.9	-11.5	185.0	L	15.47	3.13	0.053	516.0	603.0	20.3	0.992
		IF4	75	-27.3	-10.7	215.0	L	14.67	2.94	0.050	509.0	582.0	20.8	0.963
		IF5	65	-28.5	-10.5	204.0	L	14.46	2.89	0.050	507.0	577.0	20.6	0.971
		IF6	30	-25.1	-10.3	198.0	L	14.25	2.86	0.049	505.0	572.0	20.5	0.974
		IF7	40	-25.8	-10.2	207.0	L	14.15	2.82	0.048	504.0	569.0	20.7	0.966
		IF8	45	-25.4	-9.2	221.7	L	13.07	2.57	0.044	494.0	542.0	20.9	0.947
		IF9	60	-26.0	-9.5	232.6	L	13.40	2.65	0.046	497.0	550.0	21.2	0.939
		IF10	55	-23.9	-11.5	198.8	L	15.47	3.13	0.053	516.0	603.0	20.5	0.982
		IF11	38	-24.5	-10.7	224.3	L	14.67	2.94	0.050	509.0	582.0	21.0	0.956
		IF12	32	-27.2	-9.5	212.9	L	13.40	2.65	0.046	497.0	550.0	20.8	0.957
		IF13	58	-26.3	-10.5	242.0	L	14.46	2.89	0.050	507.0	577.0	21.4	0.939
		IF14	45	-25.1	-9.2	203.7	L	13.07	2.57	0.044	494.0	542.0	20.6	0.962
		IF15	35	-23.4	-9.4	220.0	L	13.29	2.62	0.045	496.0	574.0	20.9	0.950
		IF16	30	-22.9	-10.8	203.1	L	14.77	2.97	0.051	510.0	585.0	20.6	0.974
		IF17	50	-27.6	-11.1	214.8	L	15.07	3.04	0.052	513.0	593.0	20.8	0.966
	<i>Média</i>	45	-25.5	-10.2	212.6	-	14.13	2.82	0.048	503.9	570.3	20.8	0.961	
	<i>DP</i>	16	1.6	0.8	13.8	-	0.85	0.20	0.003	7.9	20.9	0.2	0.015	

Continuação: Tabela 6. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo e especularita dos veios que cortam as litologias da SEM.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{f-gelo}	T _H	T _H para	NaCl (eqv)	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d		
		µm	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³		
Conceição do Mato Dentro	Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita no minério de ferro de alto teor xistoso	FIA1-IF1	42	-33.1	-9.8	210.0	L	13.72	2.72	0.047	500.0	558.0	20.7	0.961	
		FIA1-IF2	55	-34.6	-9.6	219.0	L	13.51	2.67	0.046	498.0	553.0	20.9	0.952	
		FIA1-IF3	35	-35.0	-9.5	190.0	L	13.40	2.65	0.046	497.0	550.0	20.4	0.975	
		FIA1-IF4	46	-33.3	-9.2	195.0	L	13.07	2.57	0.044	494.0	542.0	20.4	0.969	
		FIA2-IF1	28	-39.0	-8.8	195.0	L	12.62	2.47	0.043	490.0	531.0	20.5	0.966	
		FIA2-IF2	15	-34.0	-9.1	198.0	L	12.96	2.55	0.044	493.0	539.0	20.5	0.966	
		FIA2-IF3	30	-34.1	-9.3	201.0	L	13.18	2.60	0.045	495.0	545.0	20.6	0.965	
		FIA3-IF1	30	-41.2	-4.4	154.1	L	7.02	1.28	0.023	439.0	390.0	19.7	0.961	
		FIA3-IF2	45	-38.5	-4.0	163.0	L	6.45	1.17	0.021	433.0	375.0	19.8	0.951	
		FIA3-IF3	50	-39.2	-3.9	152.8	L	6.30	1.14	0.020	432.0	371.0	19.7	0.958	
		FIA3-IF4	55	-38.0	-4.1	153.8	L	6.59	1.19	0.021	434.0	379.0	19.7	0.959	
		FIA4-IF1	60	-39.4	-9.3	223.5	L	13.18	2.60	0.045	495.0	545.0	21.0	0.946	
		FIA4-IF2	56	-37.8	-8.9	219.0	L	12.73	2.50	0.043	491.0	534.0	20.9	0.947	
		FIA4-IF3	48	-38.0	-8.6	228.0	L	12.39	2.42	0.042	488.0	525.0	21.1	0.936	
		FIA5-IF1	80	-37.0	-9.1	222.6	L	12.96	2.55	0.044	493.0	539.0	20.9	0.945	
		FIA5-IF2	95	-38.4	-8.8	218.5	L	12.62	2.47	0.043	490.0	531.0	20.9	0.946	
		FIA5-IF3	65	-39.3	-8.5	227.5	L	12.28	2.40	0.041	486.0	522.0	21.0	0.936	
		FIA5-IF4	50	-38.8	-8.4	226.0	L	12.16	2.37	0.041	485.0	519.0	21.0	0.936	
			<i>Média</i>	49	-37.2	-8.0	199.8	-	11.51	2.24	0.039	479.6	502.7	20.5	0.954
			<i>DP</i>	19	2.5	2.2	27.0	-	2.74	0.58	0.010	25.1	69.0	0.5	0.012

Tabela 7. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo dos veios que cortam as litologias de Barão de Cocais associadas ao Au-PGE, QF.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{f-gelo}	T _H	T _H para	NaCl (eqv)	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d
		μm	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³
Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita - Bifásica (Tipo 1)	FIA1-IF1	20	-42.2	-3.6	247.5	L	5.78	1.05	0.019	428.0	359.0	21.9	0.857
	FIA1-IF2	30	-41.3	-4.8	262.4	L	7.54	1.39	0.025	444.0	404.0	22.3	0.855
	FIA1-IF3	30	-38.4	-3.2	255.0	L	5.17	0.93	0.017	422.0	344.0	22.3	0.840
	FIA2-IF1	30	-38.7	-5.6	242.0	L	8.65	1.62	0.028	454.0	432.0	21.5	0.891
	FIA2-IF2	15	-42.1	-5.2	187.0	L	8.10	1.51	0.026	449.0	419.0	20.2	0.942
	FIA2-IF3	15	-38.4	-6.8	201.0	L	10.23	1.95	0.034	468.0	472.0	20.5	0.945
	FIA2-IF4	18	-36.9	-6.6	199.6	L	9.97	1.90	0.033	466.0	465.0	20.5	0.944
	FIA3-IF1	40	-43.1	-6.0	247.4	L	9.19	1.73	0.030	459.0	446.0	21.6	0.890
	FIA3-IF2	15	-40.8	-5.9	247.4	L	9.05	1.70	0.030	458.0	442.0	21.6	0.889
	FIA4-IF1	15	-38.2	-5.6	305.0	L	8.65	1.62	0.028	454.0	432.0	23.8	0.805
	FIA4-IF2	80	-43.9	-6.2	272.5	L	9.45	1.79	0.031	461.0	452.0	22.4	0.862
	FIA4-IF3	15	-41.7	-6.1	243.7	L	9.32	1.76	0.031	460.0	449.0	21.5	0.895
	FIA4-IF4	40	-39.2	-6.2	268.8	L	9.45	1.79	0.031	461.0	452.0	22.2	0.866
	FIA5-IF-1	35	-33.5	-5.4	284.0	L	8.38	1.56	0.027	451.0	425.0	22.9	0.834
	FIA5-IF-2	85	-48.8	-6.3	238.0	L	9.58	1.81	0.032	462.0	456.0	21.4	0.904
	FIA5-IF-3	70	-34.8	-6.0	260.0	L	9.19	1.73	0.030	459.0	446.0	22.0	0.875
	FIA6-IF1	20	-33.1	-3.8	156.0	L	6.08	1.11	0.020	430.0	367.0	19.7	0.954
	FIA6-IF2	15	-32.0	-5.0	168.0	L	7.82	1.45	0.025	446.0	411.0	19.9	0.956
	FIA6-IF3	15	-31.3	-4.1	180.0	L	6.52	1.19	0.021	434.0	379.0	20.1	0.937
	FIA6-IF4	40	-33.7	-3.3	267.0	L	5.32	0.96	0.017	423.0	348.0	22.7	0.824
	FIA6-IF5	25	-41.5	-2.6	267.0	L	4.23	0.76	0.013	413.0	320.0	22.9	0.811
FIA6-IF6	20	-40.6	-3.1	267.0	L	5.01	0.90	0.016	420.0	340.0	22.8	0.820	
FIA6-IF7	30	-35.7	-6.6	227.0	L	9.97	1.90	0.033	466.0	465.0	21.1	0.918	
<i>Média</i>	<i>31</i>	<i>-38.7</i>	<i>-5.1</i>	<i>238.8</i>	<i>-</i>	<i>7.94</i>	<i>1.48</i>	<i>0.026</i>	<i>447.3</i>	<i>414.1</i>	<i>21.6</i>	<i>0.883</i>	
<i>DP</i>	<i>21</i>	<i>4.3</i>	<i>1.3</i>	<i>39.0</i>	<i>-</i>	<i>1.85</i>	<i>0.37</i>	<i>0.006</i>	<i>17.0</i>	<i>46.8</i>	<i>1.1</i>	<i>0.048</i>	

Continuação: Tabela 7. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo dos veios que cortam as litologias de Barão de Cocais associadas ao Au-PGE, QF.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{fgelo}	T _H	T _H para	NaCl (eqv)	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d	
		µm	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³	
Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita - Bifásica (Tipo 2)	FIA1-IF1	40	-36.5	-7.0	115.3	L	10.48	2.00	0.035	470.0	478.0	19.3	1.007	
	FIA1-IF2	40	-34.9	-7.1	112.4	L	10.61	2.03	0.035	471.0	481.0	19.2	1.010	
	FIA1-IF3	40	-39.5	-6.2	136.0	L	9.45	1.79	0.031	461.0	452.0	19.5	0.988	
	FIA1-IF4	15	-40.3	-6.4	135.1	L	9.71	1.84	0.032	463.0	459.0	19.5	0.990	
	FIA1-IF5	15	-41.9	-8.1	140.5	L	11.82	2.29	0.040	482.0	511.0	19.6	1.000	
	FIA2-IF1	35	-33.8	-3.1	96.7	L	5.01	0.90	0.016	420.0	340.0	18.9	0.987	
	FIA2-IF2	20	-29.9	-4.3	98.9	L	6.82	1.25	0.022	437.0	386.0	19.0	0.995	
	FIA3-IF1	30	-31.3	-5.8	106.0	L	8.92	1.68	0.029	456.0	439.0	19.1	1.003	
	FIA3-IF2	25	-34.1	-6.4	104.8	L	9.71	1.84	0.032	463.0	459.0	19.1	1.009	
	FIA3-IF3	50	-40.6	-6.1	107.7	L								
	FIA4-IF1	30	-35.7	-6.8	107.6	L	10.23	1.95	0.034	468.0	472.0	19.2	1.010	
	FIA4-IF2	15	-36.7	-5.8	106.3	L	8.92	1.68	0.029	456.0	439.0	19.1	1.003	
	FIA4-IF3	35	-33.9	-6.2	115.6	L	9.45	1.79	0.031	461.0	452.0	19.3	1.001	
	FIA4-IF4	30	-43.2	-6.2	121.5	L	9.45	1.79	0.031	461.0	452.0	19.3	0.997	
	FIA4-IF5	30	-37.0	-6.2	96.1	L	9.45	1.79	0.031	461.0	452.0	19.0	1.012	
	FIA4-IF6	15	-40.0	-6.4	100.3	L	9.71	1.84	0.032	463.0	459.0	19.1	1.011	
	FIA4-IF7	15	-47.8	-6.4	104.9	L	9.71	1.84	0.032	463.0	459.0	19.1	1.009	
	FIA4-IF8	10	-35.8	-6.2	105.3	L	9.45	1.79	0.031	461.0	452.0	19.1	1.007	
	FIA4-IF9	15	-33.0	-7.0	98.3	L	10.48	2.00	0.035	470.0	478.0	19.1	1.017	
	FIA4-IF10	15	-34.8	-6.3	107.1	L	9.58	1.81	0.032	462.0	456.0	19.2	1.007	
	FIA4-IF11	40	-32.1	-6.1	113.2	L	9.32	1.76	0.031	460.0	449.0	19.2	1.002	
	FIA4-IF12	15	-37.0	-6.2	94.0	L	9.45	1.79	0.031	461.0	452.0	19.0	1.013	
	FIA4-IF13	10	-40.1	-5.0	99.0	L	7.82	1.45	0.025	446.0	411.0	19.0	1.001	
	FIA5-IF1	20	-35.1	-6.9	105.3	L	10.36	1.98	0.034	469.0	475.0	19.2	1.012	
	FIA5-IF2	25	-34.2	-6.9	145.9	L	10.36	1.98	0.034	469.0	475.0	19.6	0.987	
	FIA5-IF3	15	-33.2	-6.7	142.1	L								
	FIA5-IF4	30	-32.4	-6.1	136.4	L	9.32	1.76	0.031	460.0	449.0	19.5	0.987	
	FIA5-IF5	32	-33.5	-6.2	145.9	L	9.45	1.79	0.031	461.0	452.0	19.6	0.982	
	FIA5-IF6	45	-31.8	-6.4	135.8	L	9.71	1.84	0.032	463.0	459.0	19.5	0.990	
	FIA5-IF7	15	-33.5	-6.8	145.9	L	10.23	1.95	0.034	468.0	472.0	19.7	0.987	
FIA5-IF8	20	-33.1	-6.3	141.0	L	9.58	1.81	0.032	462.0	456.0	19.6	0.986		
FIA5-IF9	35	-32.9	-6.9	115.0	L	10.36	1.98	0.034	469.0	475.0	19.3	1.007		
FIA5-IF10	25	-33.6	-6.1	152.0	L	9.32	1.76	0.031	460.0	449.0	19.7	0.977		
FIA5-IF11	18	-34.1	-6.5	163.0	L	9.84	1.87	0.033	465.0	462.0	19.9	0.972		

