

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**TIPOLOGIAS DE MINÉRIO E ASSINATURA ISOTÓPICA DE ENXOFRE DO
DEPÓSITO DE COBRE-OURO FURNAS, PROVÍNCIA CARAJÁS**

Maíra Antunes Alves

Orientadora: Professora Doutora Lena Virgínia Soares Monteiro
Coorientadora: Geóloga Silvandira dos Santos Góes Pereira de Jesus

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2016 / 34)**

SÃO PAULO
2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Instituto de Geociências

**TIPOLOGIAS DE MINÉRIO E ASSINATURA ISOTÓPICA DE ENXOFRE DO
DEPÓSITO DE COBRE-OURO FURNAS, PROVÍNCIA CARAJÁS**

Monografia de Trabalho de Formatura

TF 16/34

IGc-Instituto de Geociências



Tipologias de minério e assinatura isotópica de enxofre
depósito de cobre-ouro Furnas, Provín

M27114



Maíra Antunes Alves

Orientadora: Professora Doutora Lena Virgínia Soares Monteiro

Coorientadora: Silvandra dos Santos Góes Pereira de Jesus

São Paulo

2016

TF
A474
MA. x

U.S. DEPARTMENT OF JUSTICE

WASHINGTON, D.C. 20535

ON JANUARY 10, 1974, THE FOLLOWING INFORMATION WAS RECEIVED:

RE: [illegible] [illegible] [illegible] [illegible] [illegible]

RE: [illegible] [illegible] [illegible] [illegible] [illegible]

PII-45

RE: [illegible]

RE: [illegible]

RE: [illegible] [illegible] [illegible] [illegible] [illegible]

RE: [illegible] [illegible] [illegible] [illegible] [illegible]

RE: [illegible]

RE: [illegible]

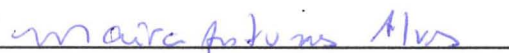
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Instituto de Geociências

TIPOLOGIAS DE MINÉRIO E ASSINATURA ISOTÓPICA DE ENXOFRE DO
DEPÓSITO DE COBRE-OURO FURNAS, PROVÍNCIA CARAJÁS

Monografia de Trabalho de Formatura

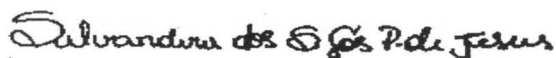
TF 16/34



Maíra Antunes Alves



Orientadora: Professora Doutora Lena Virgínia Soares Monteiro



Coorientadora: Silvandira dos Santos Góes Pereira de Jesus

São Paulo

2016

"There is no abstract art. You must always start with something."

Pablo Picasso

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, em primeiro lugar, por todo o suporte que me ofereceram ao longo de todo o meu crescimento, sempre me apoiando e acreditando em mim, mesmo naqueles momentos em que eu mesma não acreditava. Nenhuma palavra será suficiente para descrever minha gratidão. Obrigada!

Agradeço à minha família que sempre estive ao meu lado, aos meus irmãos, tias, tios, primos e primas e em especial às minhas avós, os melhores exemplos de superação

Um grando obrigado à todos os meus amigos, que de alguma forma contribuíram para que eu me tornasse o que sou atualmente. Gaby, que cresceu junto comigo e continua sendo minha melhor amiga, me apoiando nos momentos mais difíceis e gargalhando juntas nos momentos de alegria; Julio, o melhor parceiro e companheiro para todas as horas, desde discussões sobre geologia, coisas bobas do dia-a-dia, dificuldades da vida e planos de um futuro duradouro; Dama, a melhor companheira de campo, risadas, reclamações e choros; Biska, aquele que sempre me ouve reclamar e me faz sorrir mesmo nos momentos de tristeza e desespero.

À todo o rebanho (Mormaço, Manja, Consti, Café, Bundinha Ugo), obrigada por estarem comigo durante toda a graduação, por todos os campos e eventuais trabalhos em grupo, por todo o companheirismo e amizade. Obrigada basquete feiminino! Passamos por muita coisa durante esses dois anos treinando juntas, desde aquelas que desistiram até as poucas remanescentes, espero que o time continue crescendo. Pingola, Maria, Jade, Indi, Kiwi, Peps, Madre, Tênia, Vera, Mel, meninas da psico e todas as outras de quem talvez eu tenha me esquecido, obrigada por todos os treinos, risadas, sufocos, suor, vitórias e derrotas que a vivência dentro de um esporte coletivo me proporcionou. Vou sentir saudades!

Sou grata por fazer parte da turma 55, uma das poucas que conheço sem grandes desavenças, unida durante todos esses cinco anos. Obrigada pelos campos, aulas, jogos de areião, resumos para prova, dicas e por toda a experiência que vivenciamos juntos. Àqueles que seguiram um caminho diferente (em especial Spu e Vá) e a todos os outros sobreviventes (Meia, Yaki, Lys, Cruz, Mic, Bu, Vavá, Chucrute, Seiji, Ki e demais) e agregados (em especial a Vilma), vocês sempre farão parte da minha história e por mais que não nos vejamos mais com tanta frequência, sempre guardarei boas lembranças.

Agradeço a todo o pessoal da segurança, limpeza, cantina, biblioteca, materiais didáticos, laboratórios (principalmente ao Isaac e à Jordana, por toda a paciência e ajuda durante o desenvolvimento desse trabalho). Obrigada Museu de Geociência, Miriam, Ideval e Dani, vocês me ajudaram a crescer profissionalmente e, além de ex-chefes, são grandes amigos.

Quero agradecer, também, à todos os professores que passaram pela minha vida desde a pré-escola até o ensino superior, todos contribuíram de alguma forma para o meu

crescimento pessoal e acadêmico. Agradeço principalmente à professora Lena, por ser a grande profissional, professora e orientadora que é, sempre disposta a discutir e tirar minhas dúvidas, de portas abertas e acompanhando todas as etapas aqui desenvolvidas. Obrigada pela orientação, Dira. Agradeço sua disponibilidade pra me ajudar em tudo que precisei, principalmente pela sua atenção. Obrigada às duas!

Por fim, gostaria de agradecer à Deus, por todas as pessoas incríveis que passaram por minha vida, pela minha família, pela minha vida e por toda a força e fé que me proporciona nos momentos difíceis, bem como por toda alegria nos momentos de felicidade.

Sumário

| | |
|---|----|
| RESUMO | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| 1. INTRODUÇÃO | 3 |
| 2. OBJETIVOS | 4 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 4 |
| 3.1 Materiais | 4 |
| 3.2 Métodos | 4 |
| 3.2.1 Pesquisa Bibliográfica..... | 4 |
| 3.2.2 Descrição macroscópica dos testemunhos de sondagem | 4 |
| 3.2.3 Petrografia em luz transmitida e refletida | 5 |
| 3.2.4 Microscopia eletrônica de varredura | 5 |
| 3.2.5 Estudo em isótopos estáveis de sulfetos do minério de Furnas | 5 |
| 4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 6 |
| 4.1 Aplicação de isótopos de enxofre em estudos metalogenéticos..... | 6 |
| 4.2 Província Carajás | 8 |
| 4.3 Depósito de Cu-Au Furnas: Estudos Prévios | 11 |
| 5. RESULTADOS OBTIDOS..... | 14 |
| 5.1 Caracterização das tipologias de minério de cobre-ouro do depósito Furnas | 14 |
| 5.1.1 Grupo I: Sulfetos associados a veios de quartzo | 15 |
| 5.1.2 Grupo II: Bornita hospedada em clorita-biotita-hornblenda xistos..... | 21 |
| 5.1.3 Grupo III: Bornita hospedada em biotita-clorita xistos, com calcopirita associada | 24 |
| 5.1.4 Grupo IV: Calcopirita hospedada em clorita-biotita-hornblenda anfibolito, com pirita associada..... | 28 |
| 5.1.5 Grupo V: Calcopirita ou bornita associadas à magnetita | 33 |
| 5.1.6 Grupo VI: Pirrotita hospedada em muscovita-biotita-quartzo-xisto | 38 |
| 5.1.7 Grupo VII: Calcopirita hospedada em biotita-granada xistos | 43 |
| 5.2 Assinatura isotópica de enxofre em sulfetos do depósito Furnas | 45 |
| 6. DISCUSSÕES..... | 46 |
| 6.1 Alterações hidrotermais e contexto estrutural..... | 46 |
| 6.2 Mineralização cupro-aurífera..... | 51 |
| 6.3 Fontes de enxofre | 52 |
| 7. CONCLUSÕES..... | 55 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 59 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Intervalos de variação dos valores de $\delta^{34}\text{S}$ de diversos materiais geológicos e reservatórios geoquímicos de enxofre (Ohmoto, 1986; Hoefs, 2009)..... | 7 |
| Figura 2: Províncias tectônicas do norte do Brasil, com ênfase na compartimentação tectônica do Cráton Amazônico (Vasquez <i>et al.</i> , 2008). | 9 |
| Figura 3: (A) Localização da Província Carajás no Cráton Amazônico; (B) Divisão da Província Carajás nos domínios Rio Maria (DRM) e Carajás (DC), limitado a norte pelo Domínio Bacajá (DB); (C) Mapa geológico do Domínio Carajás da Província Carajás e áreas adjacentes (modificado de Vasquez <i>et al.</i> 2008) com a localização do depósito Furnas. | 11 |
| Figura 4: Mapa geológico e das zonas de alteração hidrotermal da porção sudeste do depósito de cobre-ouro de Furnas (Modificado de Iguma, 2015; Jesus, 2015)..... | 12 |
| Figura 5: Seção geológica-tipo do Depósito Furnas, mostrando a distribuição das zonas de alteração hidrotermal (Modificado de Jesus, 2015). | 13 |
| Figura 6: Fotografia (A) e fotomicrografias (B, C, D, E, F) das amostras dos sulfetos associados a veios de quartzo do Grupo I. A (FD04 141,25 m): <i>infill</i> de bornita (Bn) em veio de quartzo (Qz), com fragmentos de quartzo englobados total ou parcialmente pelo sulfeto. B (FD04 141,25 m): vênula de bornita com calcosina (Cn) intercrescida, englobando fragmentos do veio de quartzo (luz refletida). C (FD04 141,25 m): intercrescimento simplectítico entre bornita e calcosina (luz refletida). D (FD04 141,25 m): quartzo com extinção ondulante, bandas de deformação e contatos interlobados, por vezes associados a agregados de quartzo muito finos (luz transmitida, polarizadores cruzados). E (luz refletida com polarizadores descruzados) e F (luz refletida com polarizadores cruzados) mostram uma vênula de bornita englobando cristais euédricos de magnetita (Mt) e rutilo(Rt) associados e alguns cristais de magnetita com rutilo anedral nas bordas, com destaque em F para as reflexões internas do rutilo, amostra FD45 272,75 m. | 17 |
| Figura 7: Fotografias (A, B e F) e fotomicrografias (C, D e E) de sulfetos associados a veios de quartzo do Grupo I. A (FD45 272,45 m): bornita (Bn) em rocha silicificada, por vezes englobando fragmentos de quartzo (Qz). B (FD45 272,45 m): bornita parcialmente oxidada e substituída por malaquita (Mal), envolvendo fragmentos de quartzo. C (FD45 272,45 m): bornita parcialmente manteeda por malaquita e cristal intercrescido com calcopirita (Cpy) (luz refletida). D (FD45 272,45 m): vênula de bornita englobando albita (Ab), biotita (Bt) e fragmentos do veio de quartzo (luz transmitida e polarizadores cruzados). E (FD45 272,45 m): vênulas de bornita em rocha silicificada (luz refletida). F (FD04 151,56): bolsão de calcopirita e bornita, associado a veio de quartzo. Quartzo (Qz), bornita (Bn), malaquita (Mal), calcopirita (Cpy), albita (Ab), biotita (Bt). | 19 |
| Figura 8: Imagem de elétrons retroespalhados obtida com uso de MEV (A) e gráficos de espectroscopia de energia dispersa (EDS) (D e C), amostra FD45 272,75 m. A: vênula de bornita (Bn) com microinclusões de curita (Cur) e cristal euédrico de thorogumita(Thg) associado. Observa-se também, curita englobada por soddyita (Sdy) e esta, por sua vez, englobada por bornita. B: espectro de EDS da thorogumita, com forte presença de tório (Th) e urânio (U) e, subordinadamente, irídio (Ir), ósmio (Os) e cério (Ce). C: picos de composição mineral da soddyita, destacando-se o maior pico de urânio e, subordinadamente, de cério. Bornita (Bn), curita (Cur), thorogumita (Thg), soddyita (Sdy)..... | 20 |
| Figura 9: Fotografias (A e B) e fotomicrografias (C, D, E e F) das amostras de testemunhos de sondagem representativas da tipologia de minério do Grupo II, com bornita hospedada em biotita–anfíbólio–clorita xistos (X). A (FD04 181,30 m): bornita (Bn) subeuhedral associada a bolsão de | |

quartzo (Qz) hospedado em biotita–anfíbólio–clorita xisto. B (FD04 183,80 m): bolsão de bornita associado a grunerita, mais clara e fina (Gru), hospedados no biotita–anfíbólio–clorita xisto. C (FD04 183,80 m): bolsão de bornita com grunerita (Gru) associada às suas bordas, por vezes com núcleos de hornblenda (Hbl) (luz transmitida, polarizadores descruzados). D (FD04 183,80 m): imagem correspondente à C, em luz refletida. E (FD04 183,80 m): Bolsão de bornita com grunerita acicular associada à sua borda, bem como grunerita subeuédrica prismática com núcleo de hornblenda (luz transmitida, polarizadores descruzados). F (FD04 183,80 m): imagem correspondente a E, porém vista em luz refletida, ressaltando a grunerita acicular nas bordas do bolsão de bornita e lamelas de calcosina (Cn) intercrescidas à bornita e calcopirita (Cpy) muito fina associada a fratura na bornita. Bornita (Bn), quartzo (Qz), grunerita (Gru), hornblenda (Hbl), covelina (Cn), biotita–anfíbólio–clorita xisto (X)..... 22

Figura 10: Fotomicrografias em luz refletida da amostra FD04 183,80 m, representativa da tipologia de minério do Grupo II, com bornita hospedada em biotita–anfíbólio–clorita xisto. A: Bornita (Bn) intercrescida com covelita (Cv) com lamelas de calcosina (Cs) em tom azul levemente mais claro. B: imagem correspondente a A, porém com polarizadores cruzados, ressaltando as lamelas de covelina, com forte cor de anisotropia laranja, paralelas à clivagem da calcosina (Cn). C: bornita com calcosina intercrescida, com covelina subordinada, e calcopirita (Cpy) muito fina acicular associada a fraturas na bornita, com crescimento perpendicular às estruturas. D: Intercrescimento entre bornita e calcopirita. Bornita (Bn), calcopirita (Cpy), calcosina (Cn), covelina (Cv)..... 23

Figura 11: Fotografias (A e B) e fotomicrografias (C e D) representativas da tipologia de minério do Grupo III com bornita hospedada em biotita–clorita xisto (X). A (FD45 315,65 m): bornita (Bn) em bolsão e vênulas interligadas, que cortam bolsão de quartzo (Qz) no biotita–clorita xisto. B (FD45 315,65 m): fratura preenchida por bornita, com quartzo associado. C (FD45 315,65 m): vênulas de bornita, englobando total ou parcialmente fragmentos angulosos a arredondados de quartzo e de biotita (Bt) subeuédrica (luz refletida). D (FD45 315,65 m): imagem correspondente à C, porém em luz transmitida com polarizadores cruzados, mostrando evidência de recristalização do quartzo e sua associação com albita hidrotermal e biotita. E (FD45 216,35 m): vênula de bornita (luz refletida). F (FD45 216,35 m): imagem correspondente a E, em luz transmitida com polarizadores cruzados, ressaltando a associação entre vênulas de bornita e quartzo deformado, com cristais de feldspato alcalino (Kfd) com mantos de albita (Ab) na interface com o sulfeto. Bornita (Bn), quartzo (Qz), biotita (Bt), albita (Ab), feldspato potássico (Kfd). 26

Figura 12: Fotografia (A) e fotomicrografias em luz refletida retratam feições texturais de bornita e calcopirita do Grupo III. A (FD45 315,95 m): calcopirita (Cpy) englobada totalmente ou parcialmente por bornita (Bn), em porção rica em quartzo (Qz). B (FD45 315,65 m): cristal de bornita, com calcopirita intercrescida, em meio ao quartzo. C (FD45 315,65 m): bornita com intercrescimento de calcosina (Cn). D (FD45 315,65 m): bornita com porções substituídas por calcosina e por covelina (Cv) muito fina, ao longo de fraturas e bordas. Bornita (Bn), calcopirita (Cpy), quartzo (Qz), calcosina (Cn), covelina (Cv). 27

Figura 13: Fotografias (A, B e C) e fotomicrografias em luz refletida (D, E e F) representativas da tipologia de minério do grupo IV com calcopirita com pirita associada hospedada por biotita–anfíbólio–clorita xistos (X). (Grupo IV). A (FD04 86,68 m): veio de calcopirita (Cpy) (com vênulas mais finas interligadas), cortando o xisto. B (FD45 115,62 m): bolsão de pirita (Py) associada a fragmento de quartzo (Qz), com um cristal de calcopirita disseminado. C (FD45 115,62 m): bolsão de calcopirita com pirita associada, englobando pequenos fragmentos de quartzo. D (FD21 214,70 m): vênulas de pirita associadas a cristais de calcopirita. E (FD21 214,70 m): vênula com forte associação entre pirita e calcopirita. F (FD04 86,68 m): vênula de calcopirita englobando cristais aciculares de grunerita

(Gru). G (FD04 80,03 m): calcopirita com intercrescimento de bornita (Bn), esta com bordas de covelina (Cv). Calcopirita (Cpy), pirita (Py), quartzo (Qz), grunerita (Gru), covelina (Cv). 29

Figura 14: Fotomicrografias da tipologia de minério do Grupo IV com calcopirita hospedada por biotita–anfíbólio–clorita xisto (X). A (luz transmitida com polarizadores cruzados) e B (luz refletida) mostram calcopirita (Cpy) e com albita no contato entre sulfeto e o quartzo deformado (Qz) (FD21 79,85 m). C (FD21 214,70 m): vênulas de calcopirita cortando cristal prismático euédrico, provavelmente scheelita. D (FD21 214,70 m): cristal de hornblenda esverdeada com lamelas de calcopirita, concordantes à clivagem ou no contato entre cristais de anfíbólio. Notar que a hornblenda é substituída em suas bordas por anfíbólio incolor (grunerita) e por biotita, ao longo das clivagens. E (FD21 214,70 m): calcopirita englobando cristais de hornblenda euédricos, subeuédricos e aciculares, com cristais de albita hidrotermal associados. F (luz refletida) e G (luz transmitida com polarizadores descruzados) mostram uma vênula cortando o anfibolito da amostra FD04 86,68 m, preenchida pela associação de albita e calcopirita. Calcopirita (Cpy), albita (Ab), quartzo (Qz), biotita (Bt), hornblenda (Hbl), scheelita (Sch). 31

Figura 15: Fotomicrografias (A e B), imagem de elétrons retroespalhados obtida com uso de MEV (C) e gráfico de espectroscopia de energia dispersa obtido através de análise semi-quantitativa EDS (D). A (luz refletida com polarizadores descruzados), B (luz refletida) e C retratam vênula de calcopirita (Cpy) associada a quartzo (Qz) e manteada parcialmente por bastnasita (Bas). B destaca que em luz refletida, a bastnasita parece um mineral opaco com baixa refletividade, enquanto em luz transmitida (A) é um mineral translúcido incolor a levemente esverdeado. C: espectro de EDS da bastnasita, destacando a presença de lantânio (La), cério (Ce) e neodímio (Nd) na composição do mineral. A presença de pequenas quantidades de Cu-Fe-S e de Si foram interpretadas como relativas aos minerais hospedeiros ou próximos à bastnasita, tais como calcopirita e quartzo. Calcopirita (Cpy), quartzo (Qz), bastnasita (Bas). 32