Continuação: Tabela 7. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo dos veios que cortam as litologias de Barão de Cocais associadas ao Au-PGE, QF.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{rgelo}	T _H	T _H para	NaCl (eqv)	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d
		µm	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³
Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita - Bifásica (Tipo 2)	FIA5-IF12	28	-32.8	-6.8	141.0	L	10.23	1.95	0.034	468.0	472.0	19.6	0.990
	FIA6-IF1	42	-41.7	-7.0	195.0	L	10.48	2.00	0.035	470.0	478.0	20.4	0.951
	FIA6-IF2	35	-41.1	-2.7	145.0	L	4.39	0.79	0.014	415.0	324.0	19.5	0.953
	FIA6-IF3	25	-41.0	-6.9	>275	L	10.36	1.98	0.034	469.0	475.0	22.3	0.868
	FIA6-IF4	20	-42.4	-6.5	268.0	L	9.84	1.87	0.033	465.0	462.0	22.2	0.871
	FIA6-IF5	15	-41.6	-5.8	205.0	L	8.92	1.68	0.029	456.0	439.0	20.6	0.932
	FIA1-IF1	15	-35.0	-5.3	107.5	L	8.24	1.54	0.027	450.0	422.0	19.1	0.998
	FIA1-IF2	15	-35.0	-5.3	107.5	L	8.24	1.54	0.027	450.0	422.0	19.1	0.998
	FIA1-IF3	10	-35.0	-5.6	107.5	L	8.65	1.62	0.028	454.0	432.0	19.1	1.001
	FIA1-IF4	15	-35.0	-6.5	107.5	L	9.84	1.87	0.033	465.0	462.0	19.2	1.008
	FIA2-IF1	15	-52.0	-7.8	100.0	L	11.46	2.22	0.038	479.0	502.0	19.1	1.023
	FIA2-IF2	100	-50.0	-7.5	115.0	L	11.10	2.14	0.037	476.0	493.0	19.3	1.011
	FIA2-IF3	25	-52.0	-4.2	107.3	L	6.67	1.22	0.022	436.0	382.0	19.1	0.990
	FIA3-IF1	25	-43.0	-5.3	107.5	L	8.24	1.54	0.027	450.0	422.0	19.1	0.998
	FIA3-IF2	10	-43.0	-5.9	107.5	L	9.05	1.70	0.030	458.0	442.0	19.2	1.003
	FIA3-IF3	10	-40.0	-6.0	107.5	L	9.19	1.73	0.030	459.0	446.0	19.2	1.004
	FIA4-IF1	20	-38.0	-5.1	107.5	L	7.96	1.48	0.026	448.0	415.0	19.1	0.997
	FIA4-IF2	23	-34.0	-5.5	107.5	L	8.51	1.59	0.028	453.0	429.0	19.2	1.000
	FIA1-IF1	45	-39.7	-7.2	87.6	L	10.73	2.06	0.036	473.0	484.0	19.0	1.025
	FIA1-IF2	35	-38.6	-10.5	88.8	L	14.47	2.89	0.050	507.0	577.0	19.0	1.053
FIA1-IF3	50	-33.5	-9.2	94.1	L	13.08	2.57	0.044	494.0	542.0	19.1	1.038	
FIA1-IF4	20	-38.8	-7.8	94.1	L	11.46	2.22	0.038	479.0	502.0	19.1	1.026	
FIA1-IF5	10	-37.3	-7.2	94.1	L	10.73	2.06	0.036	473.0	484.0	19.1	1.021	
FIA1-IF6	20	-39.0	-5.5	76.6	L	8.51	1.59	0.028	453.0	429.0	18.8	1.017	
FIA1-IF7	20	-35.0	-5.7	94.1	L	8.79	1.65	0.029	455.0	436.0	19.0	1.009	
FIA1-IF8	50	-36.0	-4.3	94.1	L	6.82	1.25	0.022	437.0	386.0	19.0	0.998	
FIA1-IF9	40	-32.0	-7.8	94.1	L	11.46	2.22	0.038	479.0	502.0	19.1	1.026	
FIA1-IF10	35	-36.0	-8.1	94.1	L	11.82	2.29	0.040	482.0	511.0	19.1	1.029	

Continuação: Tabela 7. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo dos veios que cortam as litologias de Barão de Cocais associadas ao Au-PGE, QF.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{f-gelo}	T _H	T _H para	NaCl (eqv)	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d
		µm	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³
Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita - Bifásica (Tipo 2)	FIA2-IF1	50	-36.0	-7.1	93.6	L	10.61	2.03	0.035	471.0	481.0	19.0	1.021
	FIA2-IF2	25	-34.0	-6.3	99.8	L	9.58	1.81	0.032	462.0	456.0	19.1	1.011
	FIA2-IF3	50	-35.0	-9.0	98.4	L	12.86	2.52	0.043	492.0	536.0	19.1	1.034
	FIA2-IF4	25	-36.4	-8.1	114.2	L	11.82	2.29	0.040	482.0	511.0	19.3	1.017
	FIA1-IF1	40	-43.6	-10.4	105.8	L	14.36	2.87	0.049	506.0	574.0	19.2	1.040
	FIA1-IF2	30	-40.0	-10.3	98.8	L	14.26	2.85	0.049	505.0	572.0	19.1	1.045
	FIA1-IF3	20	-40.6	-10.9	94.8	L	14.88	2.99	0.051	511.0	587.0	19.1	1.052
	FIA1-IF4	25	-44.0	-10.5	93.0	L	14.47	2.89	0.050	507.0	577.0	19.1	1.050
	FIA2-IF1	30	-39.0	-10.2	99.7	L	14.16	2.82	0.048	504.0	569.0	19.1	1.043
	FIA2-IF2	18	-38.6	-11.2	101.8	L	15.18	3.06	0.052	513.0	595.0	19.2	1.050
	FIA2-IF3	25	-41.0	-12.0	96.2	L	15.96	3.25	0.055	521.0	616.0	19.1	1.061
	FIA2-IF4	20	-43.3	-10.9	100.3	L	14.88	2.99	0.051	511.0	587.0	19.2	1.048
	FIA2-IF5	10	-40.5	-11.2	99.5	L	15.18	3.06	0.052	513.0	595.0	19.1	1.051
	<i>Média</i>	27	-37.7	-6.9	114.9	-	10.29	1.98	0.034	468.7	473.2	19.3	1.004
	<i>DP</i>	14	4.7	1.9	29.4	-	2.32	0.50	0.008	21.1	57.8	0.6	0.033

Tabela 8. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo do veio de Gongo Soco associado ao Au-PGE, QF.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{f-gelo}	T _H	T _H para	NaCl (eqv)	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d	
		μm	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³	
Quartzo de veio de quartzo-especularita	FIA1-IF1	30	-39.0	-7.7	136.0	L	11.34	2.19	0.038	478.0	499.0	19.6	1.000	
	FIA1-IF2	15	-41.1	-6.5	117.5	L	9.86	18.87	0.033	465.0	462.0	19.3	1.002	
	FIA1-IF3	20	-37.0	-8.3	130.0	L	12.05	2.35	0.041	484.0	517.0	19.5	1.008	
	FIA1-IF4	25	-42.0	-7.4	117.5	L	10.98	2.11	0.037	475.0	490.0	19.3	1.009	
	FIA1-IF5	15	-39.5	-6.5	112.4	L	9.86	1.87	0.033	465.0	462.0	19.3	1.005	
	FIA1-IF6	30	-36.5	-7.9	102.0	L	11.58	2.24	0.039	480.0	505.0	19.2	1.022	
	FIA1-IF7	15	-42.8	-12.5	117.5	L	16.43	3.36	0.057	526.0	629.0	19.4	1.049	
	FIA1-IF8	20	-39.0	-7.9	104.3	L	11.58	-	-	-	-	-	-	-
	FIA1-IF9	18	-37.8	-6.5	117.5	L	9.86	2.24	0.039	480.0	505.0	19.2	1.021	
	FIA1-IF10	18	-36.7	-8.3	117.5	L	12.05	2.35	0.041	484.0	517.0	19.4	1.016	
	FIA1-IF11	23	-38.1	-8.9	101.5	L	12.73	2.50	0.043	491.0	534.0	19.2	1.031	
	FIA1-IF12	20	-37.6	-9.0	122.0	L	12.85	2.52	0.043	492.0	536.0	19.4	1.019	
	FIA1-IF13	13	-36.0	-9.2	105.0	L	13.07	2.57	0.044	494.0	542.0	19.2	1.031	
	FIA1-IF14	15	-41.5	-7.4	100.7	L	10.98	2.11	0.037	475.0	490.0	19.2	1.019	
	FIA1-IF15	20	-35.4	-11.0	128.8	L	14.97	3.01	0.052	512.0	590.0	19.6	1.029	
	FIA1-IF16	18	-39.1	-12.5	131.6	L	16.43	3.36	0.057	526.0	629.0	19.6	1.038	
	FIA1-IF17	20	-44.5	-11.1	128.0	L	15.07	3.04	0.052	513.0	593.0	19.5	1.031	
	FIA1-IF18	13	-41.3	-9.2	109.8	L	13.07	2.57	0.044	494.0	542.0	19.3	1.028	
	FIA1-IF19	15	-42.0	-9.2	127.2	L	13.07	2.57	0.044	494.0	542.0	19.5	1.017	
	FIA1-IF20	20	-43.1	-11.4	126.2	L	15.37	3.11	0.053	515.0	600.0	19.5	1.034	
	FIA1-IF21	22	-36.0	-10.6	122.0	L	14.57	2.92	0.050	508.0	579.0	19.4	1.031	
	FIA1-IF22	25	-37.5	-9.2	131.4	L	13.07	2.57	0.044	494.0	542.0	19.5	1.014	
	FIA1-IF23	20	-38.0	-11.8	128.0	L	15.76	3.20	0.055	519.0	611.0	19.5	1.036	
	FIA1-IF24	33	-36.9	-11.0	123.6	L	14.97	3.01	0.052	512.0	590.0	19.5	1.033	

Continuação: Tabela 8. Resultados microtermométricos das inclusões fluidas em quartzo do veio de Gongo Soco associado ao Au-PGE, QF.

Amostra	IF	Tamanho	T _{eut}	T _{f-gelo}	T _H	T _H para	NaCl (eqv)	M _{NaCl}	X _{NaCl}	T _c	P _c	V _{molar}	d
		µm	°C	°C	°C		%p/p	mol/kg		°C	°C	cm ³ /mol	g/cm ³
Quartzo de veio de quartzo-especularita	FIA2-IF1	110	-33.9	-9.0	113.8	L	12.85	2.52	0.043	492.0	536.0	19.3	1.024
	FIA2-IF2	80	-42.0	-8.7	113.8	L	12.51	2.45	0.042	489.0	528.0	19.3	1.022
	FIA2-IF3	56	-42.3	-9.2	117.0	L	13.07	2.57	0.044	494.0	542.0	19.3	1.023
	FIA2-IF4	40	-40.5	-10.4	132.0	L	14.36	2.87	0.049	506.0	574.0	19.6	1.023
	FIA2-IF5	60	-36.5	-9.4	128.4	L	13.29	2.62	0.045	496.0	547.0	19.5	1.018
	FIA2-IF6	28	-35.5	-9.3	123.0	L	13.18	2.60	0.045	495.0	545.0	19.4	1.020
	FIA2-IF7	40	-38.0	-7.8	109.3	L	11.46	2.22	0.038	479.0	502.0	19.2	1.017
	FIA2-IF8	30	-37.0	-9.4	97.7	L	13.29	2.62	0.045	496.0	547.0	19.1	1.037
	FIA2-IF9	120	-33.3	-9.7	113.8	L	13.62	2.70	0.046	499.0	555.0	19.3	1.029
	FIA2-IF10	130	-38.0	-9.0	132.0	L	12.85	2.52	0.043	492.0	536.0	19.5	1.012
	FIA3-IF1	28	-39.0	-9.8	126.0	L	13.72	2.72	0.047	500.0	558.0	19.5	1.022
	FIA3-IF2	26	-38.2	-10.1	142.0	L	14.04	2.80	0.048	503.0	566.0	19.7	1.014
	FIA3-IF3	50	-38.5	-9.4	140.0	L	13.29	2.62	0.045	496.0	547.0	19.6	1.010
	FIA3-IF4	15	-37.8	-9.2	115.0	L	13.07	2.57	0.044	494.0	542.0	19.3	1.025
	FIA3-IF5	30	-38.7	-7.8	119.0	L	11.46	2.22	0.038	479.0	502.0	19.3	1.011
	<i>Média</i>	<i>34</i>	<i>-38.7</i>	<i>-9.2</i>	<i>120.0</i>	<i>-</i>	<i>13.02</i>	<i>3.03</i>	<i>0.044</i>	<i>494.4</i>	<i>543.0</i>	<i>19.4</i>	<i>1.022</i>
<i>DP</i>	<i>29</i>	<i>2.6</i>	<i>1.5</i>	<i>11.1</i>	<i>-</i>	<i>1.68</i>	<i>2.66</i>	<i>0.006</i>	<i>15.0</i>	<i>40.8</i>	<i>0.1</i>	<i>0.011</i>	

ANEXO 4. RESULTADOS DE LA-ICP-MS NAS INCLUSÕES FLUIDAS DE QUARTZO E ESPECULARITA

Tabela 1. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em quartzo do veio que corta o itabirito dolomítico do depósito de Esperança, QF.