Figura 16: Fotografia (A) e fotomicrografias (B, C, D, E e F) representativas da tipologia de minério do Grupo V, com sulfetos associados à magnetita. A (FD91 361,00 m): magnetitito com porfiroblastos de magnetita (Mt) imersos em matriz muito fina constituída por magnetita e anfíbólio, com calcopirita (Cpy) disseminada. B (FD 91 361,00 m): faixas com maior concentração de magnetita e calcopirita disseminada, associado tanto à magnetita quanto aos minerais de ganga (luz refletida). C (FD 91 361,00 m): calcopirita associada aos minerais de ganga (apatita = Ap e hastingsita = Anf), com magnetita subeuédrica (luz refletida). D (FD04 87,18 m): calcopirita manteada por bornita (Bn; luz refletida). E (FD91 394,60 m): vênulas de calcopirita associadas a cristais de magnetita, por vezes manteando-os parcialmente (luz refletida). F: imagem correspondente a E, porém em luz transmitida com polarizadores descruzados, retratando calcopirita associada fortemente a quartzo (Qz), e subordinadamente a allanita (Aln) e biotita (Bt). Calcopirita (Cpy), magnetita (Mt), anfíbólio (Anf), apatita (Ap), biotita (Bt), bornita (Bn), quartzo (Qz), allanita (Aln). 34

Figura 17: Fotografia (B), fotomicrografias (A, C e D) e micrografias retroespalhadas obtidas à partir de análise de microscopia eletrônica de varredura (F e E) representativas da tipologia de sulfetos do Grupo V, associados à magnetita. A (FD91 344,22 m): bornita englobando e cortando cristais subeuédricos de magnetita (luz refletida). B (FD91 344,22 m): bornita disseminada em magnetitito e associada a bolsões de quartzo nesse. C (FD91 344,22 m): bornita nos interstícios entre cristais de magnetita, por vezes truncando-os (luz refletida). D (FD91 361,00 m): porfiroblasto subédrico de magnetita com limites irregulares e feições de dissolução com finas inclusões de calcopirita (luz refletida). F (FD91 344,22 m): intercrescimento simplectítico entre bornita e calcosina (Cn), com microinclusões de cassiterita (Cst) e galena (Gn) na bornita. Bornita (Bn), magnetita (Mt), calcopirita (Cpy), galena (Gn), cassiterita (Cst), calconia (Cn), quartzo (Qz). 36

Figura 18: fotografia (A) e fotomicrografias (B, C, E e F) representativas da tipologia do Grupo VI com pirrotita hospedada em muscovita-biotita-quartzo xisto, amostra FD39 186,00 m. A: pirrotita orientada segundo a foliação do xisto, em zonas de substituição, com fragmentos desde angulosos até arredondados de quartzo e do xisto. B (luz refletida) e C (luz transmitida com polarizadores descruzados) mostram uma vênula de pirrotita englobando pseudomorfos euédricos (provavelmente andaluzita) totalmente substituídos por sericita e pirrotita. Além disso, algumas porções da borda da vênula estão com a mesma estrutura dos pseudomorfos. D: concentração de grafita (Gr) na interface entre zona de sericitização e zona de silicificação (luz refletida). E (luz transmitida com polarizadores descruzados) e F (luz refletida) mostram uma vênula de pirrotita fortemente associada a cristais euédricos de biotita verde, com quartzo também associado. Pirrotita (Po), quartzo (Qz), calcopirita (Cpy), sericita (Ser), grafita (Gr), biotita (Bt). 39

Figura 19: Fotografias (A) e fotomicrografias (B, C e D) da tipologia do Grupo VI com pirrotita (Po) hospedada em biotita-muscovita-quartzo xisto. A (FD02 256,62 m): pirrotita associada à calcopirita, disseminada, em porção silicificada do xisto. B (FD39 186,99 m): cristal de pirita (Py) associado a vênula de pirrotita, com destaque para a borda do grão irregular e corroída no contato com o outro sulfeto (luz refletida). C (FD39 186,99 m): vênulas de pirrotita com intercrescimento de calcopirita (Cpy) e quartzo associado (luz refletida). D: imagem correspondente a C, porém em vista em luz transmitida com polarizadores cruzados, ressaltando a associação entre os sulfetos e cristais de quartzo muito deformados, com lamelas de deformação. Pirrotita (Po), calcopirita (Cpy), pirita (Py), quartzo (Qz). 40

Figura 20: Imagens de elétrons retroespalhados retiradas com o uso de MEV (A, B, C e D) e gráfico de espectroscopia de energia de dispersão obtido por EDS (F), amostra FD 02 285,04 m. A: pirrotita (Po) com galena (Gn) euédrica na borda no contato entre calcopirita e chamosita (Chm). A galena possui microinclusões de telureto de paládio (TePd). B: Cristal de ilmenita (Ilm) com thorogumita (Thg) associada às bordas e como inclusões. Pirrotita (Po) é associada tanto à borda da thorogumita quanto da ilmenita. Biotita (Bt) aparece associada. C: Fairbankita (Fbt) com pirrotita associada, imersas em matriz de chamosita. D: Alloclasita/glaucodoto (All) euédrico associado à pirrotita e com inclusões de pirrotita e arseneto (As) não classificado. Fairbankita aparece associada a pirrotita. F: espectro de EDS da thorogumita, destacando a presença de tório (Th) e urânio (U) e, subordinadamente, ítrio (Y), irídio (Ir), cério (Ce), gadolínio (Gd) e neodímio (Nd). Pirrotita (Po), galena (Gn), chamosita (Chm), telureto de paládio (TePd), ilmenita (Ilm), thorogumita (Thg), fairbankita (Fbt), Alloclasita/glaucodoto (All). 42

Figura 21: Fotografia (A e B) e fotomicrografias (C, D, E e F) representativas da tipologia de minério do grupo VII. A (FD45 222,52 m): vênulas de calcopirita (Cpy) em muscovita-biotita-quartzo-granada xisto. B (FD45 222,52 m): Vênulas de calcopirita manteadas por quartzo (Qz) cortando o xisto, com porfiroblasto cinza de granada (Grt). C (luz refletida) e D (luz transmitida com polarizadores descruzados) mostram a associação entre vênulas de calcopirita e quartzo + clorita, preenchendo os interstícios entre cristais de granada coalescente (FD04 234,67 m). E (FD04 234,67 m): vênulas de calcopirita e pirita (Py), com magnetita (Mt) subeuédrica e anedral associada (luz refletida). F (FD45 222,52 m): calcopirita intercrescida com bornita (Bn) substituindo a grunerita (Gru) ao longo de seus planos de clivagem. Calcopirita (Cpy), granada (Grt), quartzo (Qz), biotita (Bt), clorita (Chl), pirita (Py), magnetita (Mt), bornita (Bn), grunerita (Gru). 44

Figura 22: Composição isotópica de enxofre em pirrotita, bornita e calcopirita das tipologias de minério I, II, IV, V e VI do depósito de cobre-ouro Furnas. A área rachurada corresponde à composição isotópica de enxofre do manto. 46

Figura 23: Tabela de hierarquização das relações entre minerais de alterações hidrotermais e estruturas. 47

| | |
|---|----|
| Figura 24: Fotomicrografias representativas das relações entre as fases de alteração hidrotermal. A (FD04 216,35 m): linhas tracejadas indicam direção de Sn. Nota-se que há um aglomerado de cristais de granada coalescentes orientados segundo a foliação, com vênulas de biotita preenchendo os interstícios entre os cristais. Vênulas de grunerita orientada segundo Sn amolda-se aos aglomerados e biotita não corta as estruturas. B (FD04 141,25 m): cristal de quartzo com lamelas de deformação na direção da linha tracejada. C (FD45 216,35 m): Cristais de feldspato potássico (Kfd) com aspecto turvo, englobados por bornita e com albita na interface com o sulfeto. D (Fd 45 220,62 m): foliação Sn marcada pela alternância entre faixas ricas em quartzo e faixas ricas em biotita, com granada associada. A imagem destaca através da linha traceja, a foliação Sn dobrada. E (FD02 234,67 m): magnetita estirada orientada segundo a Sn, destacada pela linha tracejada. F (Fd02 234,67 m): Clorita fortemente associada à calcopirita. Biotita (Bt), granada (Grt), grunerita (Gru), quartzo (Qz), bornita (Bn), albita (Ab), feldspato potássico (Kfd), magnetita (Mt), clorita (Chl). | 49 |
| Figura 25. Comparação entre a posição dos contornos de $\delta^{34}\text{S}$ em relação aos campos de estabilidade do sistema Fe-S-O e barita a 250°C, considerando o valor de $\Sigma\delta^{34}\text{S} = 0\text{‰}$. Linhas sólidas: contornos de $\delta^{34}\text{S}$. (Ohmoto e Rye, 1974). | 53 |
| Figura 26. Composição dos isótopos de enxofre em depósitos do tipo IOCG da Província Carajás, com destaque para a assinatura do depósito Furnas. A área rachurada representa a composição do manto. (modificado de Previato, 2016). | 54 |
| Figura 27: perfil dos furos de sondagem 02, 04, 45 e 91 da Vale no depósito de Furnas, correlacionando os litotipos principais do depósito com as zonas de alteração hidrotermal, o estilo de mineralização e a profundidade em que há ocorrência das tipologias do minério dos grupos I a VII descritos nesse trabalho (modificado de Jesus 2016). | 56 |

Índice de quadros

| | |
|---|----|
| Quadro 1: Tabela com as características de amostras representativas de intervalos mineralizados do depósito Furnas. *amostra escolhida para análise de isótopos de enxofre. **amostra escolhida para análise com secção delgada-polida descrita. ***amostra com secção delgada-polida previamente confeccionada. | 14 |
| Quadro 2: Tabela de identificação da composição isotópica de enxofre dos sulfetos de diferentes tipologias de minério do depósito de cobre-ouro Furnas. Bn = bornita; Cpy = calcopirita; Py = pirita; Po = pirrotita. | 45 |

RESUMO

O depósito de cobre-ouro Furnas, alvo desse estudo, está localizado na porção norte da Província Carajás, detentora de expressiva quantidade de depósitos classificados como do tipo óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG). Está inserido no contexto da Falha Transcorrente Cinzento, ao longo de um *trend* mineralizado com cerca de 9 km de extensão e direção WNW-ESSE.

O depósito é hospedado por unidades metavulcanossedimentares neoarqueanas e é espacialmente relacionado a dois expressivos corpos graníticos, o Granito Furnas, de idade ainda desconhecida, e o Granito Cigano, paleoproterozoico. Os corpos mineralizados são associados a extensas zonas de alteração hidrotermal, porém o papel do desenvolvimento da zona de falha e de suas reativações, assim como o da granitogênese, para a formação do depósito precisa ainda ser melhor compreendido.

As tipologias de minério reconhecidas no depósito de cobre-ouro Furnas foram classificadas em sete grupos: sulfetos associados a veios de quartzo ou a rochas fortemente silicificadas (grupo I); bornita em vênulas hospedadas em biotita-anfibólio-clorita xistos (grupo II); bornita-(calcopirita) hospedada em biotita-clorita xistos (grupo III), calcopirita-(pirita) hospedada em biotita-anfibólio-clorita xistos (grupo IV); calcopirita ou bornita associadas à magnetita (grupo V); pirrotita hospedada em biotita-quartzo-muscovita xistos (grupo VI) e calcopirita hospedada em biotita-granada xistos (grupo VII).

O minério do depósito é constituído principalmente por bornita e calcopirita em veios, vênulas e bolsões e, subordinadamente, por calcosina e covelina intercrescidas com bornita. Os sulfetos possuem forte associação com zonas silicificadas, albita hidrotermal e grunerita. Além disso, fases minerais portadoras dos elementos Co, As, Pd, U, Th, W, Te, Ag, Sn, Se, Nb, Ir e Os, assim como de elementos terras raras (Ce, La, Y, Nd, Gd) ocorrem associadas aos sulfetos. A presença de tungstênio (scheelita e wolframita), estanho (cassiterita) e Nb (ferberita), assim como as concentrações relativamente altas de U e Th, apontam para associação da mineralização com fluidos que evoluíram a partir da cristalização de granitos do tipo A, tal como o Granito Cigano, paleoproterozoico, aflorante a leste do depósito.

A presença de Pd e Co, comuns em depósitos IOCG, assim como de Ir e Os, reportados pela primeira vez nesses depósitos, sugere que mecanismos de interação fluido-rocha envolvendo rochas (meta)ultramáficas foram importantes para a evolução do sistema hidrotermal. Adicionalmente, a assinatura isotópica de enxofre em pirrotita ($\delta^{34}\text{S} = -0,37$ permil a 1,72 permil) indica fonte magmática para o enxofre, que pode ser proveniente diretamente de magmas ou ter sido lixiviado das rochas ígneas da Província Carajás.

ABSTRACT

The Furnas copper-gold deposit, the subject of this study, is located in the northern portion of the Carajás Province, which holds the largest amount of high-tonnage deposits classified as iron oxide-copper-gold deposits (IOCG) recognized worldwide. It is inserted in the context of the Cinzento Strike-slip Fault, along a mineralized trend with about 9 km of extension in the WNW-ESSE direction.

The deposit is hosted by Neoproterozoic metavolcanosedimentary units and spatially related to two expressive granites: the Mesoproterozoic or Neoproterozoic Furnas granite and the Paleoproterozoic Cigano granite. The ore bodies are associated with significant hydrothermal alteration, but the role of the development of the fault zone and their reactivations, as well as the granite emplacement, for the ore genesis needs to be better understood.

The ore types were classified into seven groups: sulfides associated with quartz veins or strongly silicified rocks (Group I); bornite in veinlets hosted in biotite-amphibole-chlorite schists (Group II); bornite-(chalcopryite) hosted in biotite-chlorite schists (Group III); chalcopryite-(pyrite) hosted in biotite-amphibole-chlorite schists (Group IV); bornite or chalcopryite associated with magnetite (Group V); pyrrhotite hosted in biotite-quartz-muscovite schists (Group VI); and chalcopryite hosted in biotite-garnet schists (Group VII).

The Furnas ore is mainly composed of bornite and chalcopryite in veins, veinlets and pockets and, subordinately, by calcosine and covellite intergrowth with bornite. The sulfides are strongly associated with silicified zones and hydrothermal albite and grunerite. In addition, mineral phases bearing the elements Co, As, Pd, U, Th, W, Te, Ag, Sn, Se, Nb, Ir and Os, as well as rare earth elements (Ce, La, Y, Nd, Gd) occur associated with sulfides. The presence of tungsten (wolframite and scheelite), tin (cassiterite) and Nb (ferberite), as well as the relatively high concentrations of U and Th, points to association of the mineralization with fluids that have evolved from the crystallization of A-type granites, such as the Paleoproterozoic Cigano granite, which outcrops eastwards.

The presence of Pd and Co, common in IOCG deposits, likewise of Ir and Os, reported for the first time in this deposit class, suggests that fluid-rock interaction involving (meta)- ultramafic rocks were important to the development of the hydrothermal system. Additionally, the sulfur isotopic signature of pyrrhotite ($\delta^{34}\text{S} = -0,37$ permil to 1,72 permil) indicates a magmatic source for sulfur, which can be derived directly from magmas or have been leached from igneous rocks of the Carajás Province.

1. INTRODUÇÃO

A Província Carajás, localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico, foi formada e estabilizada tectonicamente no Arqueano, compreendendo a porção de crosta continental mais antiga e melhor preservada do cráton (Tassinari & Macambira, 2004). Sua diversidade e quantidade de depósitos minerais a torna uma das mais importantes províncias minerais do mundo. Carajás destaca-se também como a região detentora da maior concentração de importantes depósitos de óxidos de ferro-cobre-ouro (IOCG) de alta tonelagem do planeta (Monteiro *et al.*, 2008). Alguns desses depósitos são também considerados os únicos da classe IOCG de idade arqueana atualmente conhecidos (Xavier *et al.*, 2012; Monteiro *et al.*, 2014). Apesar de importantes avanços acerca da compreensão de processos associados à formação desses depósitos, esses se caracterizam por uma alta variabilidade de atributos, o que dificulta o estabelecimento de um único modelo de evolução metalogenética para os depósitos cupro-auríferos de Carajás (Moreto *et al.*, 2011).

Dentre tais depósitos, destacam-se Salobo, Sossego, Alvo 118, Cristalino e Igarapé Bahia, além de outros pouco conhecidos, porém de grande porte, como o depósito de cobre-ouro Furnas, que apresenta recursos de aproximadamente 500 Mt @ 0,7% Cu (Jesus, 2015) e que será alvo desse estudo.

O depósito de cobre-ouro Furnas se localiza na porção norte da Província Carajás, no contexto da Falha Transcorrente Cinzento. A zona mineralizada de Furnas se estende por aproximadamente 9 km na direção WNW-ESSE (Santos, 2014). O depósito é hospedado por unidades metavulcanossedimentares neoarqueanas (Supergrupo Itacaiúnas, ca. 2,76 a 2,73 Ga; Machado *et al.*, 1991) e é espacialmente relacionado a dois expressivos corpos graníticos, o Granito Furnas, meso ou neoarqueano, e o Granito Cigano, paleoproterozoico. Os corpos mineralizados são associados a expressivas zonas de alteração hidrotermal (grunerita-granada-magnetita ou hastingsita-clorita) e a rochas constituídas por andalusita, muscovita, biotita e granada (Iguma, 2015; Jesus, 2015). O papel do desenvolvimento da zona de falha e da granitogênese, assim como a possível herança das sequências metavulcanossedimentares para a formação do depósito, precisam ainda ser melhor compreendidos.

Nesse estudo foram caracterizadas as distintas tipologias do minério cupro-aurífero, o modo de ocorrência dos sulfetos e suas texturas, assim como as paragéneses de minério e as assinaturas isotópicas de enxofre dos sulfetos. Dessa forma, esse estudo avaliou os estilos de mineralização e sua associação com a evolução geológica da área do depósito Furnas, bem como visou à caracterização das fontes de enxofre e variações de parâmetros físico-químicos responsáveis pela gênese dos tipos de minério.

2. OBJETIVOS

O presente projeto teve como foco os corpos de minério do depósito de Cu-Au Furnas, localizado na Província Carajás. O estudo objetivou a caracterização do modo de ocorrência, distribuição e composição mineralógica do minério e a identificação de fontes de enxofre e parâmetros físico-químicos associados à gênese dos distintos tipos de minério do depósito.

Com esse objetivo os estudos incluíram:

- (i) a caracterização das tipologias de minério de cobre-ouro, sua distribuição espacial, modo de ocorrência e relações com estruturas dúcteis, dúcteis-rúpteis e rúpteis e com zonas de alteração hidrotermal específicas;
- (ii) a identificação e detalhamento das associações de minerais de minério e paragêneses, possíveis zonamentos minerais, texturas dos sulfetos e modo de ocorrência do ouro e elementos traços (Ni, Co, Pd, ETR, U) presente nas zonas mineralizadas.;
- (iii) caracterização das assinaturas de isótopos de enxofre das distintas tipologias de minério.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Foram utilizados neste trabalho 29 amostras com expressivas quantidades de sulfetos provenientes de testemunho de sondagem de seis furos do depósito Furnas, previamente coletas pela orientadora e pela coorientadora desse estudo. Além disso, foram estudadas vinte secções delgada-polidas de rocha, confeccionadas a partir dos testemunhos.

3.2 Métodos

3.2.1 *Pesquisa Bibliográfica*

A revisão bibliográfica consistiu na consulta de publicações referentes ao contexto geológico da Província de Carajás e do depósito Furnas, a sistemática de isótopos de enxofre, a geoquímica do minério de depósitos cupro-auríferos do Domínio Carajás, bem como referências bibliográficas adicionais que forneceram suporte às fases do trabalho.

3.2.2 *Descrição macroscópica dos testemunhos de sondagem*

A descrição dos testemunhos de sondagem foi realizada no Laboratório de Petrografia Sedimentar (LabSed) do Instituto de Geociências da USP (IGc), com o auxílio de Lupa Zeiss SV 11. Fotografias das amostras foram obtidas a partir de uma câmera modelo Nikon e de câmera digital acoplada à lupa, com auxílio do *software* LAS.

3.2.3 Petrografia em luz transmitida e refletida

As análises petrográficas foram feitas em microscópios *Olympus* BXP 40 de luz refletida e transmitida, pertencentes ao Laboratório Didático de Microscopia Petrográfica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP) visando: (i) a identificação das paragêneses dos minerais de minério; (ii) relações texturais entre minerais de minério e de ganga; (iii) relações entre paragêneses de minério e microestruturas; e (iv) reconhecimento das evidências de sobreposições de eventos hidrotermais. Além disso, fotomicrografias foram obtidas no Laboratório de Petrografia Sedimentar (LabPetro) com o uso de câmera digital acoplada ao microscópio Leica DM750 P, bem como do *software* LAS.