IF	FIA1-IF1	FIA1-IF3	FIA1-IF4	FIA1-IF2	FIA5-IF2	FIA5-IF5	FIA5-IF7	FIA5-IF3	FIA4-IF5	FIA5-IF6	FIA6-IF1	FIA6-IF2	FIA6-IF3
NaCl _{eqv}	17,34	17,08	17,60	17,00	17,00	16,10	16,10	15,70	16,80	16,50	17,10	15,80	16,50
Li (ppm)	546,52	1.135,07	218,24	168,35	237,96	284,30	161,81	58,37	341,26	239,09	117,05	238,37	208,69
1σ	67,33	103,87	86,33	22,65	64,91	45,29	74,23	111,96	23,61	65,99	34,60	98,52	35,54
LD	1,56	1,13	0,39	0,30	1,54	1,07	13,14	2,55	0,33	0,70	1,36	0,26	1,09
B (ppm)	1.458,39	6.456,82	2.320,21	583,36	1.555,72	691,08	832,59	<LD	653,31	335,80	1.138,23	833,27	952,87
1σ	197,48	383,68	399,83	105,21	354,03	181,16	350,28	<LD	59,80	303,93	168,01	326,84	146,77
LD	6,84	5,76	2,28	2,18	11,02	8,61	83,04	19,94	3,11	8,11	9,32	2,22	10,83
Na (ppm)	49.929,78	67.270,53	40.200,48	9.327,24	14.475,14	53.681,90	57.160,71	47.386,31	36.055,95	16.988,50	67.270,53	33.339,29	51.546,54
1σ	424,21	540,16	615,16	122,99	316,82	358,89	849,16	977,38	159,25	360,63	438,19	441,90	341,78
LD	1,73	1,29	0,70	0,36	1,84	1,40	14,03	3,10	0,50	1,19	1,51	0,39	1,63
Mg (ppm)	901,63	615,80	459,67	85,63	24,49	41,19	32,10	209,14	40,22	632,26	17,69	70,57	19,26
1σ	71,71	63,47	94,55	15,12	23,12	15,48	29,09	84,83	7,22	88,00	10,89	33,12	12,25
LD	0,51	0,69	0,26	0,04	0,23	0,59	8,02	1,18	0,31	0,52	0,79	0,19	1,14
S (ppm)	<LD	13.462,13	35.564,85	<LD	28.600,25	18.409,14	8.620,35	28.611,82	5.841,53	15.681,88	10.512,79	<LD	9.330,78
1σ	<LD	867,98	2.514,58	<LD	2.861,40	1.555,63	2.581,52	9.025,71	377,56	2.792,99	1.103,08	<LD	940,70
LD	56,23	43,73	20,98	20,42	102,53	79,00	671,05	183,84	30,22	70,76	84,70	20,33	87,21
K (ppm)	10.213,86	413.004,89	46.409,22	120.696,60	119.619,49	10.396,96	7.866,52	36.431,87	66.310,23	123.401,91	7.590,89	16.525,43	11.386,77
1σ	1.856,91	1.928,36	3.930,58	1.258,36	4.063,87	2.165,25	3.628,88	12.619,77	561,50	4.022,42	1.545,80	3.962,07	1.336,64
LD	92,19	73,45	35,43	28,89	145,09	111,45	947,06	260,26	42,78	101,08	121,52	29,18	125,78
Ca (ppm)	10.226,41	19.883,97	5.809,56	19.289,06	6.279,78	5.802,17	<LD	<LD	5.876,30	<LD	<LD	36.919,63	11.392,57
1σ	7.334,35	5.943,50	18.019,27	4.842,62	13.321,67	7.399,56	<LD	<LD	2.246,38	<LD	<LD	17.588,69	4.966,68
LD	333,78	265,50	129,08	89,51	450,08	350,35	3.060,17	835,44	141,81	334,44	392,70	95,36	412,40
Cu (ppm)	566,27	1.453,93	271,03	29,27	<LD	181,06	528,13	26,48	<LD	106,96	188,59	333,53	68,31
1σ	80,94	130,70	102,47	21,27	<LD	51,83	157,47	196,17	<LD	69,64	46,99	90,53	32,81
LD	1,97	1,62	0,68	0,36	1,85	2,19	24,27	5,24	0,71	1,54	2,52	0,53	2,96
Zn (ppm)	<LD	56,57	<LD	53,62	<LD	83,21	348,69	<LD	7,91	<LD	38,22	109,97	33,19
1σ	<LD	59,98	<LD	47,29	<LD	84,12	177,72	<LD	20,91	<LD	66,22	155,42	54,75
LD	4,18	3,17	1,47	1,19	6,04	4,35	43,28	11,51	1,78	4,55	5,57	1,34	5,53
As (ppm)	8.965,46	6.421,07	6.104,38	561,17	1.048,84	1.573,31	2.587,85	1.013,31	276,52	318,38	471,75	828,24	1.242,55
1σ	207,62	190,06	273,34	31,13	98,69	72,99	202,19	241,12	17,11	75,71	46,85	92,57	60,65
LD	1,60	1,29	0,56	0,38	1,95	1,62	15,87	4,33	0,63	1,55	2,23	0,49	1,96
Sr (ppm)	63,94	1.070,68	198,07	228,57	84,35	49,03	10,30	<LD	93,41	312,81	26,61	102,03	73,32
1σ	10,62	47,58	30,41	11,39	17,72	8,26	9,33	<LD	5,82	34,49	6,76	18,83	9,54
LD	0,35	0,27	0,07	0,06	0,06	0,19	2,57	0,73	0,09	0,07	0,31	0,07	0,37
Sb (ppm)	32,16	29,36	52,61	<LD	34,11	15,14	15,81	<LD	<LD	<LD	11,03	3,81	9,63
1σ	18,83	14,67	34,94	<LD	30,00	17,79	31,05	<LD	<LD	<LD	13,42	33,16	11,81
LD	0,78	0,76	0,32	0,20	1,04	0,96	9,37	2,53	0,39	0,84	1,12	0,25	1,20
Cs (ppm)	146,17	400,20	101,19	105,27	89,29	103,36	71,65	29,91	122,32	20,30	142,08	90,71	102,40
1σ	14,17	25,24	21,21	6,77	15,90	10,44	19,48	31,21	5,70	10,67	12,33	15,07	9,27
LD	0,33	0,26	0,11	0,07	0,33	0,24	2,72	0,56	0,10	0,24	0,29	0,07	0,25
Ba (ppm)	4.457,02	658,53	285,42	128,65	<LD	<LD	<LD	52,30	95,19	40,01	73,42	242,01	121,16
1σ	241,51	103,24	116,00	25,91	<LD	<LD	<LD	163,86	16,42	47,87	32,87	94,16	38,78
LD	2,49	1,86	0,71	0,60	3,07	1,75	21,40	3,70	0,52	1,36	2,33	0,65	3,01

Tabela 2. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em quartzo do veio que corta o minério de alto teor do depósito de Esperança, QF.

IF	FIA1-IF1	FIA1-IF3	FIA1-IF5	FIA1-IF2	FIA1-IF10	FIA1-IF6	FIA1-IF6	FIA2-IF4	FIA1-IF5	FIA1-IF9	FIA1-IF11	FIA2-IF3	FIA2-IF5	FIA3-IF3	FIA5-IF5
NaCl _{eqv}	14,60	14,60	14,60	13,40	14,50	14,55	14,55	14,55	14,20	14,60	13,50	14,80	13,60	13,60	13,60
Li (ppm)	106,94	71,19	153,90	156,42	101,13	276,08	405,31	111,85	113,41	128,65	91,88	136,61	49,36	107,43	95,38
l σ	12,50	12,37	63,06	20,08	23,92	43,48	71,34	42,20	48,26	10,43	9,44	9,01	16,16	18,21	27,47
LD	0,77	1,06	18,01	0,40	13,82	1,61	1,05	8,22	1,56	0,80	2,45	1,80	-16,38	0,49	1,22
B (ppm)	544,03	1.771,32	1.464,92	738,37	1.730,15	1.467,77	1.659,41	1.303,70	924,22	886,00	371,32	1.249,28	687,60	792,09	826,34
l σ	51,57	91,35	328,68	114,32	159,11	177,69	237,52	254,03	316,34	42,83	34,20	42,90	95,71	126,35	169,05
LD	3,88	5,40	90,38	3,02	96,53	12,61	6,14	57,17	12,90	3,91	12,88	8,84	-83,79	2,76	6,62
Na (ppm)	51.416,06	48.601,86	40.633,45	44.957,75	43.912,61	44.039,22	49.287,51	37.551,60	47.985,91	50.952,18	46.561,93	58.222,45	44.892,05	44.684,80	42.349,99
l σ	175,27	195,43	600,62	169,08	326,04	366,92	532,32	500,94	600,20	139,19	137,30	128,19	295,72	230,35	364,58
LD	1,11	1,54	24,70	0,75	22,77	3,35	1,58	15,02	2,47	0,91	3,20	2,02	-20,10	0,67	1,61
Mg (ppm)	<LD	2,60	<LD	200,07	<LD	<LD	3,90	<LD	26,56	441,46	6,00	27,23	41,24	24,52	65,09
l σ	<LD	5,87	<LD	15,85	<LD	<LD	6,49	<LD	27,47	15,15	2,91	3,33	11,82	10,08	19,13
LD	0,49	0,67	11,39	0,32	8,96	1,83	1,01	8,73	1,29	0,46	1,44	0,90	-11,00	0,33	0,82
S (ppm)	2.353,63	4.246,53	23.919,48	<LD	6.311,36	9.984,93	<LD	18.846,53	4.902,96	260,05	1.897,83	313,07	4.994,90	<LD	<LD
l σ	284,11	352,69	2.033,38	<LD	586,13	930,25	<LD	1.408,18	1.880,16	128,06	175,42	48,05	430,29	<LD	<LD
LD	35,50	49,78	741,59	24,66	678,41	104,54	43,63	449,04	81,71	26,84	107,31	55,60	-619,07	22,19	51,45
K (ppm)	8.985,04	11.948,74	22.101,46	2.217,63	13.425,54	8.793,24	10.028,05	8.144,95	14.699,48	10.087,65	10.059,24	12.508,83	9.357,28	11.352,43	12.161,47
l σ	503,71	629,33	3.673,88	1.674,18	1.178,50	1.866,11	1.875,52	2.836,19	3.827,35	267,20	323,05	105,21	808,62	1.424,04	1.716,61
LD	64,61	90,61	1.350,78	45,83	1.363,71	213,80	89,25	918,40	169,65	56,20	195,94	102,81	-1.159,30	41,55	96,35
Ca (ppm)	2.183,00	512,04	9.104,34	8.937,86	7.428,00	11.377,57	<LD	24.602,27	<LD	311,14	2.821,21	1.015,13	6.405,19	4.708,81	8.167,23
l σ	2.037,50	2.462,14	13.229,60	6.115,05	4.291,97	7.003,66	<LD	10.410,80	<LD	1.049,56	1.186,49	344,19	2.807,23	5.619,06	6.668,09
LD	233,17	326,78	4.906,83	166,61	4.996,30	767,10	325,51	3.313,30	614,57	202,24	707,43	370,43	-4.092,12	145,34	338,25
Cu (ppm)	7,43	16,02	<LD	<LD	29,22	<LD	43,25	<LD	<LD	2,81	64,75	21,38	31,96	14,61	116,63
l σ	9,32	11,87	<LD	<LD	22,62	<LD	29,60	<LD	<LD	5,51	9,34	4,21	16,48	24,40	40,66
LD	1,10	1,52	27,14	0,83	27,10	5,21	2,66	24,02	3,14	0,72	2,90	2,48	-21,84	0,66	1,64
Zn (ppm)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	33,86	<LD	115,26	<LD	18,25	22,86	<LD	8,35	100,65	107,87
l σ	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	76,10	<LD	116,84	<LD	11,86	13,47	<LD	32,92	55,63	71,11
LD	3,04	4,24	66,66	2,11	58,66	8,69	4,14	39,08	7,50	2,49	8,24	4,94	-53,25	1,77	4,23
As (ppm)	362,88	441,38	518,80	296,95	489,85	513,71	342,63	671,40	496,67	309,43	694,80	457,55	115,33	332,37	454,16
l σ	19,02	23,82	95,16	28,34	41,87	50,71	59,16	81,47	84,90	12,78	19,73	13,01	21,07	29,68	48,70
LD	1,07	1,49	23,62	0,73	21,91	2,62	1,32	12,02	2,60	0,95	3,02	2,09	-21,13	0,70	1,67
Sr (ppm)	52,58	72,07	38,70	72,91	61,16	30,68	3,48	62,72	80,86	59,71	26,21	67,00	58,68	86,45	56,50
l σ	3,95	5,29	13,76	5,86	8,78	7,45	4,51	15,02	19,03	3,33	2,34	2,99	7,41	7,16	9,59
LD	0,12	0,17	3,07	0,11	3,84	0,48	0,29	2,37	0,43	0,16	0,49	0,33	-3,27	0,10	0,24
Sb (ppm)	8,08	7,92	50,02	28,01	<LD	<LD	<LD	<LD	16,96	8,24	11,67	9,17	13,73	33,38	20,17
l σ	4,91	5,99	36,49	15,00	<LD	<LD	<LD	<LD	32,03	2,46	3,14	1,55	7,91	10,95	13,77
LD	0,61	0,85	13,66	0,49	14,52	1,97	0,96	8,96	1,48	0,58	1,71	1,11	-11,12	0,36	0,87
Cs (ppm)	50,17	77,39	46,68	54,33	96,97	79,15	113,90	39,47	60,69	97,45	62,04	97,40	76,59	88,16	81,19
l σ	3,49	4,90	14,61	5,70	9,59	10,46	15,91	12,29	14,91	3,67	3,10	3,14	7,53	7,13	10,53
LD	0,17	0,23	3,88	0,15	4,09	0,67	0,34	3,08	0,51	0,15	0,48	0,36	-3,88	0,12	0,30
Ba (ppm)	10,94	29,53	181,62	101,00	27,67	<LD	<LD	<LD	23,39	<LD	19,32	5,11	48,72	<LD	261,46
l σ	11,22	14,58	84,26	35,91	20,53	<LD	<LD	<LD	58,13	<LD	6,83	2,47	22,46	<LD	62,40
LD	0,89	1,22	22,35	1,15	23,53	5,21	2,83	24,63	4,39	1,19	3,35	2,82	-28,41	0,86	2,13

Tabela 3. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em especularita do depósito de Esperança, QF.