3.2.4 Microscopia eletrônica de varredura

O estudo de microscopia eletrônica de varredura foi realizado no LABMEV do IGc-USP com uso de MEV LEO 440I com detectores de elétrons secundários e retroespalhados e espectroscopia de energia dispersiva (EDS) acoplado. O estudo incluiu a obtenção de imagens de elétrons retroespalhados, mapas composicionais de raios X e análises de química mineral semi-quantitativas com objetivo de identificar e detalhar as associações de minerais de minério, possíveis zonamentos minerais e modo de ocorrência do ouro e elementos traços, em especial Co, As, Pd, Te, W, Sn, Se, U, Th e ETR, presentes nas zonas mineralizadas.

3.2.5 Estudo em isótopos estáveis de sulfetos do minério de Furnas

Nove análises de isótopos de enxofre em pirrotita, calcopirita e bornita foram realizadas em diferentes tipologias de minério no Laboratório de Estudos Geocronológicos, Geodinâmicos e Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília pela técnica de Espectrometria de Massa de Razão Isotópica, do inglês *Isotopic Ratio Mass Spectrometry (IRMS)*. Os grãos de sulfetos foram separados com microretífica Dremel, cominuídos e selecionados com uso de lupa binocular. Para as análises foram utilizados 200 µg a 2000 µg de amostra de sulfetos colocadas em cápsulas de estanho e analisadas em um espectrômetro de massa de fluxo contínuo e fonte gasosa com setor magnético da marca Thermo Scientific MAT253 IRMS.

As análises foram feitas com o intuito de caracterizar a história geoquímica da formação de sulfetos hidrotermais. Como a fugacidade de oxigênio e de enxofre, pH, P_{H_2O} e temperatura dos fluidos hidrotermais controlam as composições isotópicas de $\delta^{34}S$ dos minerais (sulfetos e sulfatos), esses parâmetros foram avaliados a partir do balanço de massa entre espécies oxidadas e reduzidas de enxofre visando à identificação da fonte do enxofre para o sistema hidrotermal.

4. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Aplicação de isótopos de enxofre em estudos metalogenéticos

Amplamente distribuído na litosfera, biosfera, hidrosfera e atmosfera do planeta Terra, o enxofre (S) ocorre em três formas na natureza: na forma oxidada, como sulfato presente predominantemente nos oceanos e em evaporitos; na forma nativa, em capas de domos de sal e em algumas rochas vulcânicas; e na forma reduzida, como sulfetos em depósitos de minerais metálicos associados a rochas metamórficas, sedimentares e ígneas (Faure & Mensing, 2004). Assim, a composição isotópica de enxofre possui grande aplicação no estudo de depósitos minerais.

O enxofre possui quatro isótopos estáveis (^{32}S , ^{34}S , ^{33}S , ^{36}S , em ordem decrescente de abundância), sendo que sua composição isotópica é expressa pelo parâmetro $\delta^{34}\text{S}$, que representa a razão entre os dois isótopos mais abundantes na natureza.

A composição isotópica de enxofre pode ser expressa pela fórmula:

$$\delta^{34}\text{S} = \left[\frac{(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{spl}} - (^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{std}}}{(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{std}}} \right] \times 10^3 \text{‰},$$

na qual o parâmetro $(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{std}}$ corresponde à razão isotópica de enxofre do padrão, representado pela troilita (FeS) do meteorito Canyon Diablo (0,0450) e o parâmetro $(^{34}\text{S}/^{32}\text{S})_{\text{spl}}$ é a razão isotópica medida na amostra de interesse (Faure e Mensing, 2004; Ohmoto e Rye, 1974).

Segundo Ohmoto e Rye (1974), o avanço dos estudos de isótopos de enxofre aplicados à pesquisa e ao entendimento da gênese de depósitos minerais sofreu uma grande transformação em 1968, quando Sakai (1968) sugeriu que a composição isotópica de enxofre nos sulfetos seria controlada pela química dos fluidos mineralizantes. A partir de então, Ohmoto (1972) calculou quantitativamente os efeitos de parâmetros físico-químicos (T, pH, $f\text{O}_2$ e $f\text{S}_2$) do fluido mineralizante na composição isotópica dos minerais hidrotermais, dando ao estudo dos isótopos de enxofre grande utilidade na pesquisa mineral, uma vez que, na maioria dos depósitos metálicos, o mineral de minério é representado por sulfetos. Mesmo em depósitos nos quais isso não ocorre, como aqueles de ouro ou cobre nativo, há associação entre o minério e sulfetos (Goldhaber e Ohmoto, 1997).

Para o estudo de depósitos minerais deve ser conhecida a relação entre a composição isotópica de minerais coexistentes e presumidamente contemporâneos e os valores de $\delta^{34}\text{S}$ de cada fase mineral. Quando essas relações são conhecidas, fornecem diversas informações (Goldhaber e Ohmoto, 1997), tais como: a estimativa da temperatura de formação dos depósitos; os mecanismos de geração e transporte tanto dos minérios quanto das fontes de enxofre; a química do enxofre, do metal e do fluido mineralizante; a

descrição dos processos formadores de minério; a fonte e o transporte de enxofre; e a geometria dos sistemas hidrotermais.

A partir do conhecimento dos fatores de fracionamento isotópico (relação de troca isotópica entre duas fases minerais coexistentes e em equilíbrio), são determinadas as composições isotópicas de enxofre dos fluidos mineralizantes, a partir dos valores de $\delta^{34}\text{S}$ dos sulfetos (Goldhaber e Ohmoto, 1997; Figueiredo, 2010). Os fatores de fracionamento isotópico são diretamente dependentes da temperatura e não possuem influência da pressão (para pressões inferiores a 10 kbar). Além disso, são influenciados pelo estado de oxidação do fluido. Quanto mais oxidada a espécie química, mais enriquecida em isótopos pesados ela será (Goldhaber e Ohmoto, 1997; Figueiredo, 2010;). Devido à proporção entre espécies químicas de enxofre reduzidas e oxidadas, é possível determinar algumas características químicas do fluido, tais como temperatura (T), pH e fugacidade de oxigênio ($f\text{O}_2$), bem como avaliar a variação do parâmetro $\delta^{34}\text{S}$ nos minerais em função destas características (Ohmoto e Rye, 1974).

Além de fornecer informações importantes sobre as características químicas do fluido mineralizante, estudos de isótopos de enxofre são utilizados para determinar a fonte do enxofre presente nos fluidos, que pode ser ígnea ou sedimentar (Fig.1). O enxofre proveniente de fontes sedimentares (singenético) é comumente enriquecido no isótopo ^{32}S comparado aos sulfatos marinhos, enquanto o enxofre proveniente de rochas ígneas derivadas do manto superior possuem composições isotópicas similares à dos meteoritos ($\delta^{34}\text{S} = 0 \pm 5\text{‰}$).

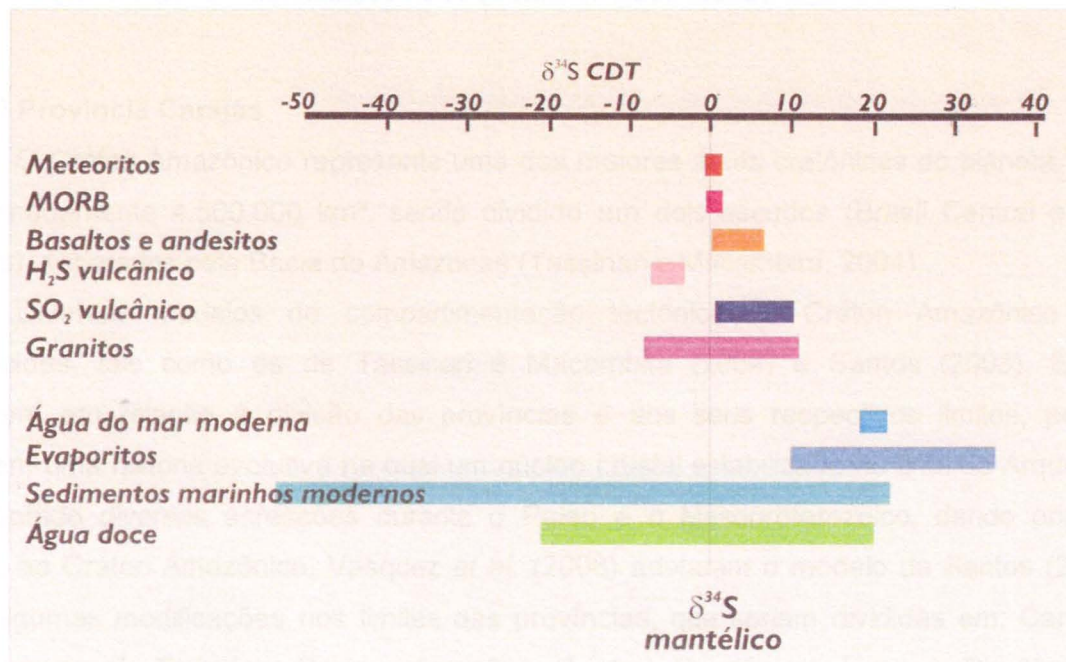


Figura 1: Intervalos de variação dos valores de $\delta^{34}\text{S}$ de diversos materiais geológicos e reservatórios geoquímicos de enxofre (Ohmoto, 1986; Hoefs, 2009)

Entretanto, a assinatura dos sulfetos não pode ser diretamente associada à das fontes de enxofre sem que seja conhecida a composição isotópica do enxofre total do sistema. Isso porque, em geral, os depósitos minerais apresentam uma complexa história evolutiva, que resulta em fracionamento entre espécies oxidadas e reduzidas. Além disso, a composição isotópica de enxofre pode sofrer mudanças durante a atuação de processos metamórficos termais ou as rochas ígneas podem registrar assimilação de enxofre das encaixantes pelo magma. Adicionalmente, fluidos não magmáticos (metamórficos, baciais, meteóricos, água do mar) podem lixiviar enxofre de rochas ígneas durante processos de interação fluido-rocha herdando a sua assinatura.

Depósitos magmáticos sulfetados, associados à segregação magmática, tais como Sudbury (intrusivo) ou do tipo Kambalda (lavas), apresentam composição isotópica de enxofre que reflete tanto contribuição mantélica, como a assimilação de enxofre das rochas encaixantes (Figueiredo, 2010). Como exemplo, dados obtidos em sulfetos por Oliveira e Tarney (1995) no depósito de Cobre-Níquel de Caraíba, na Bahia, mostraram valores de $\delta^{34}\text{S}$ entre -1,5‰ até 0,6‰, sugerindo fonte predominantemente magmática, sem contaminação das rochas encaixantes.

Em depósitos de sulfetos maciços do tipo VMS (*Volcanogenic Massive Sulphide*), os valores de $\delta^{34}\text{S}$ nos sulfetos variam de -5‰ a 20‰. Depósitos pré-cambrianos desse tipo (Noranda e Skellefte) apresentam valores de $\delta^{34}\text{S}$ próximos a zero, sugerindo fontes magmáticas de enxofre, enquanto depósitos fanerozoicos (Kuroko e Chipre) possuem valores mais positivos de $\delta^{34}\text{S}$, sugerindo influência do sulfato da água do mar, cuja concentração era pouco significativa no Arqueano (Figueiredo, 2010).

4.2 Província Carajás

O Cráton Amazônico representa uma das maiores áreas cratônicas do planeta, com aproximadamente 4.500.000 km², sendo dividido em dois escudos (Brasil Central e das Guianas), separados pela Bacia do Amazonas (Tassinari e Macambira, 2004).

Diversos modelos de compartimentação tectônica do Cráton Amazônico são conhecidos, tais como os de Tassinari e Macambira (2004) e Santos (2003). Esses divergem em relação à divisão das províncias e aos seus respectivos limites, porém admitem uma história evolutiva na qual um núcleo crustal estabilizado no final do Arqueano teria sofrido diversas acreções durante o Paleo e o Mesoproterozoico, dando origem, assim, ao Cráton Amazônico. Vasquez *et al.* (2008) adotaram o modelo de Santos (2003) com algumas modificações nos limites das províncias, que seriam divididas em: Carajás, Transamazonas, Tapajós - Parima, Amazônia Central, Rondônia - Juruena, Rio Negro e Sunsás.

A Província Carajás situa-se no sudeste do cráton, na borda sul-oriental do estado do Pará, e é considerada uma das mais importantes províncias minerais do mundo, reunindo um singular conjunto de depósitos minerais.

Contendo a porção de crosta mais antiga do Cráton Amazônico, a província foi formada e estabilizada tectonicamente durante o Arqueano (Tassinari e Macambira, 2004). Segundo Vasquez *et al.* (2008), a província é limitada a norte pelo Domínio Bacajá e a sul pelo segmento Santana do Araguaia, ambos pertencentes à Província Transamazonas. A leste, o limite dá-se pela Província Tocantins e pelo Cinturão Araguaia, enquanto a oeste a província é limitada pela Província Amazônia Central (Fig. 2).

Atualmente, um dos modelos mais aceitos para a divisão da Província Carajás é o proposto por Santos (2003) e adotado por Vasquez *et al.* (2008), que a divide em dois domínios: Rio Maria e Carajás, baseado nas associações litotectônicas presentes.

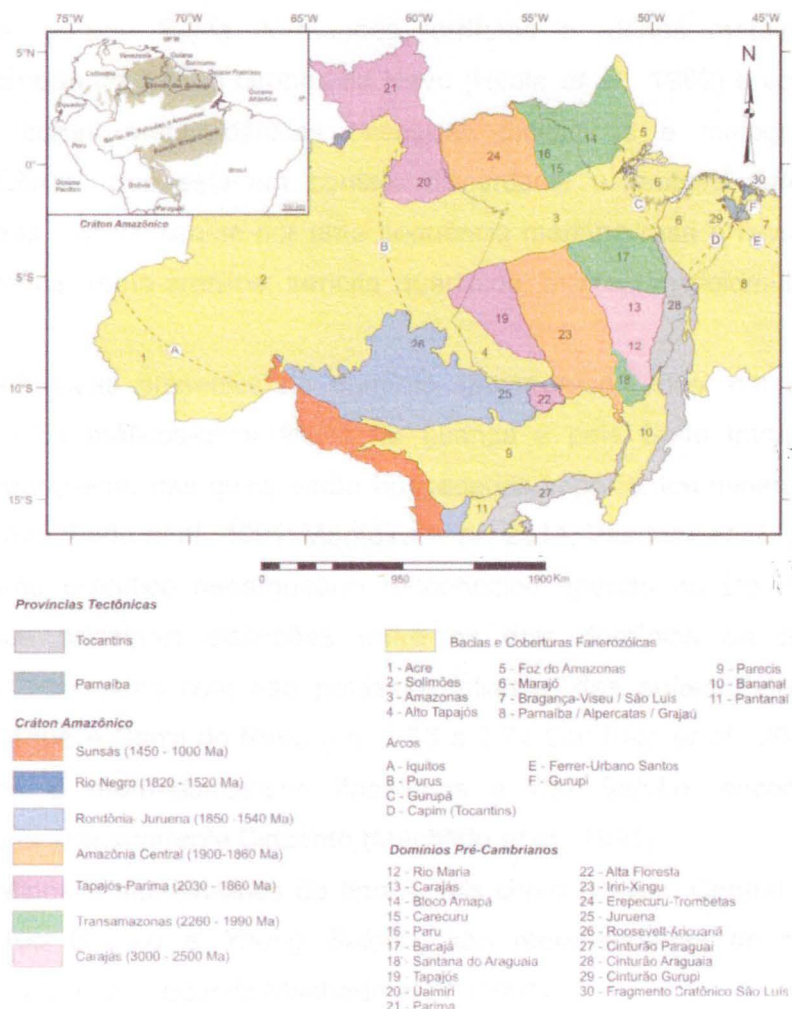


Figura 2: Províncias tectônicas do norte do Brasil, com ênfase na compartimentação tectônica do Cráton Amazônico (Vasquez *et al.*, 2008).

O Domínio Rio Maria, na porção sul da província, é composto por *greenstone belts* e granitoides do tipo TTG mesoarqueanos. Hospeda depósitos auríferos e a maior reserva de tungstênio da Amazônia (Vasquez *et al.*, 2008; Monteiro *et al.*, 2014).

O Domínio Carajás é constituído por embasamento mesoarqueano, rochas supracrustais neoarqueanas da Bacia Carajás e rochas intrusivas neoarqueanas e paleoproterozoicas (Xavier *et al.*, 2012).

As rochas supracrustais da Bacia Carajás são representadas pelas sequências metavulcanossedimentares do Supergrupo Itacaiúnas e do Grupo Rio Novo (Monteiro *et al.*, 2014) e pela sequência metassedimentar de baixo grau da Formação Águas Claras.

O Supergrupo Itacaiúnas, definido por DOCEGEO (1988), inclui os grupos Igarapé Salobo (paragneisses, formações ferríferas e anfibolitos e meta-arcóseos); Igarapé Pojuca (anfibolitos, formações ferríferas, rochas metavulcânicas básicas e xistos pelíticos); Grão Pará (derrames basálticos, jaspilitos, riolitos, diques e *sills* gabroicos e rochas vulcanoclásticas); e Igarapé Bahia (formações ferríferas e rochas metavulcânicas e metapiroclásticas). Enquanto isso, o Grupo Rio Novo (Hirata *et al.*, 1982) é constituído por xistos, anfibolitos, rochas metavulcânicas basálticas tholeiíticas e metagrauvacas. A Formação Águas Claras, que está em contato discordante e recobre parcialmente o Supergrupo Itacaiúnas, caracteriza-se por uma sequência marinha rasa a fluvial composta por metaconglomerados, meta-arenitos, sericita quartzitos, mármore dolomíticos e filitos carbonosos.

As rochas intrusivas presentes no domínio são representadas, em parte, pelos complexos acamadados máficos-ultramáficos de Luanga e pela Suíte Intrusiva Cateté, ambas de idade neoarqueana, nas quais estão hospedadas importantes mineralizações de platinoides e níquel (Machado *et al.*, 1991; Monteiro *et al.*, 2014; Vasquez *et al.*, 2008).

O magmatismo granítico neoarqueano reconhecido apenas no Domínio Carajás representa uma das principais distinções entre os dois domínios da província. É representado pelos granitoides com alto potássio, foliados, das suítes Estrela, Igarapé Gelado, Planalto, Plaqué e Serra do Rabo (ca. 2,76 a 2,74 Ga; Feio *et al.*, 2012), e pelos granitos peralcalinos e meta-aluminosos Itacaiúnas e *Old Salobo*, encontrados nas proximidades da Falha Transcorrente Cinzento (Machado *et al.*, 1991).

Granitos alcalinos e sub-alcalinos do tipo A, tais como Breves, Central de Carajás, Cigano, Pojuca, Rio Branco e *Young Salobo*, são representantes do magmatismo paleoproterozoico do domínio, segundo Machado *et al.* (1991).

O Domínio Carajás hospeda uma grande variedade de depósitos minerais, incluindo minério de ferro de alto teor, óxido de ferro-cobre-ouro, ouro-EGP, polimetálicos e cupro-auríferos sem associação com óxidos de ferro, cromo e níquel-EGP associados a intrusões máfica-ultramáficas acamadadas, além de depósitos lateríticos de ouro, níquel e bauxita (Vasquez *et al.*, 2008; Monteiro *et al.*, 2014).

4.3 Depósito de Cu-Au Furnas: Estudos Prévios

O depósito de Cu-Au Furnas situa-se na Província Carajás, no sudeste do Cráton Amazônico, na borda sul-oriental do estado do Pará (Fig.3).