IF	FI5	FI2	FI4	FI3	FI1	FI9	FI10	FI11	FI7	FI8	FI12	FI13	FI1	FI2	FI7	FI16	FI15
NaCl _{equiv}	10,50	9,50	9,50	9,70	9,00	8,40	8,10	8,40	9,30	8,00	8,80	8,60	8,80	9,00	10,60	11,80	11,50
Li (ppm)	154,86	246,88	256,59	426,78	143,57	924,08	1.194,06	989,52	869,70	777,96	347,41	589,09	272,53	372,59	216,14	664,54	314,81
1σ	61,12	36,92	108,99	56,42	45,97	15,15	22,60	20,51	16,12	22,31	14,12	21,50	27,46	30,38	109,75	53,19	61,04
LD	0,29	0,18	0,14	0,21	0,36	0,04	0,15	0,19	0,18	0,20	0,28	0,20	0,89	0,74	0,08	0,07	0,15
B (ppm)	<LD	286,15	602,90	508,07	196,05	684,60	1.030,01	778,26	812,89	634,62	550,22	676,69	701,19	344,47	2.977,69	850,27	388,38
1σ	<LD	200,55	902,32	216,91	230,26	21,55	32,99	36,33	26,55	34,27	28,65	40,35	76,29	68,54	1.270,36	145,90	259,78
LD	2,62	2,56	1,85	2,76	4,44	1,68	1,74	2,27	2,09	2,12	2,69	2,81	17,72	22,03	0,96	1,07	2,26
Na (ppm)	13.597,08	35.613,24	34.389,29	35.568,04	9.433,56	27.375,75	24.842,39	26.036,82	30.708,70	26.099,50	28.944,10	29.721,77	26.040,01	27.216,93	9.799,04	36.189,98	14.263,84
1σ	280,61	243,70	516,76	320,81	232,94	52,96	72,62	67,61	61,98	83,68	83,38	98,83	175,14	167,91	487,66	240,41	267,70
LD	0,36	0,35	0,26	0,37	0,65	0,20	0,21	0,28	0,27	0,30	0,39	0,35	2,24	2,91	0,14	0,15	0,30
Mg (ppm)	23,55	80,34	120,76	52,68	102,14	15,76	<LD	<LD	7,11	17,12	15,19	11,04	8,04	15,28	17.851,99	32,59	440,06
1σ	53,84	21,01	75,99	28,82	39,42	3,31	<LD	<LD	3,18	4,85	4,45	6,13	6,33	7,20	899,10	60,49	111,77
LD	0,15	0,11	0,09	0,14	0,31	0,06	0,07	0,10	0,12	0,11	0,19	0,13	1,18	1,15	0,07	0,05	0,11
S (ppm)	<LD	<LD	<LD	<LD	12.206,36	<LD	1.395,96	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	1.553,38	1.607,99	4.325,36	<LD	52.236,49
1σ	<LD	<LD	<LD	<LD	1.824,81	<LD	120,33	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	360,01	484,71	12.538,07	<LD	2.398,87
LD	19,90	19,08	13,53	21,86	34,35	13,19	13,57	19,54	19,56	19,49	25,41	27,14	144,57	183,44	8,36	10,08	19,73
K (ppm)	<LD	<LD	<LD	<LD	4.039,41	5.921,13	5.701,69	4.176,47	7.427,50	4.193,73	7.777,02	4.614,92	10.068,46	10.653,95	25.339,95	6.536,06	4.638,80
1σ	<LD	<LD	<LD	<LD	2.338,00	117,16	152,28	299,46	172,58	219,67	152,33	271,45	445,46	588,45	12.921,75	1.346,91	2.503,87
LD	27,08	26,07	18,49	29,63	46,07	17,35	17,45	24,37	24,40	23,98	31,03	32,51	176,37	221,75	9,74	11,52	22,49
Ca (ppm)	49.804,91	<LD	<LD	<LD	42.425,87	963,44	1.409,32	4.274,35	<LD	2.363,23	2.037,28	<LD	4.951,60	5.209,95	<LD	8.683,53	50.117,28
1σ	55.690,44	<LD	<LD	<LD	22.610,73	923,09	1.317,44	2.362,69	<LD	1.674,10	1.231,92	<LD	4.008,48	4.926,52	<LD	13.109,11	25.516,63
LD	278,61	236,68	172,85	255,27	427,75	169,97	143,87	238,64	211,19	224,88	267,62	293,84	1.692,68	1.840,48	100,37	112,75	216,45
Cu (ppm)	233,02	84,04	366,15	58,20	49,32	1,16	1,71	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	9,67	7.752,03	<LD	6,50
1σ	104,83	35,22	156,40	44,08	43,69	1,60	3,40	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	8,28	727,91	<LD	26,23
LD	0,47	0,46	0,35	0,51	0,83	0,28	0,23	0,34	0,40	0,43	0,42	0,43	3,65	3,72	0,12	0,20	0,35
Zn (ppm)	<LD	225,33	<LD	97,22	152,96	<LD	<LD	<LD	5,58	2,69	<LD	<LD	<LD	<LD	13.094,55	<LD	58,23
1σ	<LD	76,08	<LD	85,97	88,10	<LD	<LD	<LD	5,31	6,47	<LD	<LD	<LD	<LD	1.038,76	<LD	109,92
LD	1,11	0,89	0,66	1,18	1,86	0,62	0,54	0,72	0,84	0,80	1,09	1,08	7,05	8,44	0,36	0,45	0,81
As (ppm)	796,48	1.661,48	2.724,50	2.006,28	1.430,43	719,15	1.021,84	559,06	515,16	444,21	97,34	463,53	582,90	339,70	4.272,07	869,44	830,65
1σ	120,45	69,64	223,04	96,22	110,33	10,06	15,81	12,65	9,57	12,82	5,70	14,35	31,15	24,20	425,73	55,72	83,84
LD	0,42	0,41	0,30	0,47	0,78	0,26	0,23	0,32	0,34	0,35	0,44	0,42	2,99	3,66	0,16	0,17	0,34
Sr (ppm)	82,77	157,13	243,40	363,56	49,98	66,83	71,85	53,67	67,84	60,52	31,37	53,54	30,29	102,25	169,88	52,14	41,44
1σ	18,40	11,98	32,39	23,76	12,72	1,91	2,64	2,26	2,14	2,97	2,01	3,11	4,33	7,49	42,97	6,94	11,29
LD	0,05	0,05	0,04	0,05	0,08	0,03	0,02	0,04	0,04	0,05	0,06	0,02	0,43	0,16	0,01	0,02	0,04
Sb (ppm)	<0.28029	216,17	213,97	110,59	44,25	7,18	6,40	<LD	7,48	1,51	<LD	<LD	<LD	<LD	921,22	12,64	74,84
1σ	<0.28029	36,39	147,15	46,44	48,01	1,27	1,94	<LD	1,30	1,78	<LD	<LD	<LD	<LD	234,59	13,24	28,09
LD	0,28	0,27	0,20	0,24	0,43	0,12	0,12	0,17	0,20	0,19	0,24	0,23	1,71	1,93	0,09	0,11	0,20
Cs (ppm)	8,29	24,65	51,98	34,76	18,40	72,75	95,98	61,95	75,95	56,80	49,90	55,43	51,77	64,14	<LD	81,77	18,35
1σ	12,60	6,14	24,37	6,99	7,29	1,76	2,65	2,18	2,00	2,52	2,24	2,76	5,08	5,33	<LD	7,91	8,50
LD	0,07	0,08	0,06	0,07	0,11	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,07	0,56	0,59	0,02	0,03	0,06
Ba (ppm)	<LD	238,25	92,74	103,71	692,27	20,28	<LD	2,35	3,54	<LD	<LD	<LD	<LD	54,86	8.519,65	218,47	26,57
1σ	<LD	53,09	171,52	44,19	125,59	4,41	<LD	3,03	1,70	<LD	<LD	<LD	<LD	16,43	823,05	47,90	53,88
LD	0,48	0,57	0,43	0,60	0,71	0,35	0,34	0,24	0,42	0,45	0,67	0,59	3,54	3,80	0,16	0,23	0,52

Tabela 4. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em quartzo do veio que corta o minério de alto teor do depósito de Catas Altas, QF.

IF	FIA1-IF6	FIA1-IF5	FIA1-IF4	FIA1-IF10	FIA1-IF9	FIA1-IF1	FIA1-IF2	FIA1-IF7	FIA3-IF1	FIA3-IF2	FIA3-IF3
NaCl _{eqv}	12,85	11,38	12,32	12,59	12,98	12,72	11,51	12,85	5,59	4,88	5,94
Li (ppm)	95,53	125,04	144,91	262,42	181,44	208,21	50,52	184,86	86,12	117,74	159,41
l σ	46,30	8,27	56,41	58,48	27,00	5,30	85,34	48,67	4,71	17,88	9,12
LD	1,53	0,07	0,15	0,20	0,16	0,10	0,18	0,16	0,17	0,23	0,42
B (ppm)	NA	199,02	1.510,54	99,05	615,07	292,06	3.815,62	303,81	104,86	247,56	125,71
l σ		33,38	385,53	365,04	168,58	9,22	980,33	298,64	15,35	229,67	64,42
LD		1,87	2,86	3,30	3,66	1,69	2,74	2,53	2,82	4,62	7,69
Na (ppm)	47.431,25	42.723,82	40.821,87	34.430,61	45.248,13	46.024,97	19.097,99	45.577,76	20.382,70	17.531,66	21.485,71
l σ	244,55	77,97	281,48	268,48	191,10	49,57	318,99	256,96	44,55	82,50	59,50
LD	1,06	0,19	0,30	0,37	0,41	0,18	0,29	0,28	0,30	0,46	0,78
Mg (ppm)	<LD	1,08	<LD	58,66	29,48	13,86	1.385,55	68,91	0,19	16,74	8,84
l σ	<LD	1,57	<LD	20,76	12,82	1,17	162,72	19,31	0,47	8,99	2,97
LD	0,32	0,07	0,12	0,16	0,19	0,10	0,14	0,16	0,16	0,19	0,33
S (ppm)	2.800,27	3.704,56	<LD	<LD	8.450,56	212,88	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
l σ	492,26	64,31	<LD	<LD	363,31	8,71	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
LD	16,52	2,79	4,69	6,03	7,03	2,60	4,83	5,07	4,39	8,06	13,75
K (ppm)	3.299,71	2.907,83	9.515,22	6.880,37	2.970,31	6.459,84	18.080,72	8.374,09	2.656,53	1.516,22	1.812,31
l σ	1.018,70	111,54	1.427,00	1.458,52	683,04	24,05	3.729,07	1.235,24	64,32	1.032,24	293,19
LD	38,50	6,79	10,82	13,02	15,50	6,36	10,81	10,63	11,97	20,50	33,92
Ca (ppm)	333,81	<LD	<LD	20.992,67	4.941,98	641,65	17.115,20	1.043,55	258,80	348,25	1.089,83
l σ	2.577,12	<LD	<LD	6.090,95	3.049,29	95,03	16.922,04	5.263,13	211,54	2.644,85	738,01
LD	72,12	22,31	33,70	39,36	45,10	17,17	29,02	28,30	26,66	46,80	77,75
Cu (ppm)		181,16	1.540,71	380,94	340,05	332,47	511,96	541,78	2,38	611,97	304,42
l σ		9,70	102,38	57,60	34,45	7,80	106,75	58,96	1,30	30,33	13,53
LD		0,18	0,27	0,33	0,31	0,22	0,24	0,25	0,32	0,35	0,81
Zn (ppm)		28,33	245,01	<LD	88,39	19,81	278,20	<LD	7,77	196,73	69,29
l σ		8,98	104,78	<LD	46,08	1,98	250,39	<LD	3,74	53,52	15,56
LD		0,54	0,73	0,87	1,02	0,47	0,66	0,64	0,75	1,16	2,11
As (ppm)	3.332,35	795,63	1.432,07	1.076,19	960,26	754,96	1.715,63	718,00	301,91	474,02	299,16
l σ	76,30	11,77	65,29	62,11	33,59	6,83	196,43	45,24	6,01	25,67	9,88
LD	0,62	0,17	0,24	0,30	0,37	0,18	0,27	0,25	0,25	0,39	0,76
Sr (ppm)	32,99	19,01	110,22	17,46	45,31	27,71	26,57	77,44	0,81	23,84	12,69
l σ	4,94	1,24	11,02	5,53	4,50	0,89	19,51	8,10	0,24	2,79	1,14
LD	0,08	0,01	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,05	0,09
Sb (ppm)	27,53	4,34	17,10	4,67	6,58	6,33	<LD	11,67	0,73	<LD	<LD
l σ	11,22	1,64	18,94	15,82	7,87	0,56	<LD	14,52	0,72	<LD	<LD
LD	0,37	0,09	0,12	0,15	0,19	0,09	0,14	0,13	0,15	0,21	0,38
Cs (ppm)	13,28	7,47	40,60	14,32	11,60	14,82	1,25	8,40	0,89	8,64	7,74
l σ	2,75	0,72	6,69	4,73	2,49	0,58	8,16	3,28	0,20	2,34	0,87
LD	0,07	0,01	0,02	0,04	0,04	0,02	0,03	0,02	0,03	0,05	0,08
Ba (ppm)	28,19	1,97	<LD	27,66	342,57	34,35	<LD	256,24	1,73	57,12	34,79
l σ	16,69	2,15	<LD	26,02	32,98	2,66	<LD	43,83	1,16	13,46	6,10
LD	0,54	0,13	0,20	0,23	0,25	0,17	0,30	0,17	0,30	0,25	0,75

Continuação: Tabela 4. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em quartzo do veio que corta o minério de alto teor do depósito de Catas Altas, QF.

IF	FIA2-F2	FIA3-IF4	FIA3-IF6	FIA5-IF4	FIA7-IF2	FIA7-IF1	FIA8-IF2	FIA4-IF1	FIA4-IF5	FIA4-IF3
NaCl _{equiv}	6,11	5,94	5,06	5,41	9,95	9,04	5,23	4,88	4,15	4,15
Li (ppm)	37,47	371,50	26,38	109,59	80,75	59,15	126,71	366,79	63,71	35,75
1σ	20,99	15,29	14,05	38,52	24,12	11,87	4,57	65,11	3,11	28,64
LD	1,75	0,39	0,11	0,09	0,27	0,12	0,09	1,10	0,16	0,17
B (ppm)	483,89	444,35	634,49	229,33	51,37	<LD	160,71	799,87	305,01	990,04
1σ	180,52	55,98	74,97	146,92	150,38	<LD	15,39	624,86	13,99	237,51
LD	22,61	4,96	1,67	1,45	3,35	1,93	1,57	13,91	2,42	2,26
Na (ppm)	21.301,22	16.619,87	17.068,23	18.022,39	36.754,85	30.141,47	18.792,66	12.074,58	14.872,08	9.366,43
1σ	212,35	63,16	72,24	131,75	211,34	116,58	32,82	222,62	27,21	86,18
LD	2,45	0,51	0,15	0,14	0,36	0,20	0,17	1,67	0,28	0,26
Mg (ppm)	148,48	57,10	7,61	5,10	5,88	7,37	0,25	<LD	0,88	7,27
1σ	29,92	4,73	3,25	7,02	7,27	4,21	0,75	<LD	0,67	11,34
LD	1,29	0,24	0,09	0,07	0,16	0,09	0,08	0,79	0,16	0,12
S (ppm)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
1σ	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
LD	42,75	8,32	3,30	2,94	7,37	4,06	3,40	29,97	5,37	4,86
K (ppm)	2.367,38	13.400,46	2.690,80	3.447,45	4.280,64	6.645,01	1.790,63	<LD	1.539,11	6.608,52
1σ	747,50	241,43	337,76	665,61	713,82	337,09	64,92	<LD	52,17	1.059,22
LD	96,93	22,51	7,61	6,65	15,79	8,84	7,30	62,79	10,93	10,03
Ca (ppm)	<LD	431,17	<LD	1.985,26	<LD	4.628,60	718,13	8.723,80	192,28	3.995,99
1σ	<LD	630,32	<LD	3.209,01	<LD	1.311,06	244,20	7.750,67	174,42	3.501,79
LD	239,86	48,19	16,38	14,95	35,42	19,61	16,73	153,77	26,05	24,18
Cu (ppm)	3,94	4,73	11,32	<LD	<LD	123,58	<LD	<LD	1,24	<LD
1σ	32,54	4,96	6,55	<LD	<LD	16,13	<LD	<LD	1,13	<LD
LD	2,70	0,58	0,17	0,12	0,35	0,14	0,17	1,50	0,30	0,16
Zn (ppm)	58,46	42,03	29,29	<LD	42,35	23,85	6,74	<LD	8,83	<LD
1σ	59,17	14,51	19,47	<LD	40,42	18,44	3,51	<LD	2,92	<LD
LD	6,57	1,38	0,46	0,37	0,97	0,52	0,44	3,51	0,73	0,65
As (ppm)	1.379,14	104,45	920,83	549,67	1.200,86	696,84	471,09	474,52	93,34	305,70
1σ	58,68	6,76	19,34	28,17	41,76	20,37	5,74	75,51	2,58	27,51
LD	2,24	0,43	0,16	0,13	0,36	0,20	0,16	1,44	0,27	0,21
Sr (ppm)	7,83	2,45	2,72	14,45	34,81	27,49	0,84	12,39	3,82	0,08
1σ	4,64	0,72	0,73	2,92	4,62	2,64	0,18	5,10	0,34	2,18
LD	0,29	0,07	0,02	0,01	0,04	0,03	0,02	0,20	0,03	0,02
Sb (ppm)	8,88	<LD	11,51	<LD	3,44	<LD	0,83	<LD	1,17	<LD
1σ	9,02	<LD	4,18	<LD	7,78	<LD	0,77	<LD	0,64	<LD
LD	1,18	0,23	0,09	0,07	0,19	0,11	0,08	0,72	0,12	0,11
Cs (ppm)	<LD	3,42	2,49	2,25	8,96	10,27	1,00	10,94	3,28	6,98
1σ	<LD	0,78	0,81	1,51	2,16	1,49	0,18	4,00	0,28	2,28
LD	0,26	0,06	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	0,18	0,03	0,03
Ba (ppm)	<LD	3,64	1,63	<LD	2,56	15,34	<LD	35,08	1,08	0,93
1σ	<LD	5,01	4,86	<LD	7,96	6,67	<LD	35,88	0,63	17,75
LD	2,52	0,48	0,14	0,10	0,28	0,16	0,12	1,27	0,21	0,20

Tabela 5. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em especularita do depósito de Catas Altas, QF.

IF	FI1	FI2	FI4	FI5	FI6	FI8	FI9	FI15	FI4	FI1	FI3	FI14	FI5	FI6	FI7
NaCl _{eqv}	8,10	9,00	13,70	11,20	13,40	13,30	11,30	15,20	11,20	12,40	12,20	13,60	11,20	10,90	12,10
Li (ppm)	681,61	734,14	136,99	131,72	1.123,24	1.020,14	1.165,49	1.298,96	556,26	586,53	693,28	928,26	566,50	730,94	880,16
1σ	12,08	14,36	11,00	13,31	21,13	22,10	21,23	34,53	17,22	21,75	21,46	21,91	9,28	10,44	17,99
LD	0,13	0,18	0,16	0,12	0,21	0,10	0,11	0,44	0,35	0,53	0,50	0,30	0,18	0,16	0,07
B (ppm)	697,67	1.166,79	360,59	253,85	332,85	421,78	303,01	1.271,25	514,26	870,21	968,73	954,76	1.308,35	1.166,69	1.066,65
1σ	19,38	28,26	34,25	59,22	20,45	29,25	23,37	52,97	37,35	58,81	38,98	35,20	21,11	19,69	30,53
LD	1,73	2,32	2,00	2,04	2,43	1,42	1,41	5,42	6,69	7,52	7,05	3,69	2,34	2,04	2,17
Na (ppm)	26.624,50	35.405,54	48.931,77	42.247,57	44.427,45	46.157,31	36.739,35	48.921,15	37.287,54	35.933,34	40.765,11	44.263,92	36.618,88	35.751,78	38.107,33
1σ	49,58	65,95	135,81	158,10	86,96	97,50	78,15	138,85	87,95	110,43	108,26	99,87	49,51	48,43	78,71
LD	0,22	0,29	0,27	0,26	0,33	0,18	0,21	0,69	0,74	0,98	0,81	0,45	0,29	0,25	0,30
Mg (ppm)	40,05	108,32	1.332,15	1.354,77	16,12	1.164,16	114,48	17,81	268,41	40,72	23,11	69,88	23,24	0,92	290,34
1σ	2,61	4,71	28,78	36,57	2,59	19,93	6,87	3,57	9,47	5,25	3,35	5,43	1,61	0,49	8,64
LD	0,10	0,17	0,17	0,13	0,13	0,10	0,03	0,30	0,28	0,06	0,40	0,15	0,11	0,04	0,12
S (ppm)	<LD	2.191,29	14.022,46	19.004,62	<LD	<LD	<LD	3.295,17	7.038,96	9.178,06	1.180,82	2.241,54	362,66	1.070,23	1.732,65
1σ	<LD	57,10	157,09	358,60	<LD	<LD	<LD	116,31	178,22	290,74	75,45	86,37	25,48	25,41	59,19
LD	9,19	12,69	11,58	12,00	16,15	9,68	10,72	30,76	37,84	46,52	38,73	20,29	12,21	10,79	11,75
K (ppm)	4.614,90	10.412,81	3.413,16	<LD	9.727,18	7.564,93	8.310,14	13.284,93	12.559,14	13.321,24	9.852,54	12.309,29	8.281,89	7.801,36	9.983,59
1σ	75,42	96,92	197,98	<LD	121,13	195,79	168,94	192,60	297,03	485,13	133,85	147,12	48,48	46,03	101,49
LD	17,13	22,87	18,53	19,81	20,89	12,43	13,99	51,14	64,22	79,69	66,70	35,62	21,82	19,62	21,48
Ca (ppm)	1.305,06	<LD	3.117,66	<LD	4.430,97	<LD	4.184,31	1.529,58	<LD	9.125,18	<LD	1.439,38	<LD	380,33	2.745,64
1σ	749,38	<LD	2.286,86	<LD	1.318,48	<LD	1.850,02	1.791,80	<LD	4.614,55	<LD	1.365,79	<LD	399,62	945,91
LD	172,05	239,22	200,62	232,70	276,58	143,51	164,02	544,75	602,82	758,80	757,65	382,48	238,04	214,25	206,78
Cu (ppm)	134,89	16,74	7.128,73	6.825,39	4,75	2.238,82	143,39	22,84	4,90	88,30	2,01	101,49	261,05	87,43	130,58
1σ	6,32	2,85	93,10	113,55	2,49	38,52	9,52	6,01	4,50	10,93	2,14	8,77	7,58	4,34	8,41
LD	0,24	0,41	0,35	0,34	0,32	0,23	0,23	0,98	0,92	0,92	1,13	0,42	0,37	0,35	0,44
Zn (ppm)	38,58	12,79	1.923,99	2.457,09	<LD	715,45	30,17	5,78	27,46	32,18	20,73	48,32	6,45	2,86	92,64
1σ	4,46	4,02	46,76	67,81	<LD	23,95	14,94	7,31	10,69	18,22	6,36	8,09	2,01	1,50	8,04
LD	0,70	0,80	0,67	0,68	0,94	0,48	0,59	2,34	2,20	3,01	2,88	1,61	1,09	0,81	0,92
As (ppm)	970,51	1.661,46	53,41	145,56	324,94	563,49	387,21	1.628,62	191,48	610,44	1.082,93	1.329,99	1.781,13	1.322,26	1.468,24
1σ	10,78	16,12	5,99	11,76	8,71	13,02	9,45	28,67	8,22	17,55	19,93	19,53	12,32	10,46	17,37
LD	0,28	0,36	0,30	0,32	0,42	0,23	0,26	0,77	0,93	1,16	1,18	0,49	0,34	0,29	0,36
Sr (ppm)	66,54	8,80	1,87	1,15	191,64	257,90	232,80	88,47	124,99	116,86	43,67	120,40	101,88	95,49	172,20
1σ	1,80	0,78	0,67	0,95	4,17	5,33	4,48	4,27	3,67	4,62	2,55	3,73	1,86	1,78	3,75
LD	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,08	0,08	0,18	0,15	0,08	0,04	0,05	0,04
Sb (ppm)	19,70	<LD	11,20	82,40	5,09	12,28	9,98	5,48	50,89	67,20	5,43	25,44	8,44	7,03	17,29
1σ	2,16	<LD	4,10	10,84	3,18	4,60	3,30	2,44	4,08	6,32	1,85	2,93	0,89	0,92	2,19
LD	0,18	0,22	0,19	0,18	0,24	0,14	0,14	0,52	0,58	0,70	0,67	0,31	0,21	0,19	0,21
Cs (ppm)	10,13	19,73	7,96	7,31	25,22	28,49	21,84	34,47	27,53	28,52	27,87	32,91	33,72	30,07	30,40
1σ	0,64	0,99	1,23	1,68	1,35	1,60	1,28	2,35	1,59	2,23	1,79	1,71	0,92	0,86	1,38
LD	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,04	0,04	0,14	0,13	0,20	0,19	0,10	0,05	0,04	0,06
Ba (ppm)	166,97	2,91	<LD	<LD	<LD	<LD	411,18	12,66	334,82	198,90	<LD	493,10	<LD	178,48	463,52
1σ	7,87	1,89	<LD	<LD	<LD	<LD	17,60	5,38	17,27	17,55	<LD	20,68	<LD	6,63	16,79
LD	0,34	0,26	0,30	0,34	0,50	0,29	0,31	0,85	1,18	1,29	1,29	0,50	0,40	0,39	0,44

Tabela 6. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em quartzo e especularita dos veios que cortam as litologias da SEM.

Depósito	Morro do Pilar											
Amostras	Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita do quartzo itabirito					Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita no minério de ferro de alto teor compacto						
IF	FIA1-IF2	FIA1-IF3	FIA1-IF6	FIA1-IF15	FIA1-IF14	FIA1-IF5	FIA1-IF4	FIA1-IF2	FIA1-IF7	FIA1-IF10	FIA1-IF9	FIA1-IF8
NaCl _{eqv}	9,30	10,10	8,10	8,10	11,00	13,50	10,70	12,40	12,40	12,30	10,90	10,70
Li (ppm)	171,19	177,51	125,75	114,33	190,49	15,41	9,80	16,94	48,56	27,79	10,29	<LD
1σ	6,31	18,49	11,13	7,03	18,07	4,79	12,85	1,72	22,16	8,78	4,71	<LD
LD	0,92	4,24	0,33	0,59	1,11	0,71	2,39	0,47	0,40	0,25	0,91	0,33
B (ppm)	185,77	170,78	557,94	448,74	120,70	426,17	584,38	477,68	792,45	1.106,19	443,90	224,36
1σ	10,72	34,38	37,67	22,02	41,29	45,77	142,84	14,96	256,75	89,51	46,21	174,94
LD	4,85	33,13	2,04	3,39	6,66	5,26	21,55	5,40	3,65	2,42	5,81	3,83
Na (ppm)	33.661,40	36.632,27	27.447,20	28.082,64	39.190,99	47.198,84	35.945,81	43.970,65	39.832,82	41.701,88	38.495,22	33.158,50
1σ	61,47	184,59	110,10	75,87	176,96	158,89	283,34	57,52	284,46	165,68	157,19	227,41
LD	1,21	7,85	0,46	0,76	1,72	0,81	3,10	0,82	0,51	0,47	1,02	0,61
Mg (ppm)	0,81	<LD	<LD	<LD	12,06	<LD	<LD	11,69	14,82	55,51	<LD	<LD
1σ	0,45	<LD	<LD	<LD	4,60	<LD	<LD	1,28	16,15	8,19	<LD	<LD
LD	0,35	3,67	0,17	0,31	0,73	0,41	1,30	0,57	0,31	0,05	0,53	0,28
S (ppm)	703,63	1.473,88	3.682,94	855,84	1.433,90	5.103,60	14.033,39	1.658,10	<LD	<LD	4.128,11	<LD
1σ	32,11	189,09	140,47	43,62	321,18	340,08	1.147,58	73,22	<LD	<LD	301,61	<LD
LD	41,82	260,34	17,53	27,53	62,68	52,53	193,76	56,16	34,77	24,25	58,35	34,89
K (ppm)	5.059,99	5.342,47	3.726,27	3.758,59	5.109,23	9.038,13	4.112,57	7.202,63	5.408,00	7.132,24	5.227,89	3.909,21
1σ	57,75	324,41	212,94	72,35	514,30	404,76	1.403,73	91,96	3.294,84	987,28	382,19	2.259,76
LD	71,28	441,97	29,16	45,79	101,83	64,75	240,56	69,89	43,34	31,44	76,15	45,55
Ca (ppm)	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	543,51	5.507,10	2.030,58	2.205,39	12.453,55
1σ	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	313,60	11.643,58	3.739,56	1.414,75	8.349,49
LD	251,64	1.545,99	103,62	163,78	365,47	219,56	800,98	229,93	139,28	106,62	251,23	154,45
Cu (ppm)	<LD	<LD	4,31	<LD	<LD	3,63	5,65	<LD	<LD	31,28	<LD	<LD
1σ	<LD	<LD	4,22	<LD	<LD	6,50	26,82	<LD	<LD	19,36	<LD	<LD
LD	1,35	9,33	0,50	0,88	1,54	1,04	5,48	1,00	0,64	0,81	1,55	0,81
Zn (ppm)	4,36	<LD	38,17	11,48	17,22	<LD	<LD	5,69	60,34	12,57	<LD	<LD
1σ	2,55	<LD	11,29	3,81	20,83	<LD	<LD	4,16	150,28	41,15	<LD	<LD
LD	3,33	22,05	1,28	2,13	4,81	3,07	12,32	3,25	2,14	1,38	3,45	1,88
As (ppm)	891,60	1.086,04	3.529,47	2.686,95	3.510,83	3.346,90	7.033,91	1.608,23	4.541,61	988,74	555,48	436,15
1σ	11,59	36,97	46,08	27,32	62,24	47,61	141,10	12,33	128,83	32,64	21,68	44,84
LD	1,17	8,00	0,44	0,75	1,65	1,29	4,34	1,41	0,89	0,55	1,26	0,83
Sr (ppm)	82,29	69,36	99,50	71,75	42,76	160,63	46,93	279,66	176,95	229,78	163,83	79,81
1σ	2,11	5,60	4,63	2,67	4,12	6,62	7,72	3,24	14,85	8,99	7,08	8,41
LD	0,23	1,65	0,05	0,10	0,32	0,16	0,63	0,17	0,09	0,07	0,14	0,09
Sb (ppm)	5,35	7,43	7,96	12,95	9,85	7,59	35,28	7,72	26,24	35,12	8,04	<LD
1σ	0,85	3,61	2,56	1,61	4,95	4,97	17,30	1,20	39,35	9,87	4,38	<LD
LD	0,74	4,47	0,30	0,51	0,92	0,84	2,84	0,82	0,53	0,35	0,88	0,43
Cs (ppm)	4,44	4,03	14,74	8,57	10,26	13,51	14,37	18,41	6,92	30,52	13,11	18,41
1σ	0,45	1,41	1,64	0,83	2,07	1,95	4,44	0,74	7,57	3,54	1,91	4,33
LD	0,20	1,43	0,08	0,14	0,28	0,11	0,58	0,13	0,10	0,07	0,19	0,12
Ba (ppm)	21,98	20,03	<LD	23,71	9,56	29,57	21,83	2,59	<LD	53,07	3,28	39,64
1σ	3,04	9,35	<LD	4,27	9,35	9,56	23,57	1,28	<LD	18,19	7,46	23,44
LD	1,50	10,36	0,64	1,14	2,18	1,10	4,39	0,79	0,52	0,54	1,64	0,86

Continuação: Tabela 6. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em quartzo e especularita dos veios que cortam as litologias da SEM.