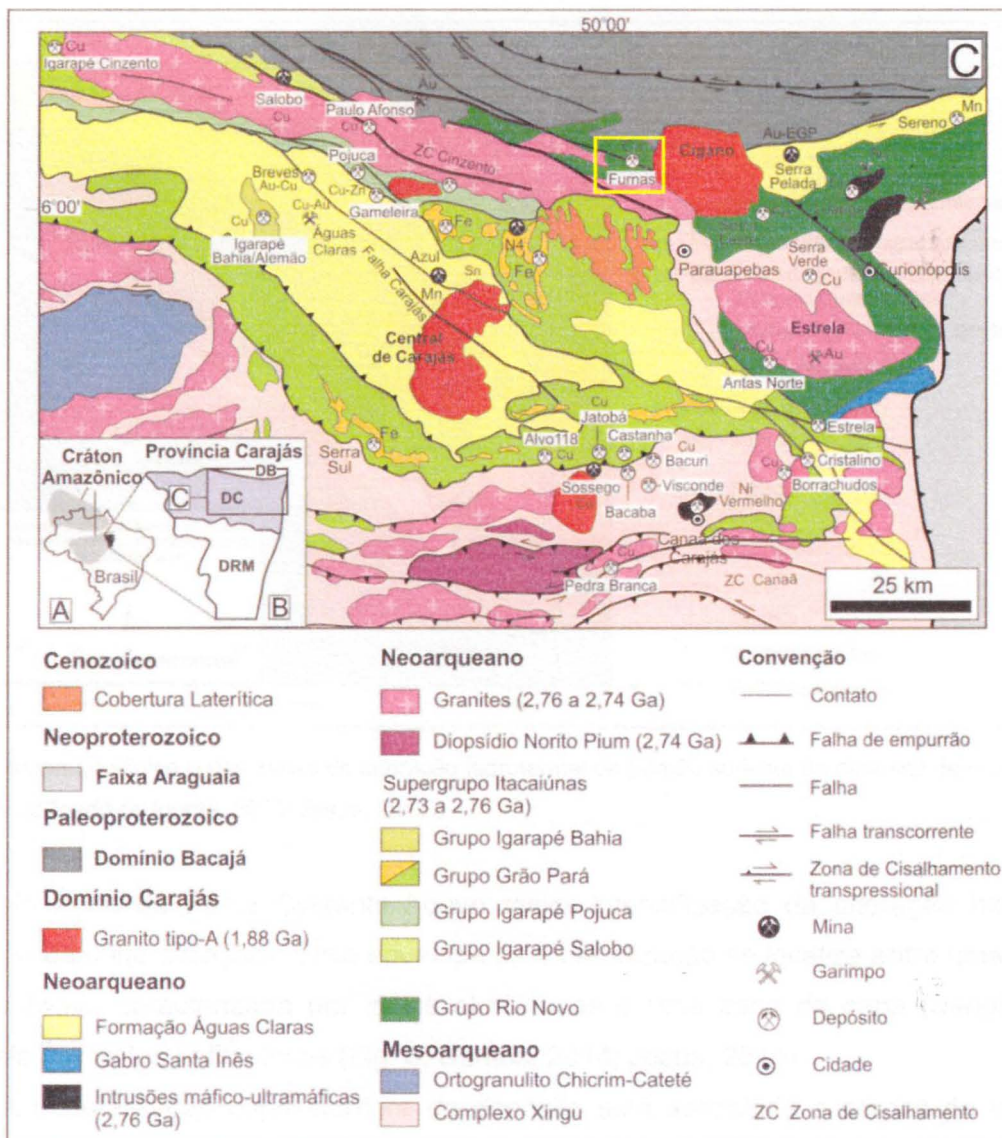


Figura 3: (A) Localização da Província Carajás no Cráton Amazônico; (B) Divisão da Província Carajás nos domínios Rio Maria (DRM) e Carajás (DC), limitado a norte pelo Domínio Bacajá (DB); (C) Mapa geológico do Domínio Carajás da Província Carajás e áreas adjacentes (modificado de Vasquez *et al.* 2008) com a localização do depósito Furnas.

O depósito Furnas está localizado na porção norte do Domínio Carajás (Fig. 3), inserido no mesmo contexto estrutural (Zona de Falha Cinzento) de outros grandes depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro conhecidos na Província Carajás, tais como Salobo, GT46/Igarapé Cinzento, Gameleira, Grota Funda e Paulo Afonso (Fig. 3).

Segundo Santos (2014), o depósito é hospedado pelo Granito Furnas, que corresponde ao granitoide do embasamento, meso ou neoarqueano, aflorante na porção

norooeste do depósito, por rochas metavulcanossedimentares correlatas às do Grupo Grão Pará, pertencente ao Supergrupo Itacaiúnas, neoarqueano, bem como por rochas (meta)-sedimentares da Formação Águas Claras. Essas unidades são interceptadas pelo Granito Cigano, paleoproterozoico, no extremo leste do depósito (Fig. 4). Adicionalmente, o depósito é recoberto por uma cobertura laterítica de 60 m de espessura.

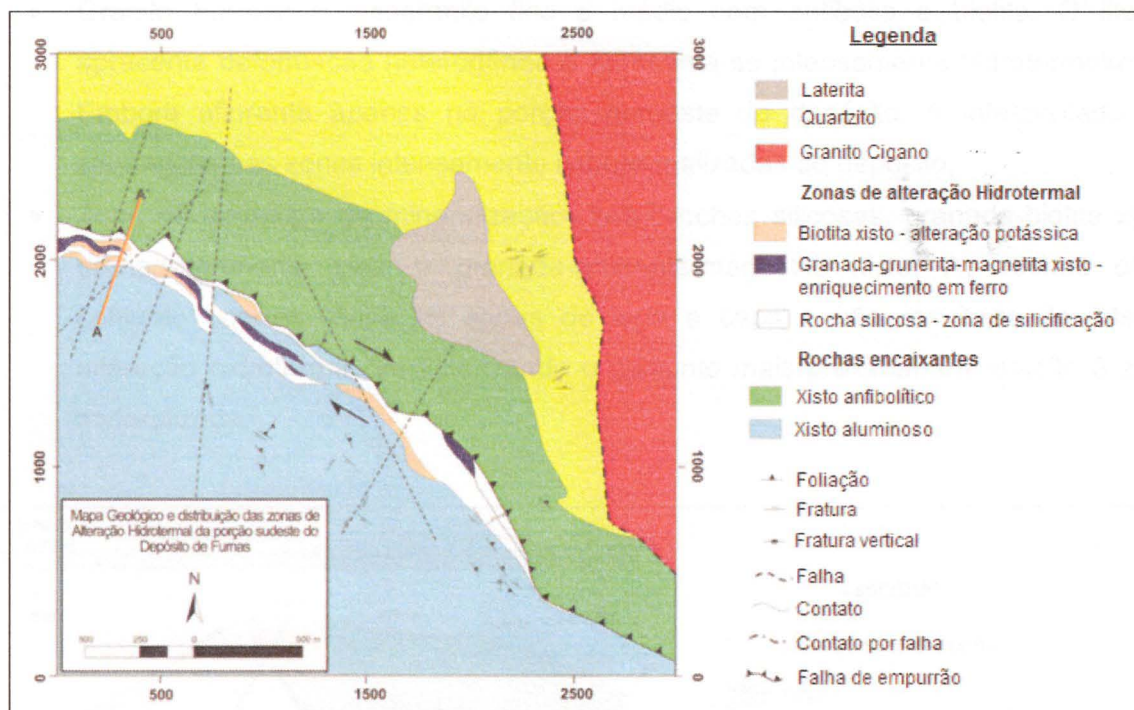


Figura 4: Mapa geológico e das zonas de alteração hidrotermal da porção sudeste do depósito de cobre-ouro de Furnas (Modificado de Iguma, 2015; Jesus, 2015).

Na Zona de Falha Cinzento houve maior intensificação da alteração hidrotermal (envelope da mineralização). Esse envelope da mineralização se localiza entre uma zona de lapa (*footwall*), caracterizada por xistos aluminosos e uma zona de capa (*hanging wall*), composta por xistos anfibolíticos (Fig. 5; Santos, 2014; Jesus, 2015).

A mineralização cupro-aurífera do depósito está associada a corpos de magnetita maciça e à zona com intensa alteração hidrotermal com grunerita-almândina-magnetita, hastingsita-clorita e silicificação, e associa-se a veios e brechas de calcopirita e bornita tardios (Santos, 2014; Iguma, 2015; Jesus, 2015).

Jesus (2015) descreveu quatro conjuntos litológicos principais no depósito Furnas (Fig. 4), sendo esses:

- Xisto Anfibolítico: representado por granada-biotita-anfibólio xisto e granada-anfibólio-biotita xisto, ambos com magnetita. As rochas deste conjunto representam a zona de capa do depósito Furnas e ocorrem com alta deformação e foliação incipiente a bem marcada, geralmente apresentando feições de alteração hidrotermal;

- Xisto Aluminoso: inclui granada-andalusita-biotita-muscovita xistos com sillimanita, estauroлита e turmalina. As rochas deste conjunto caracterizam a zona de lapa do depósito e ocorrem com deformação heterogênea e com intensos sinais de alteração hidrotermal;
- Granito Furnas: monzogranito fino a médio com anfibólio e biotita. O litotipo apresenta deformação heterogênea e apresenta-se intensamente hidrotermalizado. Embora aflorante apenas na porção noroeste do depósito, é interceptado por sondagens nas zonas intensamente hidrotermalizadas do depósito;
- Zona de envelope da mineralização: inclui rochas silicosas, granada-biotita xisto, granada-grunerita xisto e granada-grunerita-magnetita xisto. As rochas deste conjunto ocorrem entre as zonas de lapa e capa e são resultado de intensa alteração hidrotermal, caracterizando o conjunto mais proximal em relação à zona mineralizada.

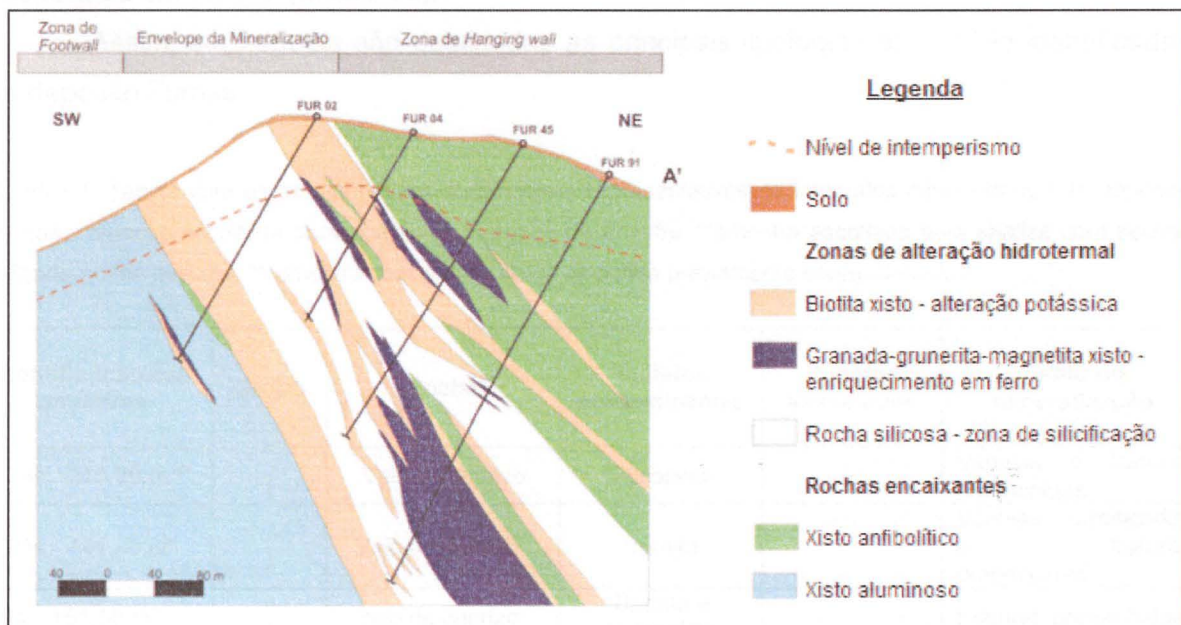


Figura 5: Seção geológica-tipo do Depósito Furnas, mostrando a distribuição das zonas de alteração hidrotermal (Modificado de Jesus, 2015).

Segundo Jesus (2016), o sistema hidrotermal atuante no depósito Furnas foi fortemente associado ao estabelecimento ou reativação de zonas de cisalhamento, resultando em um estágio de alteração sódica presente apenas no Granito Furnas. Após a fase hidrotermal inicial, seguiu-se uma sequência de estágios de alteração atuantes na maioria dos litotipos do depósito, identificados do mais antigo para o mais novo: silicificação, alteração potássica, turmalinização, cristalização de granada coalescente, alteração sódico-

cálcica inicial, enriquecimento em ferro, mineralização principal e alteração tardia (formação de K-hastingsita), sulfetos e desenvolvimento de halos distais de clorita.

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Caracterização das tipologias de minério de cobre-ouro do depósito Furnas

As amostras mineralizadas do depósito Furnas foram agrupadas em sete grupos principais (Quadro 2), com base no tipo de sulfeto presente e na natureza da rocha hospedeira da mineralização, sendo esses: sulfetos associados a veios de quartzo, sem reconhecimento da rocha hospedeira ou a rochas fortemente silicificadas (**grupo I**); bornita em vênulas hospedadas em biotita-anfibólio-clorita xistos (**grupo II**), bornita-(calcopirita) hospedada em biotita-clorita xistos (**grupo III**), calcopirita-(pirita) hospedada em biotita-anfibólio-clorita xistos (**grupo IV**), calcopirita ou bornita associadas à magnetita (**grupo V**), pirrotita hospedada em biotita-quartzo-muscovita xistos (**grupo VI**) e bornita-calcopirita hospedada em brecha (**grupo VII**).

Assim, em seguida são detalhadas as principais tipologias de minério identificadas no depósito Furnas.

Quadro 1: Tabela com as características de amostras representativas de intervalos mineralizados do depósito Furnas. *amostra escolhida para análise de isótopos de enxofre. **amostra escolhida para análise com secção delgada-polida descrita. ***amostra com secção delgada-polida previamente confeccionada.

| Identificação das amostras | Grupo | Rocha | Sulfetos predominantes | Sulfetos associados | Estilo de mineralização |
|----------------------------|-------|---------------------------------|------------------------|---------------------|--|
| FD04 - 215,39 m ** | I | Veio de quartzo | Calcopirita | - | Vênulas e fraturas preenchidas |
| FD04 - 141,25 m* | I | Veio de quartzo | Bornita | - | Vênulas ramificadas e fraturas preenchidas |
| F04 - 151,56 m | I | Veio de quartzo | Bornita e Calcopirita | - | Fraturas preenchidas |
| FD45 - 272,75 m** | I | Brecha | Bornita | Calcopirita | Vênulas e preenchimento de fraturas |
| FD04 - 181,30 m** | II | Biotita-anfibólio-clorita xisto | Bornita | - | Bolsões |
| FD04 - 183,80 m* | II | Biotita-anfibólio-clorita xisto | Bornita | - | Bolsões |
| FD91 376,62 m | II | Biotita-anfibólio-clorita xisto | Bornita | Pirita disseminada | Bolsões |
| FD04 - 115,07 m** | III | Biotita-Clorita Xisto | Bornita e Calcopirita | - | Vênulas associadas a zonas silicificadas |
| FD45 - 216,35 m*** | III | Biotita-clorita xisto | Bornita | - | Vênulas associadas a quartzo |
| FD45 - 220,62 m*** | III | Biotita-clorita xisto | Bornita | - | Vênulas associadas a quartzo |
| FD45 - 315,65 m*** | | Biotita-clorita xisto | Bornita | Calcopirita | Vênulas associadas a |

| | | | | | |
|--------------------|-----|---|----------------------------------|-----------------------|---|
| | III | | | | quartzo e/ou feldspato |
| FD45 - 315,95 m*** | III | Biotita-clorita xisto | Bornita | Calcopirita | Vênulas e preenchimento de fraturas associadas a quartzo |
| FD04 - 080,03 m*** | IV | Biotita-anfibólio-clorita Xisto | Calcopirita | - | Vênulas |
| FD04 - 086,68 m** | IV | Biotita-anfibólio-clorita Xisto | Calcopirita | - | Vênulas |
| FD21 - 079,85 m*** | IV | Biotita-anfibólio-clorita Xisto | Calcopirita | - | Vênulas associadas a zonas silicificadas |
| FD21 - 214,70 m** | IV | Biotita-anfibólio-clorita xisto | Calcopirita e piritita | - | Bolsões e vênulas associadas a porções silicificadas |
| FD14 - 166,30 m | IV | Biotita-clorita xisto | Calcopirita | - | Vênulas |
| FD45 - 115,62 m | IV | Afibólio / turmalina -biotita-clorita Xisto | Pirita e calcopirita | - | Vênulas associadas a zonas silicificadas |
| FD04 - 087,18m*** | V | Magnetitito | Calcopirita | - | Disseminada e em vênulas |
| FD91 - 344,22 m** | V | Magnetitito | Bornita | - | Disseminada |
| FD91 - 361,00 m*** | V | Magnetitito | Calcopirita | - | Disseminada e em vênulas |
| FD91 - 390,00 m*** | V | Quartzo-feldspato-magnetita xisto | Bornita | - | Vênulas e bolsões |
| FD91 -394,60 m*** | V | Magnetitito | Calcopirita | - | Disseminada |
| FD02 - 256,62 m | VI | Biotita-quartzo-muscovita xisto | Pirrotita | Calcopirita | Bolsões, vênulas e disseminada |
| FD14 - 285,40 m** | VI | Biotita-quartzo-muscovita xisto | Pirrotita | Calcopirita | Bolsões, vênulas e disseminada, associada a zonas silicificadas |
| FD39 - 186,00 m** | VI | Biotita-muscovita-quartzo xisto | Pirrotita | Calcopirita e bornita | Veios, disseminada e associada a zonas de silicificação |
| FD14 - 243,40 m | VI | Biotita-clorita xisto | Pirrotita, calcopirita e bornita | - | Vênulas preenchidas por cada sulfeto individualmente e associadas a zonas silicificadas |
| FD02 - 285,04 m | VI | Muscovita-quartzo-feldspato xisto | Pirrotita | - | Vênulas e bolsões |
| FD02 234,67 m*** | VII | Biotita-granada xisto | Calcopirita | - | Vênulas e disseminada |
| FD04 222.52 m*** | VII | Biotita-granada xisto | Calcopirita | - | Vênulas e disseminada |

5.1.1 Grupo I: Sulfetos associados a veios de quartzo

Caracterizada por vênulas, bolsões ou fraturas preenchidas por calcopirita ou bornita, a tipologia do Grupo I foi definida principalmente pela associação dos minerais de minério (bornita e calcopirita) com veios de quartzo ou com zonas silicificadas. Quando a calcopirita

ocorre sozinha, preenche fraturas e vênulas de poucos milímetros de espessura ou raros bolsões de até 2 cm, que cortam um veio de quartzo.

Quando associada com a bornita também preenche fraturas de até 2 cm de espessura em veio de quartzo muito fraturado. Neste caso, há finas vênulas preenchidas somente por bornita ou calcopirita ou ainda, por uma associação entre os dois sulfetos. Predominantemente calcopirita é englobada por bornita, mas, subordinadamente, o oposto também foi reconhecido (Fig. 7F), com ocasional presença de malaquita xenomórfica na borda dos minerais de minério.

Macroscopicamente, o veio de quartzo apresenta ocasional bandamento, bem marcado ou difuso, caracterizado por alternância de quartzo azulado e quartzo esbranquiçado em bandas com até 3 mm de espessura. Geodos esparsos (até 3,5 mm) preenchidos por quartzo também ocorrem. Quando há presença apenas de bornita, essa preenche fraturas de 1 mm a 2,5 mm ou vênulas ramificadas de até 1 cm, que cortam porções silicificadas da rocha hospedeira maciça, de granulação fina e constituída por quartzo e biotita. Por vezes, as vênulas maiores englobam fragmentos de quartzo com até 4 mm (Fig. 6A).

Microscopicamente, a rocha hospedeira analisada consiste em um veio de quartzo maciço com orientação incipiente de alguns cristais de quartzo com textura granoblástica e ocasional presença de clorita, biotita e muscovita, em ordem modal decrescente. O quartzo apresenta cristais com 0,75 mm a 1 cm, com extinção ondulante, por vezes setorizada, e lamelas de deformação comuns nos cristais mais grossos. Os contatos entre os cristais de quartzo são tanto poligonalizados, em algumas porções, quanto interlobados em outras, sendo comum a presença de agregados de quartzo muito finos, nos limites dos cristais maiores (Fig. 6D). Comumente, fragmentos do veio de quartzo são cortados e englobados por vênulas de bornita (Fig. 6B). Os cristais de quartzo desses fragmentos apresentam as mesmas feições de deformação, prévia aos *infills* de bornita.

Clorita, biotita e muscovita são também englobados pelo veio de bornita. A clorita apresenta birrefringência anômala azulada, e ocorre em cristais com 0,05 mm a 4 mm, por vezes substituindo a biotita. Essa é menos comum, subeuédrica e menor do que 0,14 mm. Muscovita aparece muito fina (sericita), substituindo o feldspato potássico, ou como cristais euédricos de até 0,3 mm. Relíquias de feldspato potássico com aspecto turvo e coloração rosada cortam cristais de quartzo.

Bornita também ocorre associada a uma rocha muito silicificada, com aparência brechada em amostra de mão (Fig. 7B), porém sem nenhuma feição de brechação na secção delgada-polida. Neste caso, as vênulas de bornita englobam fragmentos angulosos a arredondados de quartzo com 2 mm a 2,5 cm, por vezes imersos em uma matriz cinza muito fina. comum a presença de malaquita associada às bordas de algumas vênulas do sulfeto, ou ainda disseminada (Fig. 7A).