Depósito	Morro do Pilar														
	Especularita de veios hospedados no minério de alto teor compacto														
Amostras	FI	FI1	FI2	FI3	FI4	FI5	FI7	FI11	FI9	FI13	FI15	FI16	FI14	FI12	FI17
NaCl_{eqv}	14	14	13	16	15	15	14	15	13	15	13	15	13	13	16
Li (ppm)	399,71	1.114,74	263,07	1.243,64	592,90	634,05	129,77	1.171,29	485,73	434,24	73,45	162,28	1.054,49	1.020,78	146,82
1σ	20,07	72,26	22,60	25,35	9,68	17,83	37,07	27,79	39,67	12,88	17,60	58,05	10,29	28,96	8,12
LD	0,10	0,47	0,25	0,39	0,09	0,06	0,06	0,03	0,15	0,06	0,07	0,06	0,06	0,02	0,17
B (ppm)	423,67	865,73	318,58	621,23	347,96	335,60	834,07	335,12	271,72	295,08	320,73	890,29	281,11	278,18	426,89
1σ	38,38	144,11	63,48	30,64	11,78	22,91	260,07	32,32	76,97	41,26	97,62	499,08	8,50	33,82	23,55
LD	1,99	4,69	3,58	4,12	1,32	1,22	1,38	1,19	1,71	0,96	1,07	0,70	0,81	0,70	1,78
Na (ppm)	51.263,27	43.918,74	47.986,51	50.102,65	47.659,39	49.825,34	45.706,78	46.575,35	42.547,41	52.595,10	45.622,91	45.067,52	44.697,84	46.557,45	54.336,62
1σ	152,22	305,97	202,84	108,99	55,89	107,50	336,84	117,44	242,26	90,52	243,35	343,32	44,88	130,75	103,68
LD	0,32	0,72	0,55	0,63	0,17	0,20	0,18	0,17	0,24	0,12	0,15	0,10	0,12	0,10	0,22
Mg (ppm)	85,28	91,28	132,92	262,58	5.861,95	16,06	2.846,03	282,06	56,10	1,07	50,70	1.496,95	395,53	1,30	311,71
1σ	8,15	18,80	14,22	9,71	23,97	3,18	104,16	11,34	12,34	3,21	14,09	94,93	5,16	3,17	9,68
LD	0,14	0,26	0,17	0,29	0,03	0,09	0,08	0,06	0,10	0,03	0,06	0,04	0,05	0,05	0,08
S (ppm)	<LD	10.299,47	<LD	2.087,55	<LD	<LD	49.153,96	<LD	6.000,87	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	7.246,91
1σ	<LD	991,63	<LD	132,19	<LD	<LD	2.445,30	<LD	738,54	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	123,74
LD	15,51	39,99	28,64	36,07	11,77	11,72	13,53	11,63	16,84	8,92	10,49	7,06	7,94	6,75	16,82
K (ppm)	6.721,80	15.700,56	4.030,72	14.543,19	8.735,94	9.110,00	16.073,58	13.248,17	9.824,19	8.731,40	14.978,90	<LD	9.387,17	5.976,37	13.471,81
1σ	224,45	1.116,78	509,17	157,85	58,84	126,62	2.184,61	211,54	660,39	379,27	832,78	<LD	34,06	277,56	125,69
LD	18,22	46,05	32,73	40,96	12,28	11,86	13,13	11,39	16,68	8,94	10,44	7,06	7,91	6,75	16,96
Ca (ppm)	1.502,13	<LD	<LD	3.786,84	1.576,77	3.917,43	<LD	6.648,38	9.356,34	<LD	<LD	17.485,89	2.103,03	3.626,89	<LD
1σ	2.366,36	<LD	<LD	1.551,97	584,61	1.328,51	<LD	2.288,11	6.678,06	<LD	<LD	46.763,70	364,69	2.655,83	<LD
LD	222,78	534,84	369,64	424,60	135,37	157,49	147,15	132,26	185,83	90,29	101,16	74,98	85,35	79,55	191,22
Cu (ppm)	<LD	735,11	<LD	355,96	2,19	0,40	<LD	1.230,26	32,70	<LD	25,87	<LD	<LD	<LD	776,69
1σ	<LD	73,73	<LD	17,20	1,03	2,17	<LD	36,27	14,42	<LD	16,25	<LD	<LD	<LD	23,59
LD	0,38	0,48	0,65	0,56	0,21	0,24	0,20	0,22	0,29	0,14	0,16	0,13	0,12	0,10	0,27
Zn (ppm)	<LD	108,68	21,47	134,53	67,12	<LD	<LD	950,63	83,77	22,73	228,96	<LD	82,86	5,48	116,45
1σ	<LD	50,32	18,98	11,77	4,22	<LD	<LD	31,54	29,99	13,09	44,52	<LD	3,65	10,52	9,70
LD	0,84	1,99	1,53	1,53	0,49	0,50	0,45	0,45	0,67	0,33	0,39	0,29	0,36	0,27	0,71
As (ppm)	428,74	1.556,25	319,66	706,05	132,92	372,27	<LD	683,23	380,60	44,10	567,31	808,58	<LD	252,79	340,86
1σ	16,95	69,97	20,89	15,41	3,62	11,09	<LD	17,43	30,84	8,04	37,09	103,48	<LD	12,58	10,05
LD	0,36	0,76	0,64	0,69	0,19	0,23	0,18	0,22	0,29	0,15	0,17	0,10	0,13	0,10	0,23
Sr (ppm)	149,22	305,83	134,75	238,24	180,43	157,45	<LD	265,99	135,76	91,97	81,79	20,32	198,43	168,60	60,27
1σ	5,98	18,50	7,79	5,43	2,47	4,34	<LD	6,60	10,27	2,98	7,82	9,29	2,20	5,81	2,56
LD	0,05	0,09	0,06	0,08	0,02	0,03	0,02	0,03	0,04	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,05
Sb (ppm)	9,43	<LD	10,48	4,62	<LD	<LD	56,04	<LD	<LD	<LD	<LD	1.119,28	<LD	<LD	32,38
1σ	4,47	<LD	7,27	2,64	<LD	<LD	49,59	<LD	<LD	<LD	<LD	108,96	<LD	<LD	3,10
LD	0,20	0,48	0,36	0,37	0,11	0,11	0,12	0,12	0,18	0,08	0,11	0,06	0,08	0,07	0,15
Cs (ppm)	13,58	24,12	22,01	49,06	20,21	15,33	36,93	42,19	18,01	37,09	622,31	155,72	19,55	17,20	24,56
1σ	1,70	5,60	3,03	2,21	0,75	1,23	7,87	2,34	3,70	1,83	18,54	15,39	0,64	1,80	1,47
LD	0,06	0,09	0,09	0,09	0,03	0,04	0,03	0,03	0,05	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,05
Ba (ppm)	2,98	608,40	143,60	567,53	525,03	191,08	<LD	593,33	1.164,50	<LD	2.995,73	<LD	557,13	13,16	464,48
1σ	3,86	73,26	22,89	22,73	11,36	13,04	<LD	27,10	84,97	<LD	124,54	<LD	10,05	7,44	19,29
LD	0,45	0,83	0,86	0,62	0,23	0,21	0,22	0,27	0,32	0,19	0,19	0,13	0,15	0,11	0,30

Continuação: Tabela 6. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em quartzo e especularita dos veios que cortam as litologias da SEM.

Depósito	Conceição do Mato Dentro							
Amostras	Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita no minério de ferro de alto teor xistoso							
IF	FIA1-IF1	FIA1-IF3	FIA2-IF3	FIA2-IF2	FIA3-IF1	FIA4-IF3	FIA5-IF1	FIA5-IF3
NaCl _{eqv}	13,70	13,40	13,20	13,00	7,00	12,40	13,00	12,25
Li (ppm)	6,98	9,36	36,24	93,65	14,94	23,75	19,01	<LD
1σ	10,19	6,20	14,23	16,62	3,03	12,35	25,03	<LD
LD	0,51	1,09	0,26	1,07	1,58	1,20	0,32	0,74
B (ppm)	90,95	354,75	207,64	253,37	98,89	193,23	276,30	196,28
1σ	71,16	55,75	75,16	50,43	12,71	109,22	215,61	191,70
LD	6,48	6,54	4,91	7,53	9,26	6,08	2,84	4,34
Na (ppm)	53.401,53	48.374,03	47.223,05	49.330,57	25.592,69	44.897,49	48.709,51	46.939,08
1σ	418,57	225,82	303,66	248,34	85,03	389,15	489,44	352,82
LD	0,92	0,81	0,70	1,05	1,23	0,89	0,47	0,67
Mg (ppm)	42,15	53,21	182,55	95,64	72,87	74,01	91,41	73,49
1σ	15,02	9,15	23,20	13,43	5,44	22,90	31,22	26,17
LD	0,34	0,41	0,53	0,72	0,96	0,73	0,30	0,27
S (ppm)	1.718,56	1.254,58	2.363,72	<LD	407,97	1.758,95	20.981,78	8.954,22
1σ	554,64	308,79	546,96	<LD	46,51	866,57	1.850,54	1.638,15
LD	47,18	49,62	37,85	56,12	63,22	50,16	24,11	35,41
K (ppm)	<LD	2.105,52	1.974,38	977,25	600,52	<LD	2.077,78	<LD
1σ	<LD	404,45	713,69	367,52	63,28	<LD	2.519,48	<LD
LD	64,24	67,66	51,85	77,94	88,03	71,64	34,79	51,48
Ca (ppm)	<LD	3.754,03	6.222,42	<LD	1.722,01	5.381,29	<LD	<LD
1σ	<LD	1.641,32	3.044,83	<LD	276,26	5.152,90	<LD	<LD
LD	233,98	244,23	189,68	280,97	327,19	266,25	126,95	192,24
Cu (ppm)	168,71	141,53	707,03	99,05	<LD	26,39	1.295,62	1.209,92
1σ	44,94	23,23	68,08	21,36	<LD	26,46	145,79	101,71
LD	1,61	1,47	1,05	2,17	2,70	1,95	0,75	0,58
Zn (ppm)	83,88	6,56	57,75	27,82	<LD	<LD	<LD	40,83
1σ	49,54	23,87	43,33	22,00	<LD	<LD	<LD	119,43
LD	4,11	4,39	3,38	4,92	5,38	4,16	1,99	2,58
As (ppm)	543,82	1.466,89	1.448,13	1.196,02	1.044,18	956,22	2.038,79	1.632,09
1σ	49,77	44,64	60,54	43,33	18,60	66,04	119,17	80,79
LD	1,86	1,64	1,28	2,03	2,21	1,57	0,69	0,92
Sr (ppm)	391,80	354,25	405,10	350,06	348,37	290,00	405,06	493,58
1σ	25,60	13,76	20,02	14,83	6,94	22,30	31,58	25,49
LD	0,23	0,19	0,16	0,25	0,37	0,08	0,10	0,11
Sb (ppm)	<LD	20,48	<LD	10,69	<LD	11,73	48,29	50,79
1σ	<LD	7,82	<LD	6,25	<LD	16,63	32,61	29,36
LD	1,27	1,17	0,86	1,37	1,38	1,06	0,43	0,62
Cs (ppm)	23,74	47,84	36,33	40,59	17,45	27,54	38,24	43,63
1σ	5,73	4,52	5,61	4,46	1,37	6,62	9,92	7,64
LD	0,25	0,17	0,16	0,26	0,29	0,26	0,08	0,12
Ba (ppm)	50,43	36,96	182,37	45,80	31,45	<LD	40,97	102,57
1σ	25,66	13,46	38,14	15,05	5,54	<LD	43,13	35,91
LD	1,50	1,55	0,90	1,22	2,10	1,91	0,66	0,73

Tabela 7. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em quartzo dos veios que cortam as litologias de Barão de Cocais associadas ao Au-PGE, QF.

Amostras	Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita - Bifásica (Tipo 1)														
	FIA3-IF1	FIA2-IF1	FIA4-IF3	FIA4-IF2	FIA1-IF2	FIA2-IF4	FIA6-IF7	FIA2-IF3	FIA4-IF1	FIA5-IF-3	FIA5-IF-2	FIA5-IF-1	FIA6-IF1	FIA	FIA6-IF3
NaCl_{eqv}	9,21	8,68	9,34	9,47	7,59	10,11	10,11	10,11	8,68	9,21	9,60	8,41	6,16		6,59
Li (ppm)	59,47	130,33	65,47	62,99	51,13	133,43	161,65	135,24	122,22	47,40	43,69	121,26	56,10	116,47	148,33
1σ	5,44	11,24	14,51	4,59	5,50	9,26	14,60	7,80	11,68	1,34	5,03	2,94	6,93	3,74	10,57
LD	0,06	0,21	0,88	0,69	0,95	0,20	0,38	0,11	0,13	0,07	0,09	0,06	0,19	0,11	0,40
B (ppm)	402,60	153,22	417,55	540,23	383,35	210,25	381,87	260,76	424,59	344,29	324,09	384,80	102,59	341,30	252,03
1σ	31,97	71,23	103,62	21,58	22,56	31,06	44,50	43,09	78,65	5,65	38,94	9,39	24,58	10,45	33,66
LD	0,96	2,66	15,83	9,47	12,16	2,79	4,88	1,94	1,93	0,90	1,49	0,83	2,75	2,10	6,01
Na (ppm)	32.495,80	32.688,54	33.259,30	33.113,29	26.052,00	36.451,74	35.989,24	36.323,95	30.540,78	32.406,58	33.714,85	26.100,79	22.299,60	62.192,62	21.867,93
1σ	53,48	100,74	199,63	66,07	78,36	91,89	134,45	66,38	69,22	21,60	53,21	27,33	83,75	53,65	81,78
LD	0,11	0,31	1,89	1,08	1,39	0,33	0,58	0,22	0,21	0,10	0,17	0,09	0,27	0,20	0,64
Mg (ppm)	29,90	27,18	5,37	1,25	22,77	<LD	<LD	<LD	6,29	2,48	15,71	8,02	4,95	47,31	11,03
1σ	2,85	4,11	5,76	0,81	2,96	<LD	<LD	<LD	3,24	0,26	2,70	0,64	1,67	1,89	2,42
LD	0,05	0,14	0,90	0,54	0,95	0,20	0,36	0,12	0,11	0,05	0,07	0,05	0,12	0,10	0,30
S (ppm)	<LD	<LD	184,68	917,72	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	668,48	1.353,10
1σ	<LD	<LD	197,88	26,90	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	56,56	16,51
LD	1,78	5,18	30,88	18,65	24,26	6,07	10,45	4,34	4,32	1,84	3,18	1,78	5,55	4,33	12,62
K (ppm)	7.177,08	2.445,06	4.406,32	7.330,07	5.810,65	6.856,08	7.005,87	6.921,50	6.454,64	7.463,36	6.326,06	6.435,64	3.634,58	7.774,31	7.372,34
1σ	139,39	339,72	451,12	65,93	62,22	137,09	171,43	201,10	366,30	18,82	185,01	33,88	92,57	32,41	125,98
LD	4,47	12,41	72,78	43,71	53,88	12,98	22,38	9,28	9,13	4,58	7,42	4,05	10,99	8,47	24,16
Ca (ppm)	<LD	<LD	1.455,35	<LD	1.250,34	<LD	<LD	<LD	<LD	294,25	1.503,05	6.387,34	377,14	<LD	948,71
1σ	<LD	<LD	1.269,45	<LD	173,23	<LD	<LD	<LD	<LD	58,19	615,27	156,53	459,31	<LD	429,64
LD	10,60	29,69	168,98	102,45	130,42	30,49	53,08	21,34	21,58	9,70	16,44	8,97	30,72	22,81	66,80
Cu (ppm)	<LD	<LD	<LD	34,94	12,62	<LD	<LD	<LD	1,95	0,29	<LD	6,40	<LD	<LD	9,00
1σ	<LD	<LD	<LD	4,10	3,31	<LD	<LD	<LD	4,63	0,22	<LD	0,96	<LD	<LD	3,85
LD	0,09	0,31	1,78	1,08	1,75	0,37	0,68	0,21	0,15	0,11	0,16	0,09	0,32	0,20	0,52
Zn (ppm)	<LD	<LD	<LD	<LD	25,03	<LD	<LD	<LD	29,22	<LD	<LD	4,45	<LD	<LD	6,35
1σ	<LD	<LD	<LD	<LD	4,79	<LD	<LD	<LD	16,72	<LD	<LD	1,75	<LD	<LD	7,77
LD	0,23	0,68	4,38	2,50	3,32	0,74	1,32	0,49	0,51	0,25	0,40	0,21	0,77	0,60	1,71
As (ppm)	192,18	77,71	137,99	272,21	105,65	295,64	309,45	281,79	269,69	153,39	219,43	250,28	157,80	164,16	107,63
1σ	5,80	9,75	16,66	6,53	5,44	9,41	13,93	7,75	11,08	1,67	6,41	3,01	8,14	3,09	6,98
LD	0,09	0,29	1,72	0,94	1,30	0,31	0,55	0,20	0,20	0,10	0,16	0,09	0,27	0,21	0,61
Sr (ppm)	6,65	6,82	4,15	4,39	3,93	2,77	4,11	2,80	5,75	2,87	3,85	4,07	2,46	8,25	6,16
1σ	0,65	1,32	1,92	0,56	0,72	0,73	1,19	0,75	1,23	0,15	0,41	0,26	0,69	0,46	1,10
LD	0,01	0,04	0,21	0,11	0,23	0,04	0,08	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,05	0,03	0,08
Sb (ppm)	1,65	2,54	12,31	17,29	2,54	2,42	6,24	2,79	10,28	0,20	<LD	4,12	3,35	4,52	4,99
1σ	1,70	3,59	5,33	1,46	0,82	1,61	2,39	2,25	3,35	0,20	<LD	0,53	1,61	0,53	1,92
LD	0,05	0,15	0,92	0,50	0,62	0,16	0,28	0,10	0,10	0,05	0,08	0,04	0,16	0,11	0,29
Cs (ppm)	21,54	9,34	21,45	34,46	7,36	21,52	27,76	22,87	23,14	17,42	28,20	21,51	12,13	23,70	20,71
1σ	0,91	1,22	3,38	1,39	0,86	1,50	2,47	1,19	1,31	0,32	1,05	0,51	1,29	0,69	1,66
LD	0,01	0,03	0,24	0,13	0,18	0,04	0,07	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,08
Ba (ppm)	9,27	1,07	4,06	6,13	<LD	<LD	9,43	<LD	12,35	2,70	6,24	0,73	8,48	1,25	1,71
1σ	2,75	5,16	4,81	1,93	<LD	<LD	5,06	<LD	5,94	0,39	3,78	0,55	3,34	0,55	2,40
LD	0,10	0,25	1,31	0,93	1,80	0,13	0,29	0,04	0,21	0,10	0,17	0,10	0,24	0,14	0,58