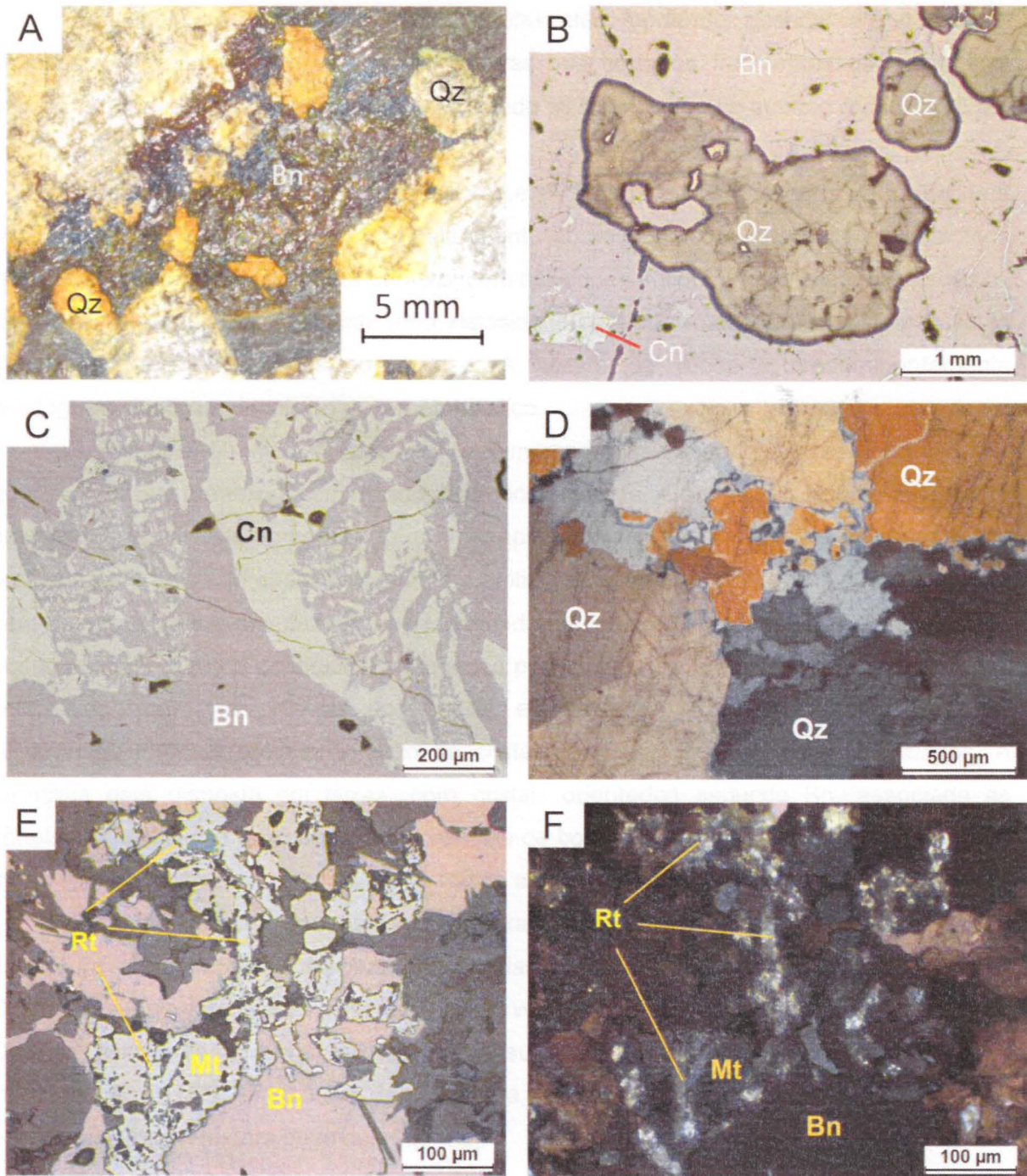


Figura 6: Fotografia (A) e fotomicrografias (B, C, D, E, F) das amostras dos sulfetos associados a veios de quartzo do Grupo I. A (FD04 141,25 m): *infill* de bornita (Bn) em veio de quartzo (Qz), com fragmentos de quartzo englobados total ou parcialmente pelo sulfeto. B (FD04 141,25 m): vênula de bornita com calcosina (Cn) intercrescida, englobando fragmentos do veio de quartzo (luz refletida). C (FD04 141,25 m): intercrescimento simplectítico entre bornita e calcosina (luz refletida). D (FD04 141,25 m): quartzo com extinção ondulante, bandas de deformação e contatos interlobados, por vezes associados a agregados de quartzo muito finos (luz transmitida, polarizadores cruzados). E (luz refletida com polarizadores descruzados) e F (luz refletida com polarizadores cruzados) mostram uma vênula de bornita englobando cristais euédricos de magnetita (Mt) e rutilo (Rt) associados e alguns cristais de magnetita com rutilo anedral nas bordas, com destaque em F para as reflexões internas do rutilo, amostra FD45 272,75 m.

As vênulas de bornita estão muito presentes, podendo alcançar até 4 mm de espessura. Preenchem um sistema de fraturas que corta os fragmentos de quartzo. O sulfeto também ocorre como cimento envolvendo os fragmentos de quartzo menores, e por vezes apresenta calcopirita associada.

Petrograficamente, a rocha apresenta-se silicificada e com presença de turmalina e biotita. Clivagem espaçada é definida pela orientação de cristais de muscovita e biotita finos imersos em matriz constituída por quartzo, com ocasionais faixas de turmalina orientadas ou de biotita, nas quais está presente uma xistosidade contínua marcada por cristais maiores do que aqueles associados ao quartzo. A textura da rocha é predominantemente lepidogranoblástica e, localmente, nematoblástica.

A composição mineralógica, em ordem modal decrescente, é representada por quartzo, biotita e turmalina, com muscovita pouco presente. Albita e feldspato potássico são associados às vênulas de bornita. O quartzo apresenta as mesmas feições de deformação presentes nos veios de quartzo, enquanto a biotita ocorre em vênulas (cristais relativamente bem desenvolvidos e orientados) ou disseminada na zona silicificada (cristais relativamente pouco desenvolvidos e orientados). A foliação principal (S_n) é definida pela orientação dos cristais de biotita nas vênulas do mineral, enquanto S_{n-1} é reconhecida nas zonas silicificadas, marcada pela orientação de cristais de biotita menores e disseminados. A turmalina está disposta em faixas, com cristais orientados segundo S_n , associada às vênulas de biotita, ou englobada pelas vênulas de bornita. A granulometria varia entre 0,02 mm e 0,6 mm, por vezes com cristais de hábito acicular ou fibro-radiado.

Petrograficamente, a bornita concentra-se em um veio principal de 1 cm de espessura e em vênulas mais finas interligadas (Fig. 7E), que cortam o veio de quartzo. Cristais ocasionais de bornita disseminados no veio de quartzo também foram reconhecidos. Quando associada à zona silicificada, o sulfeto ocorre principalmente em vênulas interligadas com 0,02 mm a 3 mm de espessura, por vezes manteadas total ou parcialmente por malaquita com textura botroidal (Fig. 7C).

Em ambas associações, feldspato potássico ocorre nas bordas do veio e das vênulas de bornita, ou é englobado por estes, sendo comum a presença de albita na interface entre os cristais de feldspato potássico e a bornita. A albita está presente nas proximidades do veio e das vênulas de bornita, comumente nas bordas das estruturas, ou é totalmente englobada pela bornita (Fig. 7D). Intercrescimento simplectítico entre bornita e calcosina é uma feição muito presente nos veios (Fig. 6C). Calcopirita ocorre em pequena quantidade, tanto disseminada quanto associada à bornita.

Na rocha silicificada, magnetita ocorre associada à bornita, por vezes intercrescida nas bordas do sulfeto, e a rutilo. O rutilo também ocorre como cristais prismáticos, é opaco e em luz refletida apresenta cor cinza azulado, destacada anisotropia e reflexões internas

amarelas e brancas. Além disso, molibdenita, muito fina e com hábito laminar ou em ripas levemente dobradas, é identificada nas proximidades das vênulas de bornita.

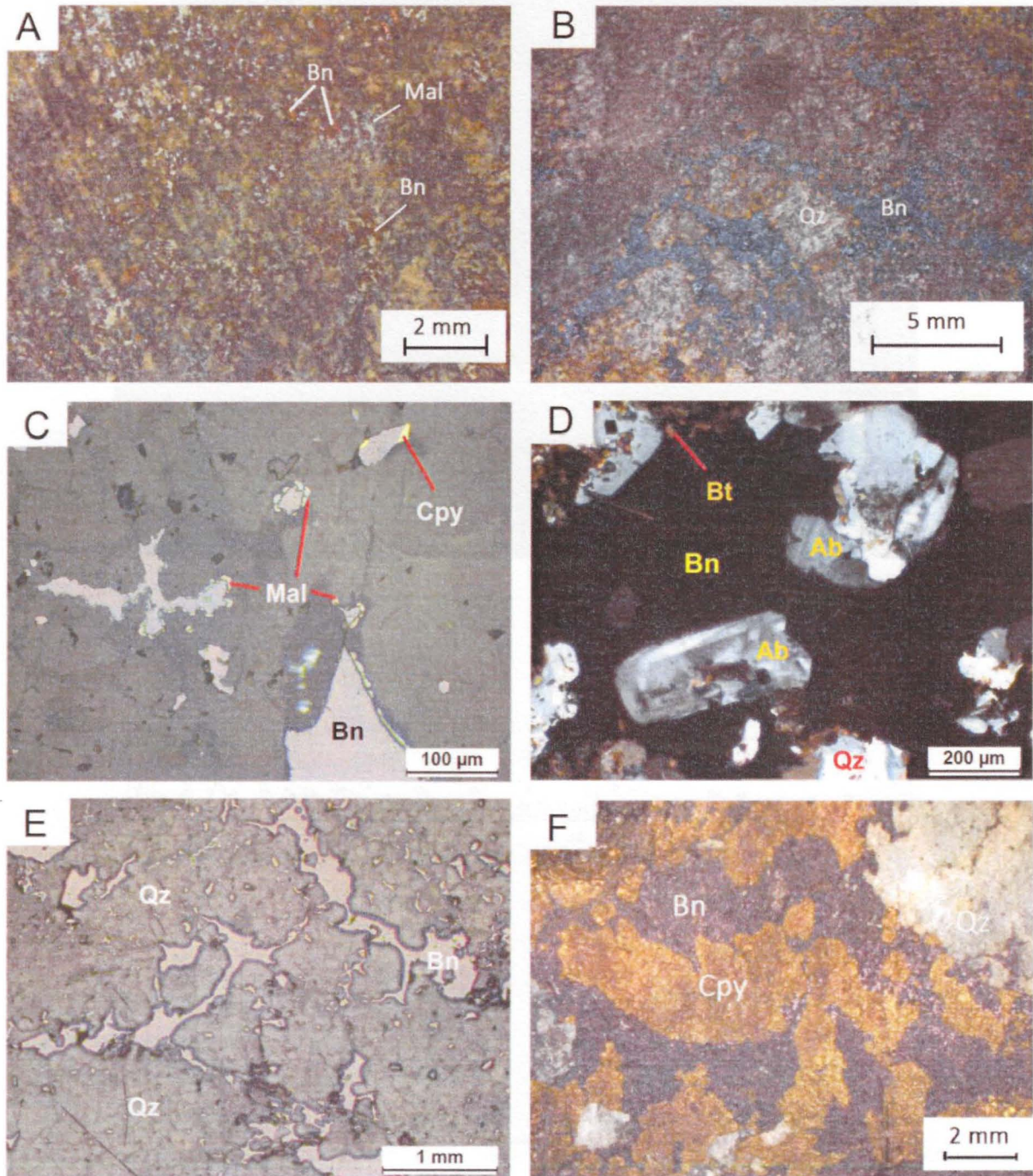
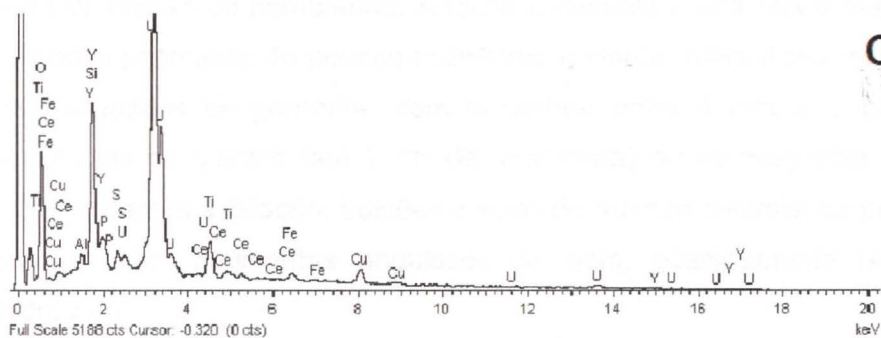


Figura 7: Fotografias (A, B e F) e fotomicrografias (C, D e E) de sulfetos associados a veios de quartzo do Grupo I. A (FD45 272,45 m): bornita (Bn) em rocha silicificada, por vezes englobando fragmentos de quartzo (Qz). B (FD45 272,45 m): bornita parcialmente oxidada e substituída por malaquita (Mal), envolvendo fragmentos de quartzo. C (FD45 272,45 m): bornita parcialmente manteeda por malaquita e cristal intercrescido com calcopirita (Cpy) (luz refletida). D (FD45 272,45 m): vênula de bornita englobando albita (Ab), biotita (Bt) e fragmentos do veio de quartzo (luz transmitida e polarizadores cruzados). E (FD45 272,45 m): vênulas de bornita em rocha silicificada (luz refletida). F (FD04 151,56): bolsão de calcopirita e bornita, associado a veio de quartzo. Quartzo (Qz), bornita (Bn), malaquita (Mal), calcopirita (Cpy), albita (Ab), biotita (Bt).



Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) identificaram presença de vanádio na estrutura do rutilo, bem como uma associação de três minerais com a bornita: thorogumita, curita e soddyita (Fig. 8A).

A thorogumita $[(Th,U)(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}]$ é um nesossilicato insular composto, predominantemente, por uma solução sólida entre tório e urânio. Ocorre como cristais euédricos associados à borda de vênulas de bornita (Fig. 8A), com quantidades significativas de ósmio, cério e irídio em sua composição (Fig. 8B), identificadas por análise simi-quantitativa de espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

Curita $(Pb_3(UO_2)_8O_8(OH)_6 \cdot 3H_2O)$ e soddyita $((UO_2)_2SiO_4 \cdot 2H_2O)$ são óxidos de urânio e aparecem associados na rocha silicificada. A curita possui forma arredondada e aparece como microcristais dentro das vênulas de bornita ou englobada por soddyita (Fig. 8A). Já a soddyita é anedral e possui quantidade significativa de irídio em sua composição (Fig. 8C).

5.1.2 Grupo II: Bornita hospedada em clorita-biotita-hornblenda xistos

A tipologia do Grupo II é caracterizada por bolsões, vênulas, cristais disseminados de bornita associados ou não a bolsões ou vênulas de quartzo hospedados em clorita-biotita-hornblenda xisto.

A rocha hospedeira é foliada, possui coloração verde escura, por vezes com alternância entre faixas verde claro e faixas verde escuro de poucos milímetros. Microscopicamente, a foliação é definida pela alternância entre faixas de hornblenda prismática euédrica imersa em uma matriz fina composta por biotita e clorita e faixas de hornblenda subeuédrica. Em geral, o xisto possui textura nematoblástica incipiente, marcada pela orientação de cristais de hornblenda. A rocha apresenta matriz fina a média composta por biotita, anfibólio prismático de poucos milímetros e clorita. Além disso, estão presentes porfiroblastos espaçados de grunerita, com tamanhos entre 4 mm e 1 cm. Há ainda, presença de vênulas de quartzo (até 2 cm de espessura) ou de magnetita (até 1 cm de espessura), concordantes à foliação; bolsões e veios de quartzo controlados por fraturas; ou veios de brechas com fragmentos angulosos do xisto, possivelmente relacionados à brechação hidráulica.

Mineralogicamente, a rocha é composta, em ordem decrescente de abundância, por hornblenda, biotita e clorita, com allanita, grunerita e quartzo subordinados. A hornblenda ocorre na forma de cristais subeuédricos com bordas irregulares, raramente orientados segundo a foliação, ou como cristais euédricos prismáticos associados à uma matriz constituída por biotita e hornblenda finas, com tamanhos entre 0,05 mm e 1,2 mm. A biotita apresenta cor verde e cristais menores que 0,2 mm, por vezes orientados segundo a foliação. É fortemente associada à clorita, que possui granulação similar.

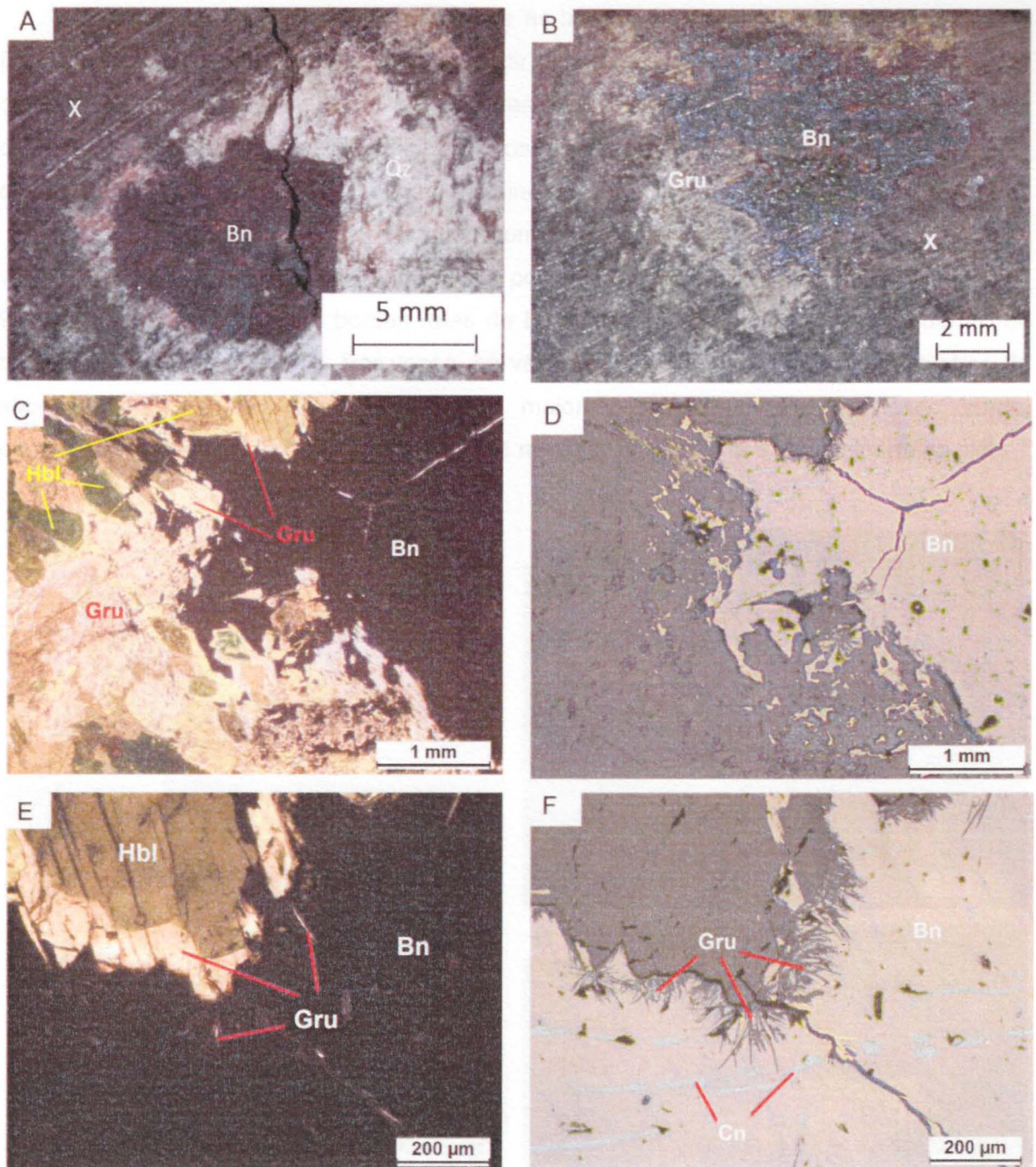


Figura 9: Fotografias (A e B) e fotomicrografias (C, D, E e F) das amostras de testemunhos de sondagem representativas da tipologia de minério do Grupo II, com bornita hospedada em biotita-anfibólio-clorita xistos (X). A (FD04 181,30 m): bornita (Bn) subeuhedral associada a bolsão de quartzo (Qz) hospedado em biotita-anfibólio-clorita xisto. B (FD04 183,80 m): bolsão de bornita associado a grunerita, mais clara e fina (Gru), hospedados no biotita-anfibólio-clorita xisto. C (FD04 183,80 m): bolsão de bornita com grunerita (Gru) associada às suas bordas, por vezes com núcleos de hornblenda (Hbl) (luz transmitida, polarizadores descruzados). D (FD04 183,80 m): imagem correspondente à C, em luz refletida. E (FD04 183,80 m): Bolsão de bornita com grunerita acicular associada à sua borda, bem como grunerita subeuhédrica prismática com núcleo de hornblenda (luz transmitida, polarizadores descruzados). F (FD04 183,80 m): imagem correspondente a E, porém vista em luz refletida, ressaltando a grunerita acicular nas bordas do bolsão de bornita e lamelas de calcosina (Cn) intercrescidas à bornita e calcopirita (Cpy) muito fina associada a fratura na bornita. Bornita (Bn), quartzo (Qz), grunerita (Gru), hornblenda (Hbl), covelina (Cn), biotita-anfibólio-clorita xisto (X).