Continuação: Tabela 7. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em quartzo dos veios que cortam as litologias de Barão de Cocais associadas ao Au-PGE, QF.

Amostras	Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita - Bifásica (Tipo 2)														
	FIA1-IF4	FIA3-IF1	FIA3-IF3	FIA4-IF1	FIA4-IF2	FIA4-IF3	FIA4-IF6	FIA4-IF7	FIA4-IF12	FIA5-IF5	FIA4-IF11	FIA1-IF1	FIA1-IF2	FIA1-IF6	FIA1-IF8
IF															
NaCl_{equiv}	9,73	8,95	9,34	10,24	8,95	9,47	9,73	9,73	9,47	9,46	9,34	10,73	14,46	8,55	6,88
Li (ppm)	90,82	64,71	71,88	18,18	67,44	73,76	73,85	49,84	55,75	52,18	51,60	30,26	71,49	38,12	<LD
1σ	6,00	6,56	1,93	34,52	17,60	4,25	10,98	9,34	2,46	10,38	2,64	9,55	77,07	18,64	<LD
LD	0,26	0,40	0,04	0,22	0,17	0,23	0,68	0,45	0,26	0,19	0,30	5,54	2,29	12,43	1,62
B (ppm)	274,79	474,71	151,34	<LD	<LD	521,70	294,85	276,47	496,41	285,16	511,52	NA	NA	NA	NA
1σ	21,26	29,49	4,92	<LD	<LD	47,53	105,55	141,29	11,60	309,76	13,69				
LD	3,88	5,30	0,91	5,64	5,08	7,03	12,57	8,32	4,55	4,99	5,82				
Na (ppm)	34.650,55	31.473,23	32.182,11	38.461,18	30.928,49	31.596,75	33.269,52	29.664,16	33.210,00	33.590,33	33.109,64	39.058,17	53.906,91	28.915,73	26.045,40
1σ	72,94	91,34	25,22	220,26	168,49	54,29	147,37	148,88	38,16	139,10	42,83	185,83	423,35	225,19	230,66
LD	0,39	0,58	0,10	0,42	0,40	0,57	1,16	0,77	0,42	0,48	0,54	4,15	1,51	8,57	1,08
Mg (ppm)	3,58	0,28	56,45	15,81	9,29	11,68	17,39	257,67	8,73	84,37	6,97	8,46	34,69	53,27	<LD
1σ	1,11	1,38	1,34	23,71	10,71	1,76	5,55	17,46	0,92	11,62	0,89	3,57	15,01	11,86	<LD
LD	0,15	0,27	0,03	0,14	0,15	0,22	0,47	0,31	0,15	0,16	0,23	1,68	0,62	3,71	0,44
S (ppm)	1.033,49	764,06	<LD	<LD	<LD	<LD	5.307,38	1.747,92	337,45	<LD	526,76	<LD	<LD	1.881,03	2.497,41
1σ	41,09	42,34	<LD	<LD	<LD	<LD	188,56	257,91	10,69	<LD	14,59	<LD	<LD	139,53	401,17
LD	8,17	11,72	2,03	8,66	8,11	11,42	21,24	14,07	7,78	8,62	10,24	41,41	16,75	93,90	12,22
K (ppm)	7.494,99	6.749,95	5.964,73	4.496,97	10.862,04	11.507,55	8.032,84	7.654,95	7.474,50	7.635,00	6.074,05	7.255,43	7.307,94	9.383,01	2.400,52
1σ	75,47	82,32	17,78	2.008,26	1.178,43	158,39	371,30	499,34	28,32	1.138,16	33,36	200,02	1.840,33	431,38	1.104,18
LD	15,44	22,03	3,76	19,19	17,38	24,18	44,49	29,48	16,20	17,89	20,99	121,31	49,52	287,80	37,42
Ca (ppm)	<LD	<LD	3.294,09	<LD	<LD	<LD	2.129,99	8.870,47	<LD	<LD	160,24	473,50	<LD	1.840,78	<LD
1σ	<LD	<LD	104,47	<LD	<LD	<LD	1.316,12	1.924,11	<LD	<LD	106,35	420,58	<LD	867,75	<LD
LD	41,84	59,78	10,08	54,86	49,25	69,91	129,48	85,76	45,90	50,63	59,73	226,91	85,66	544,88	64,90
Cu (ppm)	0,35	<LD	5,32	<LD	<LD	<LD	2,88	111,05	<LD	<LD	3,73	NA	NA	NA	NA
1σ	1,21	<LD	0,68	<LD	<LD	<LD	7,60	18,72	<LD	<LD	1,03				
LD	0,31	0,59	0,10	0,39	0,41	0,51	1,08	0,71	0,46	0,48	0,48				
Zn (ppm)	1,75	<LD	6,93	117,29	215,24	<LD	<LD	63,42	<LD	<LD	<LD	NA	NA	NA	NA
1σ	4,14	<LD	1,09	123,03	71,15	<LD	<LD	35,37	<LD	<LD	<LD				
LD	1,02	1,47	0,24	1,44	1,29	1,78	3,29	2,17	1,25	1,28	1,50				
As (ppm)	248,43	239,94	162,61	214,15	249,10	277,89	219,43	132,79	229,74	54,29	231,92	275,92	305,43	233,60	249,81
1σ	6,97	9,11	2,01	40,39	31,68	6,64	15,14	15,24	3,50	28,01	3,97	17,55	44,00	23,11	31,20
LD	0,37	0,56	0,08	0,38	0,35	0,59	0,99	0,66	0,37	0,41	0,48	2,48	0,94	5,63	0,67
Sr (ppm)	3,09	5,78	2,84	<LD	6,14	4,95	6,07	5,26	5,55	6,80	3,95	2,88	3,38	5,60	1,46
1σ	0,52	0,92	0,18	<LD	2,47	0,59	1,68	1,88	0,36	2,49	0,34	1,14	4,70	2,37	3,25
LD	0,05	0,06	0,01	0,04	0,04	0,07	0,13	0,08	0,05	0,07	0,06	0,33	0,17	1,13	0,09
Sb (ppm)	2,24	<LD	2,06	<LD	<LD	2,36	<LD	<LD	10,03	<LD	4,01	4,35	18,25	14,43	6,43
1σ	1,01	<LD	0,25	<LD	<LD	1,92	<LD	<LD	0,68	<LD	0,57	2,11	14,47	4,86	7,48
LD	0,19	0,28	0,04	0,20	0,19	0,26	1,15	0,76	0,35	0,52	0,48	1,16	0,52	2,48	0,34
Cs (ppm)	29,56	32,00	16,14	21,12	21,55	32,23	15,87	19,59	27,40	24,35	31,68	22,03	25,20	11,85	17,36
1σ	1,40	1,90	0,37	6,00	3,12	1,18	2,22	2,67	0,71	2,99	0,86	2,73	5,69	2,78	3,90
LD	0,04	0,08	0,01	0,05	0,05	0,05	0,11	0,07	0,04	0,04	0,06	0,38	0,10	0,55	0,09
Ba (ppm)	<LD	<LD	2,78	16,24	44,91	0,87	<LD	<LD	12,12	<LD	0,76	13,46	20,08	<LD	18,85
1σ	<LD	<LD	0,53	29,47	14,75	2,48	<LD	<LD	1,44	<LD	0,57	6,46	20,97	<LD	10,88
LD	0,36	0,65	0,07	0,34	0,39	0,56	0,88	0,58	0,27	0,34	0,42	2,49	0,44	4,70	0,31

Continuação: Tabela 7. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em quartzo dos veios que cortam as litologias de Barão de Cocais associadas ao Au-PGE, QF.

Amostras	Quartzo hospedado em veio de quartzo-especularita - Bifásica (Tipo 2)												
	FIA1-IF9	FIA2-IF3	FIA2-IF1	FIA2-IF2	FIA2-IF4	FIA3-IF3	FIA2-IF2	FIA1-IF1	FIA1-IF1	FIA1-IF2	FIA2-IF1	FIA2-IF2	FIA2-IF5
NaCl_{eqv}	11,46	12,85	10,61	9,60	11,81	9,27	11,10	8,30	14,36	14,25	14,15	15,17	14,90
Li (ppm)	15,03	156,63	80,62	<LD	<LD	344,40	197,31	142,92	67,85	55,96	61,43	38,14	71,33
1σ	24,16	124,89	17,76	<LD	<LD	29,36	7,10	18,60	10,88	13,92	7,77	43,06	6,20
LD	5,30	4,43	1,08	8,02	3,37	2,04	0,81	1,95	0,79	2,41	1,91	2,03	0,84
B (ppm)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1σ													
LD													
Na (ppm)	41.690,14	49.977,45	38.919,25	37.506,09	46.178,58	34.378,73	41.199,49	30.288,85	52.477,56	51.013,79	50.714,82	53.435,75	52.365,19
1σ	229,70	690,95	195,79	725,51	590,16	143,06	65,79	129,20	134,24	174,79	132,37	166,50	104,32
LD	3,69	3,06	0,93	6,33	2,28	1,86	0,50	1,36	0,62	1,73	1,33	1,45	0,57
Mg (ppm)	11,81	<LD	49,47	144,64	37,39	<LD	13,64	1,71	9,19	53,03	2,09	<LD	7,93
1σ	6,78	<LD	9,84	59,59	36,95	<LD	1,73	3,41	2,48	7,13	1,54	<LD	1,62
LD	1,48	1,12	0,38	2,18	0,84	0,60	0,20	0,47	0,21	0,61	0,54	0,43	0,21
S (ppm)	<LD	6.110,23	128,64	13.484,37	5.008,15	2.688,18	1.589,35	1.467,78	1.103,44	2.420,22	440,42	<LD	<LD
1σ	<LD	1.145,99	167,75	1.231,71	1.592,93	236,89	40,63	154,21	77,79	113,85	46,20	<LD	<LD
LD	38,52	36,13	9,31	66,35	28,33	19,15	6,87	17,12	7,19	21,31	16,55	18,16	6,88
K (ppm)	6.732,50	<LD	6.865,06	<LD	<LD	3.988,53	5.460,02	5.494,93	10.278,56	12.162,09	12.792,38	14.851,15	15.009,59
1σ	601,95	<LD	423,53	<LD	<LD	639,78	97,39	387,45	204,03	321,44	135,56	1.062,33	100,61
LD	119,25	109,90	27,16	196,33	84,08	56,18	19,65	48,23	22,12	63,07	45,72	49,43	18,67
Ca (ppm)	1.379,23	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	104,02	<LD	<LD	554,18	<LD	961,06	783,78
1σ	1.244,98	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	305,15	<LD	<LD	664,91	<LD	1.931,09	294,28
LD	217,85	181,60	46,65	319,62	132,48	92,14	32,91	85,86	33,11	98,00	79,11	81,23	33,57
Cu (ppm)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1σ													
LD													
Zn (ppm)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
1σ													
LD													
As (ppm)	188,40	810,27	231,86	311,74	530,66	376,90	242,57	271,32	148,24	155,21	163,01	217,12	216,16
1σ	18,92	105,63	17,83	86,25	92,59	19,43	5,80	15,02	8,53	11,72	8,62	20,25	7,69
LD	2,10	1,73	0,41	3,34	1,20	0,86	0,29	0,80	0,33	1,09	0,81	0,90	0,34
Sr (ppm)	4,73	6,16	1,73	9,58	5,88	2,78	5,41	4,59	44,68	54,56	27,97	45,00	42,88
1σ	2,19	6,70	1,50	9,48	9,77	1,81	0,56	1,40	2,75	4,01	2,17	3,76	2,07
LD	0,40	0,30	0,07	0,60	0,15	0,13	0,04	0,12	0,04	0,16	0,16	0,10	0,07
Sb (ppm)	11,36	30,77	1,92	<LD	50,55	<LD	0,45	<LD	1,95	6,68	7,10	<LD	3,54
1σ	5,26	20,49	3,39	<LD	30,43	<LD	0,79	<LD	1,68	2,83	1,53	<LD	0,97
LD	0,97	0,77	0,21	1,67	0,51	0,46	0,16	0,39	0,18	0,53	0,43	0,40	0,18
Cs (ppm)	15,26	1,62	27,86	65,90	17,49	22,42	23,05	22,57	69,66	75,59	87,28	99,36	81,39
1σ	2,75	6,86	3,14	18,60	10,45	2,53	0,96	2,25	3,01	4,14	3,35	4,43	2,50
LD	0,25	0,22	0,06	0,36	0,18	0,08	0,03	0,06	0,03	0,10	0,12	0,07	0,04
Ba (ppm)	29,46	<LD	44,28	26,81	<LD	9,27	<LD	<LD	4,89	35,46	13,94	2,37	10,83
1σ	11,73	<LD	14,93	45,24	<LD	4,58	<LD	<LD	2,80	8,75	4,17	7,41	2,77
LD	1,83	1,44	0,50	3,19	1,01	0,66	0,23	0,68	0,26	0,89	0,83	0,46	0,38

Tabela 8. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em quartzo dos veios que cortam as litologias de Gongo Soco associadas ao Au-PGE, QF.