A grunerita está fortemente associada às bordas dos bolsões de bornita (Fig. 9C e 9D). Em geral, substitui a hornblenda a partir de suas bordas (Fig. 9C), ou ainda ocorre como faixas dentro do anfibólito, caracterizadas como *fronts* de alteração hidrotermal. Neste caso, há presença de carbonato associado aos cristais de hornblenda, na forma de lamelas descontínuas e discordantes à clivagem do mineral.

Macroscopicamente, a bornita ocorre em bolsões com 5 mm a 1,5 cm associados às vênulas de quartzo ou ao xisto, e é envolta por um filme submilimétrico de grunerita (Fig. 9B). Cristais isolados e com bordas retas de bornita também são reconhecidos dentro de bolsões de quartzo (Fig. 9A). Por vezes, há vênulas de bornita com poucos milímetros de espessura, interligadas às concentrações maiores do sulfeto. Foi verificado ainda, ocorrência de pirita em cristais menores que 1 mm, pouco presente e disseminada no xisto.

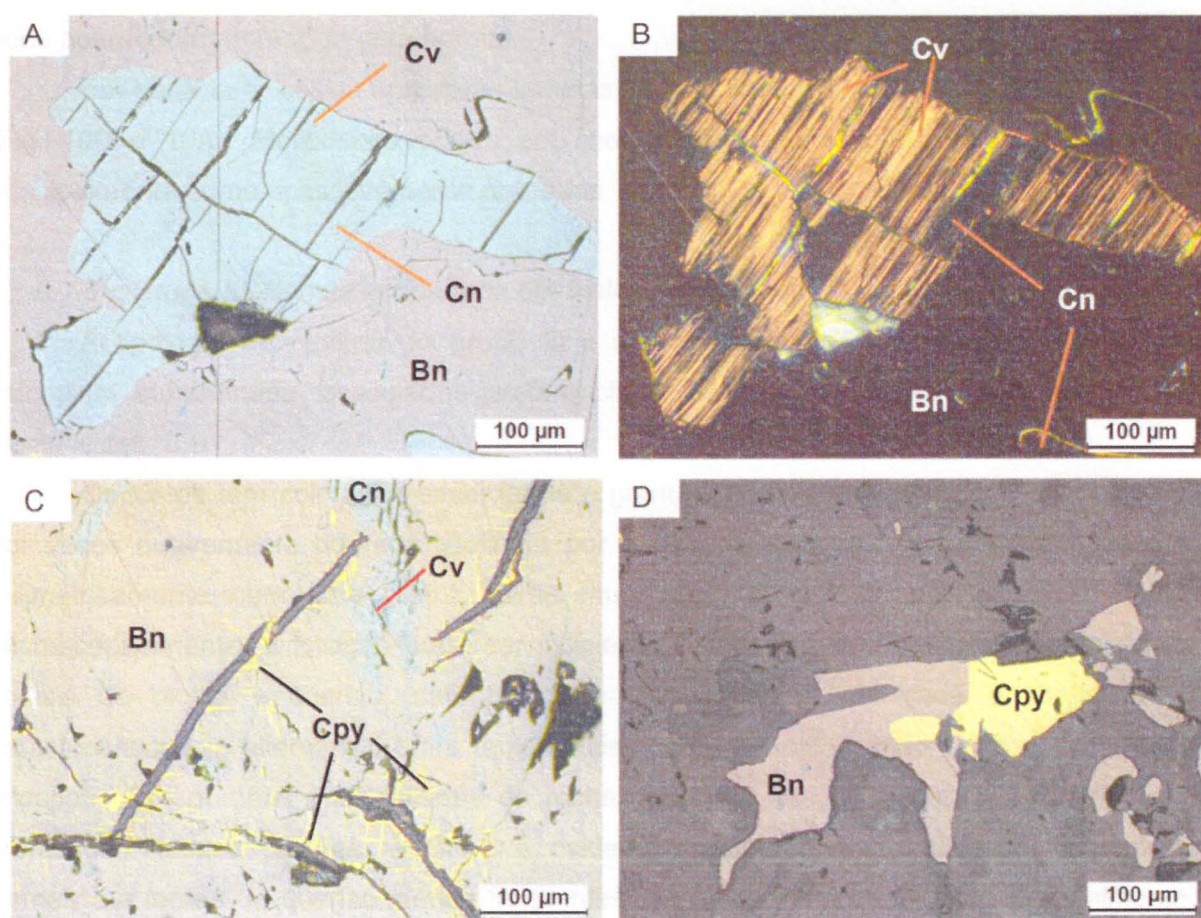


Figura 10: Fotomicrografias em luz refletida da amostra FD04 183,80 m, representativa da tipologia de minério do Grupo II, com bornita hospedada em biotita–anfibólio–clorita xisto. A: Bornita (Bn) intercrescida com covelita (Cv) com lamelas de calcosina (Cs) em tom azul levemente mais claro. B: imagem correspondente a A, porém com polarizadores cruzados, ressaltando as lamelas de covelina, com forte cor de anisotropia laranja, paralelas à clivagem da calcosina (Cn). C: bornita com calcosina intercrescida, com covelina subordinada, e calcopirita (Cpy) muito fina acicular associada a fraturas na bornita, com crescimento perpendicular às estruturas. D: Intercrescimento entre bornita e calcopirita. Bornita (Bn), calcopirita (Cpy), calcosina (Cn), covelina (Cv).

Allanita tem coloração marrom, é subuédrica a anedral e menor do que 0,5 mm. O quartzo varia entre 0,005 mm e 0,7 mm e ocorre como inclusões na hornblenda, em pequenas faixas descontínuas com presença de hornblenda pouco desenvolvida ou se associa à maior concentração de bornita disseminada da rocha.

Cristais de quartzo apresentam contatos interlobados, extinção ondulante e são envolvidos por agregados muito finos de quartzo.

Petrograficamente, nota-se que há cristais de bornita disseminados no entorno dos bolsões do sulfeto ou, subordinadamente, no xisto. No bolsão, a bornita ocorre intercrescida com calcosina (Fig. 10A). Apresenta calcopirita muito fina associada à suas fraturas, na forma de espículas perpendiculares às estruturas (Fig. 10C). Além disso, há forte presença de grunerita bem desenvolvida mantendo parcialmente o bolsão de bornita (Fig. 9C e 9D), ou como cristais aciculares nas bordas da bornita (Fig. 9F e 9E). Magnetita com até 0,2 mm pode aparecer intercrescida com bornita.

Em geral, a calcosina apresenta lamelas de covelina paralelas à clivagem do mineral (Fig. 10B e 10A). Molibdenita ocorre em finos cristais em algumas porções da rocha, principalmente como ripas levemente dobradas.

5.1.3 Grupo III: Bornita hospedada em biotita-clorita xistos, com calcopirita associada

A tipologia de minério do grupo III é caracterizada por vênulas de bornita, com calcopirita subordinada, associadas preferencialmente a porções silicificadas de biotita-clorita xistos.

Os xistos têm coloração esverdeada e granulação fina a média, com foliação (Sn), por vezes suavemente dobrada, definida por lentes de quartzo alongadas, intercaladas milimetricamente com uma matriz verde muito fina, constituída por biotita e clorita. Microscopicamente, a foliação pode ser incipiente, marcada pela ocasional orientação de cristais de biotita e quartzo, caracterizando uma clivagem espaçada à contínua, ou caracterizada pela alternância entre faixas mais ricas em biotita e mais ricas em quartzo e feldspato. Em porções mais foliadas da rocha, é visível que a foliação Sn apresenta-se crenulada. Nessas porções, a Sn+1 é evidenciada pela orientação de biotita, clorita, turmalina e lentes de quartzo menos frequentes e associadas à turmalina. Adicionalmente, em algumas secções é identificada uma foliação Sn-1, oblíqua à Sn. Tal foliação é verificada em dois tipos de microlitons, aqueles constituídos por quartzo e biotita relativamente menos desenvolvida e orientada (marcando Sn-1), e aqueles constituídos apenas por albita com hábito amendoado, orientada ou não segundo a foliação Sn-1. Por vezes estão presentes faixas de biotita marrom com xistosidade contínua.

O biotita-clorita xisto possui textura predominantemente lepidoblástica, definida pela orientação de biotita e clorita, e localmente nematoblástica, marcada pela orientação de turmalina, quando presente. A rocha é composta, em ordem modal decrescente, por biotita,

turmalina (quando presente), grunerita (quando presente) e clorita. Allanita, hornblenda, granada, epidoto, zoisita, apatita e zircão podem aparecer subordinadamente. A biotita apresenta pleocroísmo em tons de marrom, é euédrica a subeuédrica, ocorre em cristais com 0,02 mm a 0,5 mm, e é disposta em faixas ou em vênulas que cortam lentes de quartzo, por vezes isolando seus fragmentos. Biotita esverdeada aparece em algumas secções delgadas, também concentrada em faixas ou ainda preenchendo fraturas em cristais de granada, paralelas à Sn. A transição entre as duas gerações de biotita pode ser observada em uma amostra na qual a biotita marrom adquiri tons cada vez mais esverdeados próximo a um veio hidrotermal constituído por quartzo, feldspato potássico, albita e bornita.

A turmalina ocorre em cristais subeuédricos a euédricos com 0,02 mm a 15 mm. Os cristais maiores (porfiroblastos) apresentam nas fraturas perpendiculares ao seu eixo c calcopirita fina, por vezes associada com bornita. Os menores cristais de turmalina, por sua vez, estão dispostos em aglomerados, em geral, associados à biotita, ou ocorrem como cristais aciculares, eventualmente fibro-radiados.

A grunerita ocorre em duas granulações principais, como porfiroblastos espaçados (1 mm a 3 mm), cortando a foliação, e em cristais finos, com tamanho igual ao dos demais minerais da matriz. Os finos cristais de grunerita são concordantes à foliação ou dispostos em bolsões de textura relativamente grossa, sem orientação e fortemente associados aos sulfetos (bornita e/ou calcopirita), que englobam ou substituem a grunerita nos seus planos de clivagem. Comumente a grunerita possui núcleos ou porções de hornblenda e, por vezes, apresenta leve pleocroísmo verde pálido. A clorita é subeuédrica com até 0,2 mm, concordante tanto à Sn quanto Sn+1 e associada ou não à biotita.

Lente de quartzo com textura granoblástica fina também foram reconhecidas nesse litotipo. Os cristais de quartzo ocorrem como: cristais maiores que 1 mm, com forte extinção ondulante e, por vezes, lamelas de deformação (Passchier & Trouw, 2005), circundados por grãos menores, com feição característica de recristalização dinâmica pelo processo de *grain border migration* (GBM) (Passchier & Trouw, 2005); e cristais menores, entre 0,001 mm e 0,4 mm, que podem ocorrer com contatos poligonalizados, com agregados minerais muito finos nos contatos entre dois ou mais cristais de quartzo, ou ainda com orientação incipiente. Há ainda bolsões de quartzo grosso com contatos abruptos e irregulares que cortam o xisto.

O feldspato potássico ocorre muito alterado (material marrom com aspecto turvo), em cristais euédricos a subeuédricos entre 0,1 mm e 2,5 mm, geralmente associado à bornita e por vezes manteado parcialmente por albita na interface entre o feldspato e a bornita (Fig. 11E e 11F).

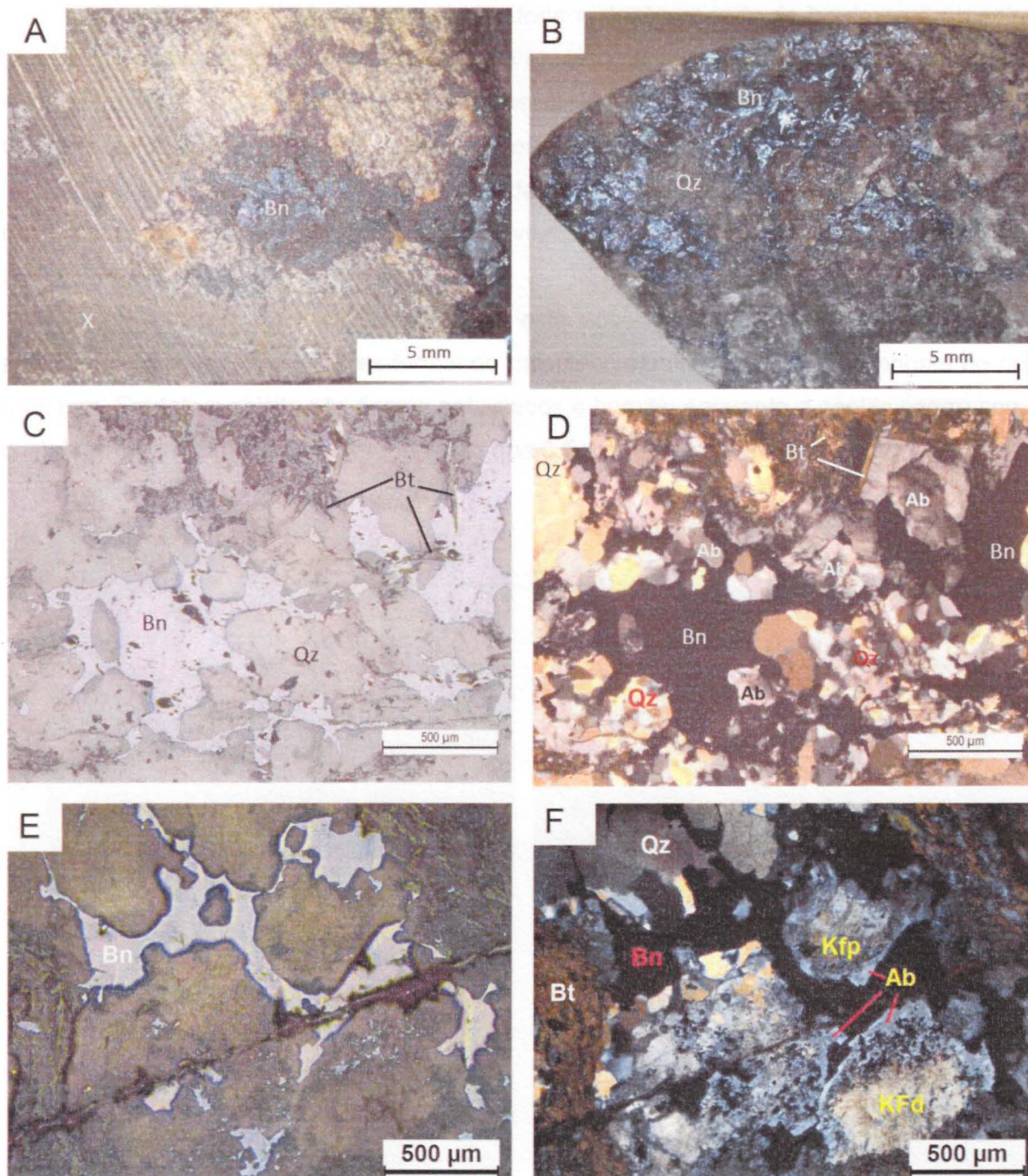


Figura 11: Fotografias (A e B) e fotomicrografias (C e D) representativas da tipologia de minério do Grupo III com bornita hospedada em biotita-clorita xisto (X). A (FD45 315,65 m): bornita (Bn) em bolsão e vênulas interligadas, que cortam bolsão de quartzo (Qz) no biotita-clorita xisto. B (FD45 315,65 m): fratura preenchida por bornita, com quartzo associado. C (FD45 315,65 m): vênulas de bornita, englobando total ou parcialmente fragmentos angulosos a arredondados de quartzo e de biotita (Bt) subeuédrica (luz refletida). D (FD45 315,65 m): imagem correspondente à C, porém em luz transmitida com polarizadores cruzados, mostrando evidência de recrystalização do quartzo e sua associação com albita hidrotermal e biotita. E (FD45 216,35 m): vênula de bornita (luz refletida). F (FD45 216,35 m): imagem correspondente a E, em luz transmitida com polarizadores cruzados, ressaltando a associação entre vênulas de bornita e quartzo deformado, com cristais de feldspato alcalino (Kfd) com mantos de albita (Ab) na interface com o sulfeto. Bornita (Bn), quartzo (Qz), biotita (Bt), albita (Ab), feldspato potássico (Kfd).

Albita hidrotermal, límpida, apresenta forte extinção zonada da borda para o centro, geminação polissintética discreta ou ausente e comumente extinção em leque, em cristais menores do que 0,4 mm. É principalmente associada à bornita, e ocorre tanto nas bordas das vênulas do sulfeto, quanto é englobada por essas (Fig. 11D).

Dos minerais subordinados, a granada ocorre em cristais subeuédricos, em geral muito fraturados, com 0,4 mm a 2,5 mm, por vezes com inclusões de feixes de quartzo e de biotita paralelos à foliação Sn.

A allanita possui cor esverdeada e está associada à biotita, enquanto o zircão aparece incluso nessa, por vezes formando halopleocroísmo e em cristais menores do que 0,05 mm. Epídoto e zoisita são finos e associados à bornita, enquanto a apatita ocorre como cristais com formato alongado, menores do que 0,5 mm associados às faixas de biotita.

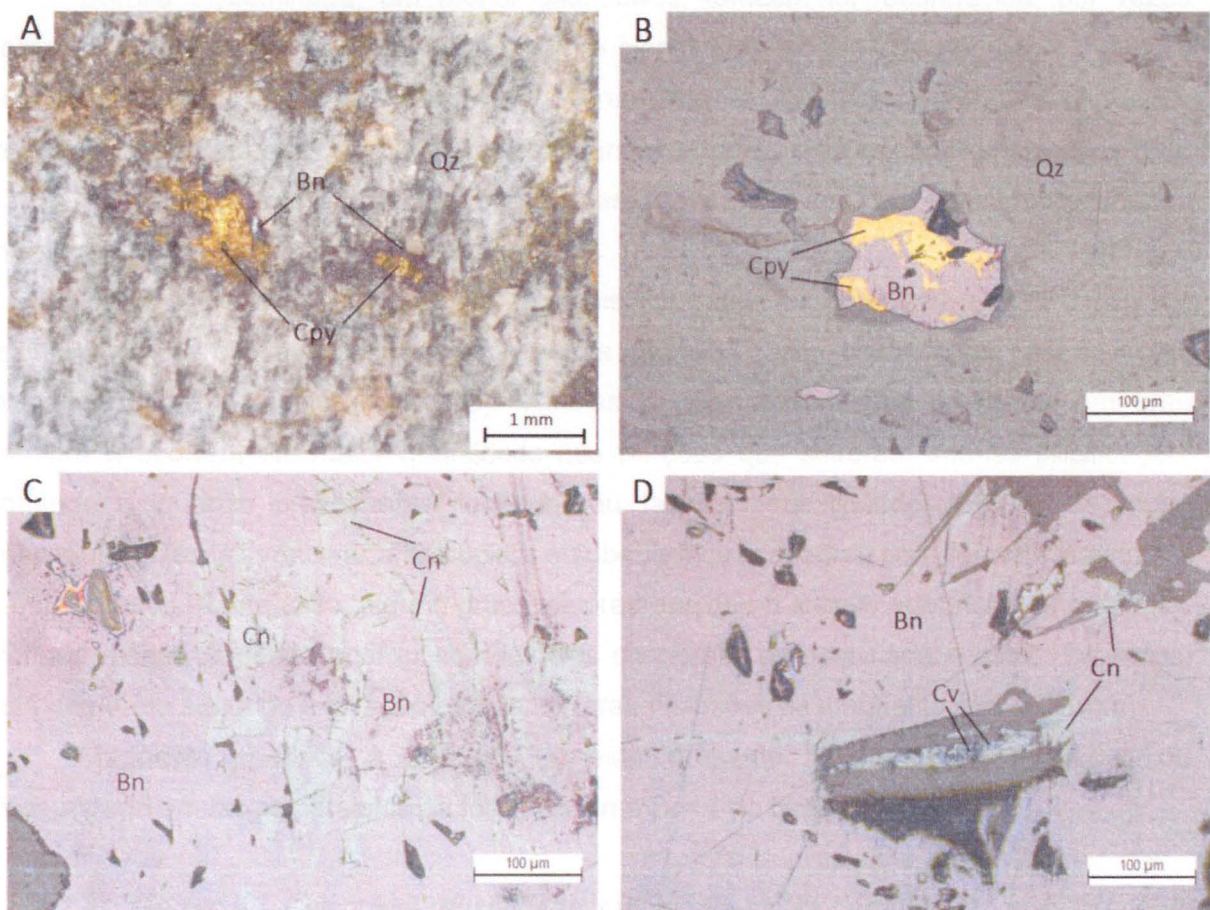


Figura 12: Fotografia (A) e fotomicrografias em luz refletida retratam feições texturais de bornita e calcopirita do Grupo III. A (FD45 315,95 m): calcopirita (Cpy) englobada totalmente ou parcialmente por bornita (Bn), em porção rica em quartzo (Qz). B (FD45 315,65 m): cristal de bornita, com calcopirita intercrescida, em meio ao quartzo. C (FD45 315,65 m): bornita com intercrescimento de calcosina (Cn). D (FD45 315,65 m): bornita com porções substituídas por calcosina e por covelina (Cv) muito fina, ao longo de fraturas e bordas. Bornita (Bn), calcopirita (Cpy), quartzo (Qz), calcosina (Cn), covelina (Cv).

A bornita, em geral, está muito presente nos xistos e ocorre em vênulas ou preenchendo sistemas de finas fraturas entre 1 mm e 1 cm, associadas a bolsões de

quartzo (Fig. 11A e 11B), por vezes isolando fragmentos de quartzo e constituindo localmente um *stockwork*. Há calcopirita pouco presente disseminada nos bolsões de quartzo ou ainda envolta por bornita, menor do que 1 mm (Fig. 12A).

Microscopicamente, observa-se que as vênulas de bornita englobam cristais de biotita, quartzo, clorita, feldspato alcalino e albita, bem como fragmentos da rocha encaixante, com contatos levemente irregulares. Em geral, as vênulas do sulfeto estão associadas a bolsões de quartzo e, por vezes, englobam ou são parcialmente bordeadas por albita hidrotermal (Fig 11C e 11D).

Além disso, em uma amostra o sulfeto aparece claramente associado a um veio hidrotermal composto por biotita esverdeada nas bordas, quartzo na porção intermediária e bornita no centro, com albita e feldspato alcalino associados ao mineral de minério.

Bornita disseminada, em menor quantidade, também foi reconhecida, por vezes como lamelas paralelas à clivagem mineral de clorita e/ou biotita. Em algumas porções, a bornita é alterada para calcosina, predominantemente nas partes centrais e menos frequentemente nas suas bordas, ocasionalmente formando uma textura simplectítica (Fig. 12C). Há ainda rara alteração da bornita para covelina (Fig. 12D), essa preenchendo microfraturas que cortam as vênulas do sulfeto.

Há ocorrência de calcopirita em cristais subeuédricos com 0,02 mm a 0,12 mm, restrita a microvênulas de quartzo, ou zonas de silicificação controladas pela foliação, intercrescida com bornita (Fig. 12B). Vênulas de calcopirita estão presentes em uma amostra e ocorrem em maior quantidade nas porções que sofreram intensa silicificação, cortando o quartzo previamente formado, ou também substituindo porções da rocha hospedeira. Nessas vênulas, a calcopirita é subeuédrica a anedral, com formato losangular e bordas retas. Neste caso, alguns grãos maiores englobam cristais euédricos de grunerita, biotita e clorita, podendo ocorrer com lamelas de bornita ou associada a esta. Por vezes, está orientada segundo a foliação e pode ter raras inclusões de magnetita (até 0,02 mm).

Magnetita euédrica à subeuédrica está presente na forma de inclusões ou disseminada em faixas paralelas às foliações Sn e Sn+1 do biotita-clorita xisto.

5.1.4 Grupo IV: Calcopirita hospedada em clorita-biotita-hornblenda anfibolito, com pirita associada

Definida por bolsões e vênulas de calcopirita, com eventual pirita associada, a tipologia do Grupo IV é hospedada em clorita-biotita-hornblenda anfibolito de coloração esverdeada. Nessa rocha, a foliação, em geral, é marcada por alternância entre faixas de poucos milímetros e coloração verde escuro intercaladas com faixas verde claro (por vezes dobradas), ou pela orientação de cristais de anfibólio e/ou turmalina, ou ainda pela intercalação entre lâminas de quartzo e lâminas verdes de granulação muito fina.

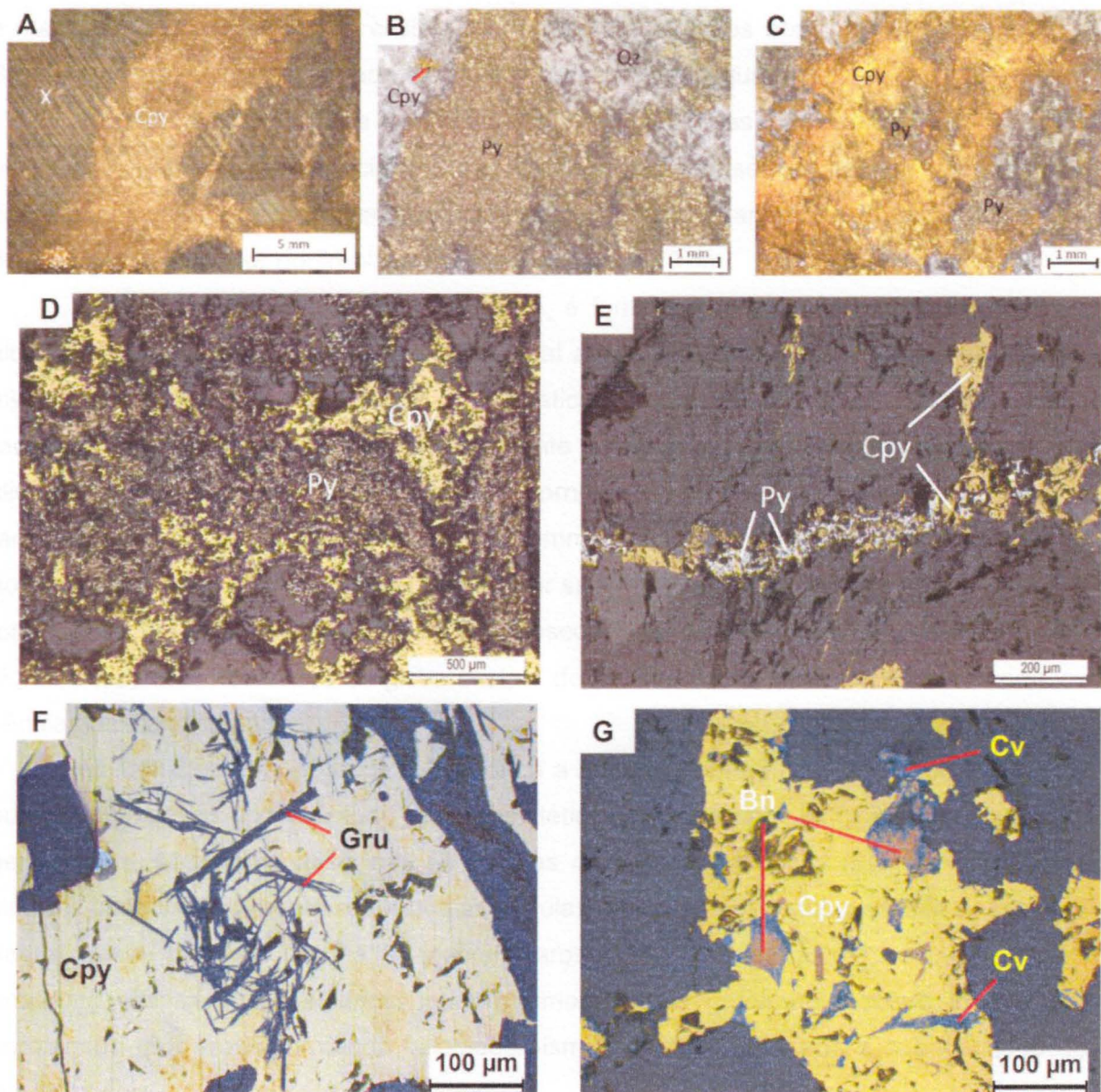


Figura 13: Fotografias (A, B e C) e fotomicrografias em luz refletida (D, E e F) representativas da tipologia de minério do grupo IV com calcopirita com pirita associada hospedada por biotita– anfibólio–clorita xistos (X). (Grupo IV). A (FD04 86,68 m): veio de calcopirita (Cpy) (com vênulas mais finas interligadas), cortando o xisto. B (FD45 115,62 m): bolsão de pirita (Py) associada a fragmento de quartzo (Qz), com um cristal de calcopirita disseminado. C (FD45 115,62 m): bolsão de calcopirita com pirita associada, englobando pequenos fragmentos de quartzo. D (FD21 214,70 m): vênulas de pirita associadas a cristais de calcopirita. E (FD21 214,70 m): vênula com forte associação entre pirita e calcopirita. F (FD04 86,68 m): vênula de calcopirita englobando cristais aciculares de grunerita (Gru). G (FD04 80,03 m): calcopirita com intercrescimento de bornita (Bn), esta com bordas de covelina (Cv). Calcopirita (Cpy), pirita (Py), quartzo (Qz), grunerita (Gru), covelina (Cv).

Microscopicamente, é possível observar uma leve orientação dos cristais de hornblenda, bem como uma foliação fortemente marcada por finos traços de magnetita sobre o anfibólio e/ou por traços de inclusões de quartzo no inossilicato, marcando a foliação Sn. Em uma amostra, é possível identificar uma clivagem de crenulação em que Sn

é marcada pela orientação de cristais de hornblenda paralelos aos traços de magnetita e Sn-1 é definida por cristais de hornblenda com orientação oblíqua à Sn.

Textura nematoblástica predomina nas amostras nas quais os anfibólios estão orientados, porém aparece incipiente nas demais, que apresentam textura granoblástica definida por cristais de hornblenda granulares. Em algumas amostras, observa-se textura porfiroblástica dada por porfiroblastos de anfibólio de até 3 cm.

O xisto, em ordem modal decrescente, é formado por hornblenda, biotita, clorita e albita hidrotermal, com grunerita como mineral acessório e eventual presença de titanita, allanita e granada. A hornblenda é prismática, subeuédrica, por vezes com cristais recobertos por material marrom ou parcialmente substituídos por biotita, que acompanha a clivagem da hornblenda. Alguns cristais de hornblenda possuem bordas de grunerita, que também aparece como cristais de até 1,5 mm, por vezes com pequenos núcleos de hornblenda. Os dois anfibólios são cortados por sulfetos. A biotita apresenta pleocroísmo em tons de marrom e está disposta em vênulas descontínuas de até 1,5 mm de espessura, com clorita associada. Por vezes, engloba cristais de pirita ou calcopirita, porém não corta as vênulas desses minerais.

Albita hidrotermal aparece subeuédrica a anedral, com geminação ausente, discreta ou descontínua do tipo Calrsbad ou polissintética ou ainda com extinção em leque. Em geral, ocorre fortemente associada às vênulas de pirita e calcopirita (Fig. 14A e 14B). A clorita é observada somente associada às vênulas de biotita, por vezes na forma de lamelas dentro desse mineral. Titanita é anedral (raros cristais subeuédricos) com até 1 mm, enquanto allanita é subeuédrica, marrom amarelado, e geralmente ocorre inclusa em hornblenda (por vezes formando halopleocroísmo). Cristais euédricos a subeuédricos de scheelita com até 1 mm foram observados.

A calcopirita aparece em bolsões isolados de até 2 cm (Fig. 13A), em vênulas discordantes menores do que 3 mm de espessura e preenchendo fraturas menores do que 1 mm. Pirita ocorre, em algumas amostras, na forma de bolsões de até 2 mm (Fig. 13B), como pequenas inclusões dentro de vênulas de calcopirita, ou fortemente associada a essas (Fig. 13C), por vezes englobando parcialmente o sulfeto de cobre. Pode ocorrer, ainda, na forma de vênulas dissociadas da calcopirita.

Microscopicamente, a calcopirita pode ocorrer associada a pirita ou a bornita ou sozinha. Quando associada a pirita, observa-se que o sulfeto de cobre está disposto em vênulas interligadas (Fig. 13D) com espessura entre 0,01 mm e 1,5 mm, com raras inclusões de magnetita euédrica menor do que 0,01 mm, ou raramente como lamelas dentro de hornblenda, concordantes à clivagem do inossilicato (Fig. 14D).

Em geral, as vênulas mais espessas de calcopirita não possuem associação com pirita. Calcopirita ocorre, também, na forma de vênulas cortando um cristal euédrico de scheelita (Fig. 14C). Já a pirita ocorre associada à calcopirita em vênulas interligadas e, em

geral, mais espessas do que as de apenas calcopirita (Fig. 13E). Nota-se que os cristais de pirita são cúbicos, euédricos a subeuédricos, menores do que 0,4 mm. Por vezes, as vênulas de sulfetos englobam hornblenda euédrica, biotita subeuédrica (Fig. 14E) ou estão associadas com magnetita subeuédrica à anedral ou com albita hidrotermal.

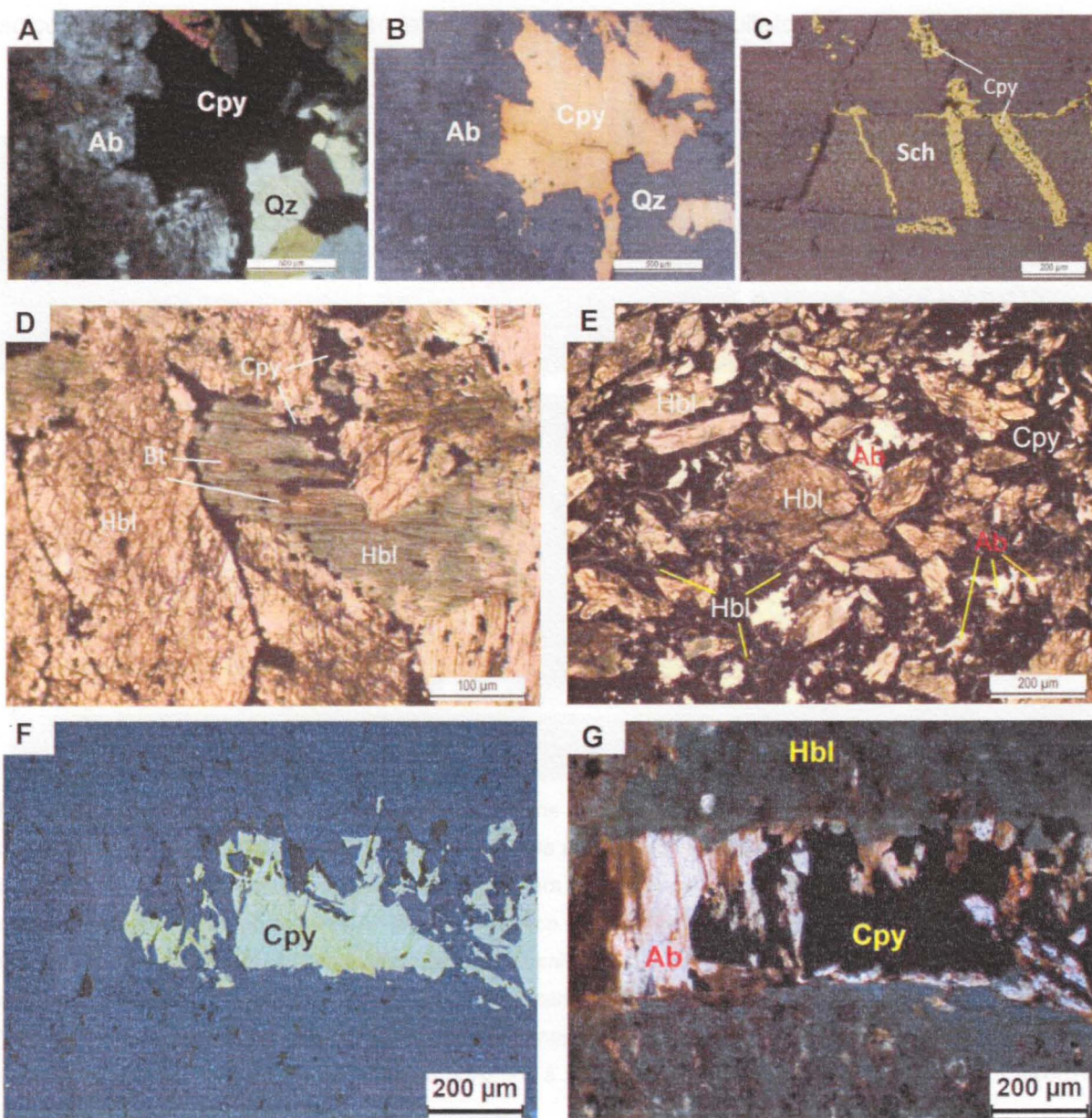


Figura 14: Fotomicrografias da tipologia de minério do Grupo IV com calcopirita hospedada por biotita–anfíbólio–clorita xisto (X). A (luz transmitida com polarizadores cruzados) e B (luz refletida) mostram calcopirita (Cpy) e com albita no contato entre sulfeto e o quartzo deformado (Qz) (FD21 79,85 m). C (FD21 214,70 m): vênulas de calcopirita cortando cristal prismático euédrico, provavelmente scheelita. D (FD21 214,70 m): cristal de hornblenda esverdeada com lamelas de calcopirita, concordantes à clivagem ou no contato entre cristais de anfíbólio. Notar que a hornblenda é substituída em suas bordas por anfíbólio incolor (grunerita) e por biotita, ao longo das clivagens. E (FD21 214,70 m): calcopirita englobando cristais de hornblenda euédricos, subeuédricos e aciculares, com cristais de albita hidrotermal associados. F (luz refletida) e G (luz transmitida com polarizadores descruzados) mostram uma vênula cortando o anfíbolito da amostra FD04 86,68 m, preenchida pela associação de albita e calcopirita. Calcopirita (Cpy), albita (Ab), quartzo (Qz), biotita (Bt), hornblenda (Hbl), scheelita (Sch).

Quando bornita está presente, aparece intercrescida com calcopirita, como raros cristais disseminados ou ainda com covelina intercrescida principalmente nas suas bordas (Fig. 13G) ou preenchendo microfraturas. Calcosina e covelina também podem ocorrer associadas à calcopirita, ambas associadas às bordas do sulfeto. Além disso, grunerita acicular é englobada total ou parcialmente pelas vênulas do sulfeto de cobre (Fig.13F).