Amostras	Quartzo de veio de quartzo-especularita															
	FIA1-IF1	FIA1-IF4	FIA1-IF8	FIA1-IF9	FIA2-IF5	FIA2-IF6	FIA2-IF2	FIA2-IF1	FIA1-IF22	FIA1-IF12	FIA2-IF10	FIA3-IF2	FIA2-IF3	FIA2-IF7	FIA3-IF1	FIA2-IF4
NaCl_{eqv}	11,34	10,98	11,58	9,86	12,85	13,07	12,85	12,85	14,04	13,07	11,46	13,72	14,36			
Li (ppm)	79,55	64,18	34,55	183,06	193,97	184,57	429,17	525,93	189,59	316,83	163,73	175,18	105,96	128,99	163,52	153,49
1σ	18,24	62,79	71,37	354,52	15,90	104,47	12,74	19,68	13,39	5,28	52,77	5,14	9,77	6,21	4,61	5,42
LD	12,45	3,25	2,43	21,13	1,38	1,02	2,20	26,49	2,29	0,36	2,60	0,97	2,27	1,55	0,30	1,67
B (ppm)	558,80	708,14	<LD	388,89	1.138,58	2.076,33	1.320,53	1.182,35	185,01	976,44	1.976,68	526,25	185,99	366,27	421,40	732,27
1σ	85,78	291,20	<LD	1.573,20	57,96	677,92	36,04	47,28	21,70	14,82	295,35	14,21	23,64	17,64	18,27	20,05
LD	60,20	14,83	11,14	93,82	9,65	5,85	11,42	64,53	13,31	1,79	12,49	6,97	11,76	10,76	2,50	10,32
Na (ppm)	39.785,39	39.002,76	27.181,83	18.321,04	43.710,12	22.797,55	40.917,71	42.028,25	46.739,68	41.016,94	33.309,73	55.232,65	46.409,28	39.972,84	48.951,64	50.287,95
1σ	177,12	267,93	252,39	581,69	177,87	190,54	88,14	132,47	148,52	42,06	426,15	65,45	140,03	76,30	48,20	66,56
LD	11,41	2,65	1,97	16,52	1,72	1,12	2,47	160,18	2,84	0,46	3,19	1,53	3,06	2,25	0,61	2,44
Mg (ppm)	3,45	<LD	2.960,69	59,84	38,94	<LD	69,13	19,11	2,05	32,64	8,60	9,24	5,38	5,99	5,77	2,63
1σ	2,25	<LD	92,01	79,87	6,10	<LD	4,11	3,03	1,21	1,38	21,04	1,05	2,14	1,12	1,29	1,10
LD	2,17	0,51	0,31	2,88	0,76	0,09	1,12	4,72	1,45	0,21	1,53	0,38	1,25	0,70	0,22	1,15
S (ppm)	2.974,33	10.598,00	<LD	13.513,21	530,02	13.904,67	1.350,90	756,57	411,97	712,90	39.523,41	530,74	1.783,17	1.096,14	<LD	1.627,25
1σ	175,93	690,65	<LD	3.803,71	185,10	7.326,00	67,20	55,67	59,22	28,88	1.761,25	24,78	113,80	55,09	<LD	71,82
LD	133,66	33,04	25,63	216,87	79,15	47,60	109,09	134,29	90,12	15,50	107,79	50,60	91,18	75,30	18,98	77,54
K (ppm)	5.440,20	6.513,73	17.513,12	15.999,08	12.966,10	12.448,46	9.576,25	9.451,43	9.665,02	14.540,22	9.676,28	13.825,81	10.356,92	9.211,90	8.767,79	10.981,65
1σ	277,10	1.041,22	1.111,89	5.869,08	282,61	10.668,65	102,50	97,02	117,48	53,60	2.948,01	53,39	213,43	105,79	232,04	143,04
LD	217,87	52,86	40,31	338,79	115,67	69,19	154,88	202,97	151,90	26,58	184,83	90,41	167,04	138,79	35,67	152,86
Ca (ppm)	<LD	<LD	17.366,12	23.948,14	1.015,24	35.997,79	1.167,07	2.550,42	<LD	1.950,91	14.323,61	<LD	<LD	909,18	721,28	<LD
1σ	<LD	<LD	16.518,80	78.965,13	1.141,18	42.209,62	391,17	349,75	<LD	210,24	11.873,56	<LD	<LD	402,61	937,37	<LD
LD	3.225,03	750,39	587,23	4.628,14	468,21	276,79	633,51	790,97	605,45	104,21	725,09	355,06	651,67	546,18	141,61	600,75
Cu (ppm)	<LD	<LD	556,64	<LD	52,58	65,69	59,43	46,23	<LD	3,93	16,09	28,41	<LD	26,60	46,84	17,51
1σ	<LD	<LD	62,91	<LD	9,84	174,71	5,60	6,88	<LD	1,11	51,85	2,47	<LD	3,53	4,46	2,94
LD	4,04	1,11	0,83	4,41	3,04	1,39	2,90	11,01	3,85	0,48	3,62	1,74	2,94	2,55	0,77	2,27
Zn (ppm)	<LD	<LD	681,26	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	20,88	<LD	<LD
1σ	<LD	<LD	82,56	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	11,01	<LD	<LD
LD	12,16	2,63	2,27	17,58	6,38	3,42	8,30	11,35	8,66	1,39	9,82	4,43	8,64	7,08	1,78	7,44
As (ppm)	586,69	341,25	50,12	691,56	979,39	271,20	1.439,14	887,07	650,04	1.116,35	2.929,07	739,07	689,47	461,98	508,14	709,34
1σ	24,21	31,18	23,14	133,54	28,77	174,75	19,00	20,89	19,84	7,93	151,29	8,43	19,63	9,39	6,88	9,14
LD	4,23	0,83	0,67	5,03	2,22	1,28	2,75	27,79	3,09	0,50	3,48	1,64	3,10	2,44	0,56	2,18
Sr (ppm)	10,76	18,50	8,39	<LD	21,27	12,16	49,90	25,84	10,17	28,07	15,57	19,64	17,74	15,88	18,29	14,44
1σ	1,96	4,08	4,64	<LD	2,63	15,12	2,08	2,10	1,49	0,75	8,47	0,83	1,88	1,07	0,74	0,81
LD	0,56	0,14	0,08	0,94	0,34	0,13	0,28	2,99	0,58	0,07	0,50	0,29	0,28	0,45	0,06	0,33
Sb (ppm)	2,07	0,55	15,77	43,82	2,04	27,95	24,21	16,27	1,96	17,81	139,38	14,37	5,85	8,07	1,32	15,70
1σ	2,44	8,15	9,62	44,04	3,13	119,19	2,16	2,36	1,26	0,93	36,64	1,00	2,41	1,36	2,40	1,76
LD	1,98	0,44	0,35	2,59	1,51	0,83	1,84	4,02	1,88	0,27	1,87	0,86	1,78	1,46	0,32	1,65
Cs (ppm)	12,39	5,87	9,35	1,49	22,17	<LD	21,87	21,30	9,07	17,82	33,63	13,48	11,55	9,10	8,74	12,60
1σ	1,92	2,60	3,29	11,87	2,10	<LD	1,23	1,68	1,25	0,54	10,88	0,61	1,41	0,71	0,73	0,68
LD	0,55	0,12	0,12	0,90	0,35	0,19	0,49	2,40	0,67	0,08	0,55	0,30	0,49	0,29	0,09	0,31
Ba (ppm)	3,83	6,03	4.616,90	118,99	22,61	<LD	40,24	17,15	<LD	1,59	<LD	1,62	4,91	5,42	1,72	<LD
1σ	4,18	12,69	174,95	110,29	7,56	<LD	5,24	4,75	<LD	0,64	<LD	0,93	4,42	2,22	3,58	<LD
LD	3,61	0,84	0,69	5,46	2,58	1,60	3,28	8,47	4,23	0,61	4,33	1,25	3,77	2,56	0,62	2,75

Tabela 9. Resultados das análises de LA-ICP-MS das inclusões fluidas em especularita dos veios que cortam as litologias de Itabira associadas ao Au-PGE, QF.

Amostras	Aquo-carbônica (tipo 1)												
	FI4	FI3	FI6	FI8	FI9	FI10	FI11	FI1	FI2	FI18	FI16	FI14	FI12
IF													
NaCl_{equiv}	24	23	23	24	23	23	24	24	24	23	23	24	24
Li (ppm)	489,17	407,41	371,39	1.253,16	1.484,11	900,23	1.417,04	765,97	532,23	672,00	965,23	1.017,54	2.676,42
1σ	26,64	17,83	13,73	37,61	82,56	41,28	75,31	28,88	40,07	31,02	87,56	53,97	182,22
LD	0,20	0,32	0,17	0,55	0,60	0,55	0,63	0,11	0,09	0,20	0,18	0,19	0,38
B (ppm)	314,67	399,43	416,21	274,75	368,82	193,80	413,73	244,23	217,86	373,06	426,10	449,15	298,15
1σ	50,42	32,05	27,35	55,72	183,47	108,45	132,66	43,35	116,49	44,11	145,57	81,46	183,46
LD	2,05	3,59	1,93	5,10	6,97	5,64	5,95	1,22	1,13	1,74	1,96	1,97	3,34
Na (ppm)	72.263,88	77.169,62	81.736,67	72.571,75	52.291,19	70.012,10	77.499,67	80.124,10	89.794,10	79.748,37	59.388,08	81.309,40	74.408,02
1σ	211,41	161,39	133,33	188,55	312,19	236,63	366,77	195,43	331,16	223,43	454,14	317,62	637,36
LD	0,28	0,49	0,27	0,69	0,93	0,87	0,84	0,18	0,16	0,25	0,26	0,29	0,45
Mg (ppm)	634,42	189,36	225,93	843,23	1.100,46	563,67	1.016,62	491,99	653,88	176,68	450,94	596,81	2.246,84
1σ	25,87	10,60	9,55	25,99	58,36	28,01	54,46	21,07	41,52	15,63	62,33	38,23	145,84
LD	0,16	0,29	0,11	0,32	0,18	0,39	0,33	0,07	0,09	0,05	0,17	0,12	0,21
S (ppm)	6.786,86	<LD	2.507,09	<LD	1.508,67	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	2.819,93	21.092,07
1σ	256,11	<LD	104,31	<LD	935,27	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	398,98	1.050,80
LD	10,38	18,44	10,00	24,25	31,79	28,56	10,00	6,07	5,98	8,25	9,59	9,78	16,55
K (ppm)	16.936,32	22.202,52	19.126,16	17.524,85	13.800,02	13.098,09	10.564,81	14.897,91	3.537,69	19.251,53	27.682,66	24.619,98	39.448,61
1σ	401,34	224,23	180,34	515,10	1.778,30	1.073,32	1.297,65	383,96	1.148,65	349,35	1.343,78	690,06	1.824,10
LD	17,69	32,33	18,01	45,86	61,81	56,03	54,75	11,60	11,41	16,00	18,58	18,96	32,49
Ca (ppm)	22.100,64	8.971,13	1.197,12	21.486,13	55.694,13	27.123,57	13.987,19	13.959,99	<LD	5.303,04	35.757,98	<LD	<LD
1σ	4.954,03	2.757,54	1.911,65	6.177,12	21.233,86	13.041,76	15.135,51	4.517,99	<LD	3.630,15	15.710,88	<LD	<LD
LD	233,55	428,45	213,53	616,31	815,96	752,48	666,26	144,52	133,29	189,14	221,13	213,19	391,48
Cu (ppm)	3.344,04	4.705,48	4.196,77	2.457,14	865,98	4.551,76	4.134,30	3.481,10	6.956,71	<LD	<LD	946,67	3.931,92
1σ	79,93	69,99	53,14	61,44	75,68	106,95	150,39	73,44	166,72	<LD	<LD	64,72	265,20
LD	0,34	0,59	0,36	0,84	1,15	0,75	1,25	0,16	0,17	0,37	0,42	0,38	0,62
Zn (ppm)	828,09	424,33	488,01	1.320,87	1.583,09	1.267,65	1.807,93	1.198,12	1.387,01	1.110,56	3.280,54	3.354,47	5.172,43
1σ	42,98	21,40	18,32	47,68	109,13	63,71	102,83	45,60	85,54	49,36	196,75	117,50	307,02
LD	0,71	1,33	0,69	1,80	2,24	2,22	1,98	0,54	0,52	0,66	0,79	0,81	1,47
As (ppm)	100,35	388,88	416,89	84,79	104,94	73,17	<LD	140,64	236,61	137,78	<LD	109,19	48,42
1σ	10,91	12,93	11,26	10,50	28,47	17,89	<LD	10,58	25,69	11,46	<LD	15,36	30,79
LD	0,30	0,58	0,29	0,76	0,88	0,86	0,89	0,18	0,17	0,22	0,29	0,31	0,53
Sr (ppm)	313,31	106,53	142,88	158,79	173,71	161,78	257,18	130,54	176,08	120,37	144,46	149,85	280,94
1σ	10,15	4,33	4,01	6,43	13,24	8,27	15,30	5,60	10,50	6,18	16,19	9,87	28,07
LD	0,03	0,07	0,04	0,11	0,13	0,14	0,11	0,03	0,01	0,04	0,04	0,05	0,09
Sb (ppm)	11,94	2,99	1,28	<LD	15,24	<LD	<LD	2,30	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
1σ	5,37	2,35	1,91	<LD	17,51	<LD	<LD	4,33	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
LD	0,17	0,35	0,17	0,49	0,62	0,48	0,56	0,12	0,11	0,15	0,20	0,19	0,32
Cs (ppm)	51,95	70,60	62,92	71,84	53,62	77,14	104,63	54,15	71,06	59,47	115,85	77,69	103,44
1σ	3,55	3,05	2,31	3,86	7,28	5,25	8,66	3,15	6,10	3,78	12,49	6,36	15,05
LD	0,06	0,09	0,05	0,18	0,17	0,16	0,18	0,04	0,03	0,05	0,05	0,05	0,09
Ba (ppm)	126.961,26	723,27	2.037,00	1.385,69	375,08	1.933,06	2.294,32	2.045,48	3.434,35	584,03	1.562,73	2.088,79	1.699,71
1σ	554,29	30,71	41,33	71,27	147,36	84,95	153,80	59,37	123,72	37,54	162,43	97,55	185,82
LD	0,27	0,70	0,29	0,74	1,61	1,45	1,11	0,24	0,21	0,33	0,40	0,47	0,60