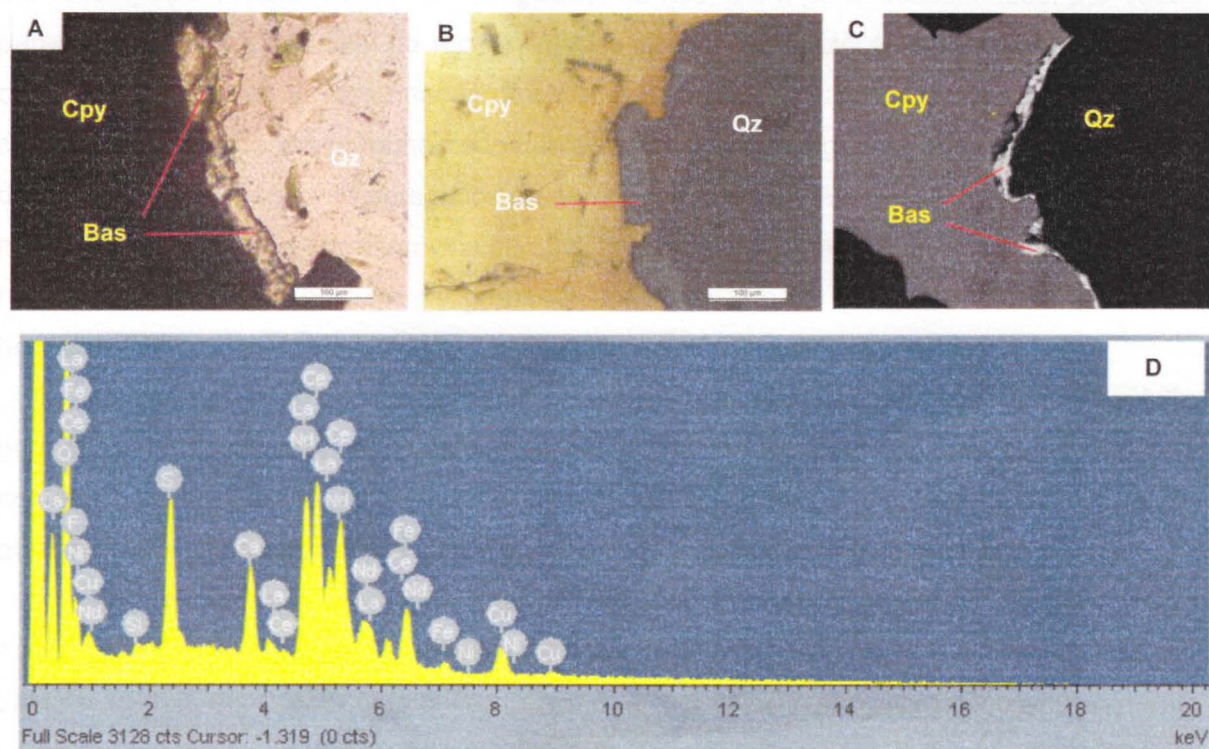


Figura 15: Fotomicrografias (A e B), imagem de elétrons retroespalhados obtida com uso de MEV (C) e gráfico de espectroscopia de energia dispersa obtido através de análise semi-quantitativa EDS (D). A (luz refletida com polarizadores descruzados), B (luz refletida) e C retratam vênula de calcopirita (Cpy) associada a quartzo (Qz) e mantada parcialmente por bastnasita (Bas). B destaca que em luz refletida, a bastnasita parece um mineral opaco com baixa refletividade, enquanto em luz transmitida (A) é um mineral translúcido incolor a levemente esverdeado. C: espectro de EDS da bastnasita, destacando a presença de lantânio (La), cério (Ce) e neodímio (Nd) na composição do mineral. A presença de pequenas quantidades de Cu-Fe-S e de Si foram interpretadas como relativas aos minerais hospedeiros ou próximos à bastnasita, tais como calcopirita e quartzo. Calcopirita (Cpy), quartzo (Qz), bastnasita (Bas).

Calcopirita pode aparecer fortemente associada a zonas silicificadas, tanto na forma de veios preenchidos parcialmente por calcopirita em uma porção e abruptamente interrompida pelo preenchimento por quartzo em outra, como por veios zonados, preenchidos por quartzo nas bordas e calcopirita no centro. Neste caso, as bordas das vênulas de calcopirita estão parcialmente manteadas por um mineral que sob luz transmitida é incolor a levemente esverdeado (Fig. 15A), com birrefringência muito baixa, enquanto em luz refletida apresenta baixa reflectância (Fig. 15B). Análises de EDS acoplado ao microscópio eletrônica de varredura (MEV) mostram que o mineral é a bastnasita [(Ce, La,

Nd)CO₃F] (Fig. 15C). A análise semi-quantitativa EDS indicou que o carbonato possui maior quantidade de lantânio e cério em relação ao neodímio (Fig. 15D).

As análises identificaram, ainda, microcristais arredondados de galena com selênio na estrutura, associados às vênulas de calcopirita, bem como traços de cobalto na composição do sulfeto de cobre.

As zonas silicificadas são caracterizadas por um veio principal que corta os anfibolitos, com vênulas menores interligadas, ou não, e em geral descontínuas, por vezes paralelas à foliação principal da rocha. Nessas zonas, o quartzo é relativamente grosso e com diversas feições de deformação, tais como: extinção ondulante (setorizada em alguns cristais), contatos desde poligonalizados até interlobados em algumas porções, e/ou divisão de subgrãos e formação de agregados muito finos do mineral. Além disso, em uma amostra nota-se que no contato entre um veio de quartzo principal e o anfibolito, a hornblenda possui bordas irregulares com acículas de grunerita, formadas a partir das bordas dos cristais de hornblenda em direção ao veio, orientadas perpendicularmente ao contato.

Magnetita está presente na maioria das amostras, disposta em faixas paralelas à Sn ou disseminada, em geral em cristais menores do que 1 mm. Está comumente associada à hornblenda e menos frequentemente à calcopirita. Molibdenita é verificada na amostra em que há presença de calcosina e covelina, menor do que 0,08 mm e pouco presente.

Por fim, veios tardios cortam tanto os anfibolitos quanto os veios de quartzo e a mineralização preexistente. Esses são zonados da borda para o centro e preenchidos por albita e epidoto euédrico, com cor verde limão, e, por vezes, estiplomelano relativamente fino e fibro-radiado. Veios de albita associada a calcopirita também cortam o anfibolito (Fig. 14F e 14G).

5.1.5 Grupo V: Calcopirita ou bornita associadas à magnetita

A tipologia de minério do Grupo V é caracterizada por vênulas ou disseminação de calcopirita hospedada em magnetito (Fig. 16A) e por bolsões ou vênulas de bornita em rocha rica em magnetita (quartzo-feldspato-magnetita xisto; Fig. 17B).

Nas amostras com predominância de calcopirita, essa é hospedada em um magnetito com bandamento milimétrico com porções escuras muito finas, porções metálicas ricas em porfiroblastos de magnetita, ou ainda com porções esbranquiçadas muito finas. Microscopicamente, é possível observar que as porções metálicas são compostas por aglomerados de magnetita cúbica euédrica a subeuédrica, em cristais menores do que 0,5 mm, dispostos em faixas. As porções escuras são compostas predominantemente por anfibólio, em geral com pouca biotita associada. Em uma amostra, faixas de hornblenda imersas em uma matriz constituída por biotita verde fina, levemente orientada segundo o bandamento foi reconhecida. Por sua vez, as porções claras são constituídas por feldspato com presença de biotita, anfibólio e calcopirita.

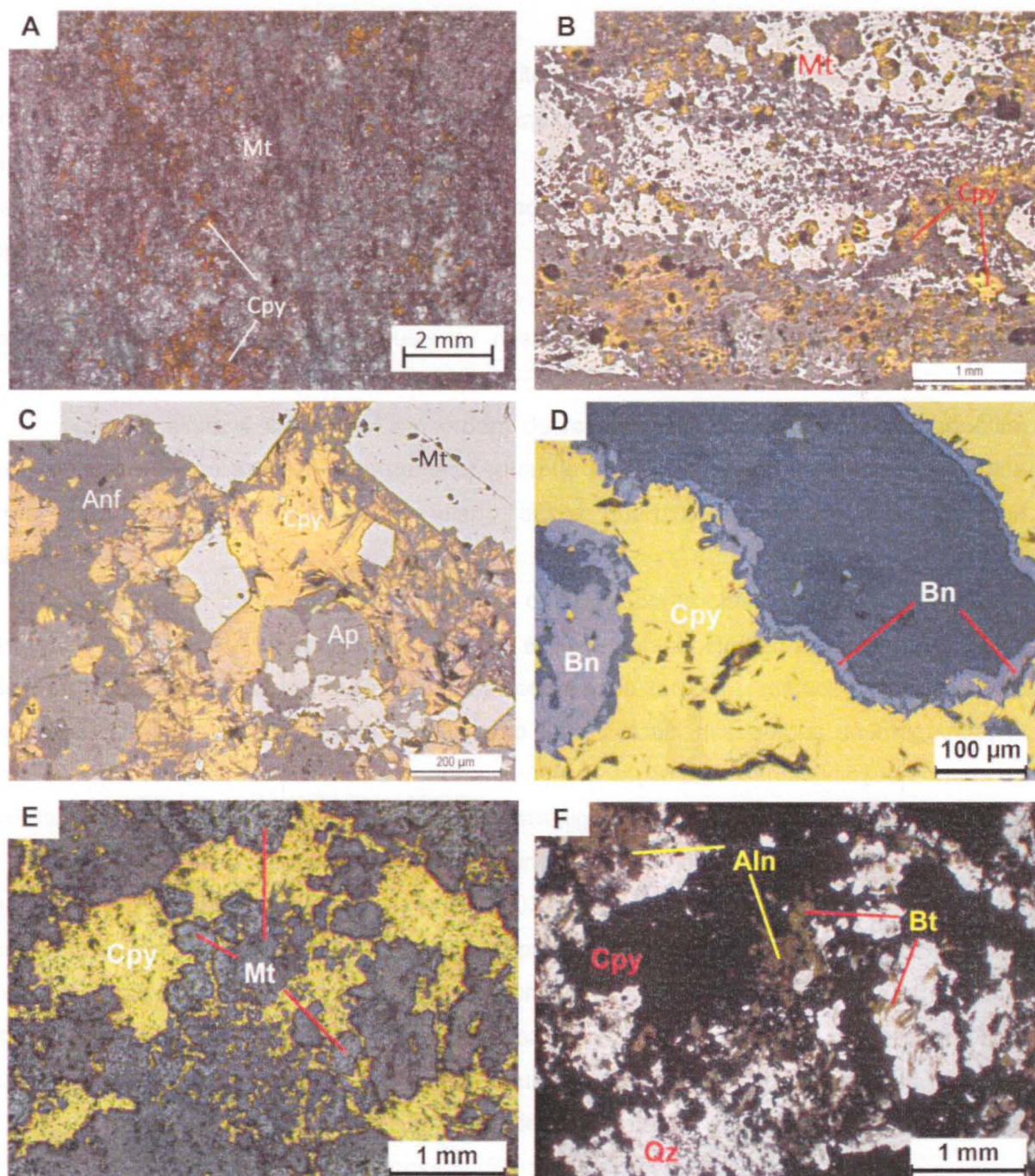


Figura 16: Fotografia (A) e fotomicrografias (B, C, D, E e F) representativas da tipologia de minério do Grupo V, com sulfetos associados à magnetita. A (FD91 361,00 m): magnetitito com porfiroblastos de magnetita (Mt) imersos em matriz muito fina constituída por magnetita e anfibólio, com calcopirita (Cpy) disseminada. B (FD 91 361,00 m): faixas com maior concentração de magnetita e calcopirita disseminada, associado tanto à magnetita quando aos minerais de ganga (luz refletida). C (FD 91 361,00 m): calcopirita associada aos minerais de ganga (apatita = Ap e hastingsita = Anf), com magnetita subeudral (luz refletida). D (FD04 87.18 m): calcopirita mantada por bornita (Bn; luz refletida). E (FD91 394,60 m): vênulas de calcopirita associadas a cristais de magnetita, por vezes mantendo-os parcialmente (luz refletida). F: imagem correspondente a E, porém em luz transmitida com polarizadores descruzados, retratando calcopirita associada fortemente a quartzo (Qz), e subordinadamente a allanita (Aln) e biotita (Bt). Calcopirita (Cpy), magnetita (Mt), anfibólio (Anf), apatita (Ap), biotita (Bt), bornita (Bn), quartzo (Qz), allanita (Aln).

A estrutura predominante do magnetitito consiste em uma foliação principal (Sn) marcada pela alternância irregular entre as faixas composicionalmente distintas, que podem aparecer levemente dobradas em algumas amostras. Nas faixas ricas em biotita é reconhecida além da Sn, definida pela orientação de biotita e anfibólio, uma clivagem de crenulação (Sn+1) definida apenas por biotita.

Em zonas silicificadas, a clivagem de crenulação é marcada pela orientação de faixas ricas em magnetita, mas relíquias do mesmo mineral são visíveis ao longo da foliação Sn, principalmente nas porções ricas em quartzo.

O magnetitito é composto, em ordem decrescente de abundância, por magnetita, hornblenda (quando presente), hastingsita (quando presente), feldspato, allanita e apatita com eventual ocorrência de estilpnomelano, biotita, quartzo, epídoto, carbonato ou e/ou fluorita.

A magnetita ocorre disposta em faixas ou como porfiroblastos subeuédricos com 1 mm a 9 mm, cortados por veios muito finos de estilpnomelano. Podem apresentar inclusões de calcopirita (Fig. 17D) ou anfibólio. O estilpnomelano também aparece em veios mais espessos cortando todos os minerais e como finos cristais nas bordas da magnetita. O feldspato potássico é subeuédrico a anedral, sem geminação, apresenta extinção zonada da borda para o centro, está disposto em faixas e em algumas porções ocorre fraturado.

A hastingsita ocorre na amostra de magnetitito mais rica em magnetita e com menor quantidade de feldspato, como cristais de 0,02 mm a 0,2 mm, subeuédricos a anedrais englobados por magnetita. Na presença de zonas silicificadas, ocorre disposta em faixas ricas em anfibólio. A hornblenda ocorre em cristais subeuédricos tanto imersos em uma matriz constituída por biotita verde, quanto associados à hastingsita, em faixas compostas apenas por anfibólio, ocasionalmente com relíquias de magnetita relativamente fina.

Allanita ocorre com diversas cores de pleocroísmo, desde laranja vibrante até marrom ou amarelo claro. Cristais grossos de apatita também são comuns.

O magnetitito com forte presença de feldspato possui hornblenda prismática, subeuédrica a anedral, em cristais com 0,02 mm a 0,2 mm, por vezes encoberta por material marrom escuro ou substituída por biotita. Há cristais de hornblenda substituídos por grunerita na borda e hornblenda zonada, com cor esverdeada na porção mediana e marrom na porção central. O magnetitito é, ainda, cortado por vênulas de biotita (0,005 mm a 0,4 mm de espessura) ou de muscovita (até 0,3 mm de espessura) e veios de biotita com albita, em algumas porções parcialmente alterada para escapolita. Em algumas partes do veio, a escapolita é predominante, enquanto em outras a albita é dominante.

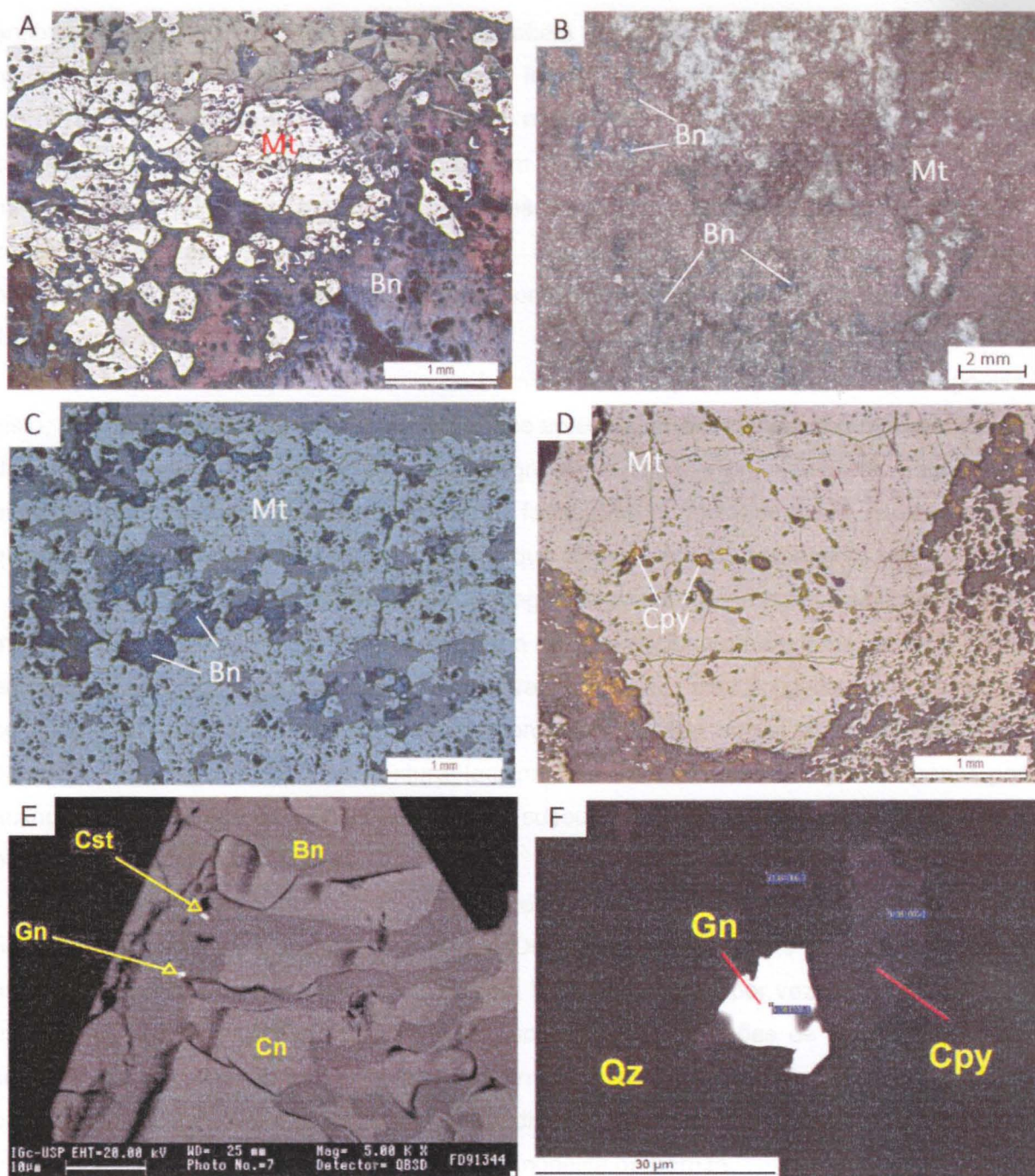


Figura 17: Fotografia (B), fotomicrografias (A, C e D) e micrografias retroespalhadas obtidas à partir de análise de microscopia eletrônica de varredura (F e E) representativas da tipologia de sulfetos do Grupo V, associados à magnetita. A (FD91 344,22 m): bornita englobando e cortando cristais subeuédricos de magnetita (luz refletida). B (FD91 344,22 m): bornita disseminada em magnetitito e associada a bolsões de quartzo nesse. C (FD91 344,22 m): bornita nos interstícios entre cristais de magnetita, por vezes truncando-os (luz refletida). D (FD91 361,00 m): porfiroblasto subédrico de magnetita com limites irregulares e feições de dissolução com finas inclusões de calcopirita (luz refletida). F (FD91 344,22 m): intercrescimento simplectítico entre bornita e calcosina (Cn), com microinclusões de cassiterita (Cst) e galena (Gn) na bornita. Bornita (Bn), magnetita (Mt), calcopirita (Cpy), galena (Gn), cassiterita (Cst), calconia (Cn), quartzo (Qz).

A calcopirita representa menos do que 5% da composição modal das lâminas descritas e ocorre com bordas retas ou irregulares, disseminada nas porções ricas em

anfibólio (Fig. 16B e 16C) ou feldspato e também associada à magnetita, cortando esse mineral, manteando-o parcialmente, ou como inclusões em seus porfiroblastos (Fig. 16B; Fig. 17D), com cristais variando entre 0,001 mm e 0,2 mm. Bornita ocorre associada a calcopirita, tanto em cristais subeuédricos com 0,005 mm a 0,04 mm, quanto manteando parcialmente o mineral (Fig. 16D) ou intercrescida com esse. No magnetitito com fortes zonas silicificadas, a calcopirita aparece em vênulas interligadas e associadas principalmente às porções ricas em quartzo, com magnetita também associada (Fig. 16E e 16F).

Na amostra com predominância de bornita, essa hospeda-se em quartzo–magnetita xisto, com porções silicificadas de até 3 cm, que apresentam alternância abrupta com faixas de poucos centímetros compostas por magnetita maciça. Por vezes, há fragmentos angulosos das porções silicificadas dentro das faixas de magnetita, ou ainda veios menores que 1 mm do óxido cortando essas porções, o que confere aspecto brechado à rocha.

Ao microscópio, foi observado que a magnetita concentra-se em faixas entre 0,1 e 5 mm, em cristais subeuédricos com 0,008 mm a 0,4 mm, inclusa em carbonatos, bem como em porfiroblastos com 0,5 mm a 2,5 mm, com raras inclusões de calcopirita e bornita. Nota-se que as faixas de magnetita cortam uma porção preservada de um actinolita xisto, com orientação incipiente dos cristais, textural localmente nematoblástica, composto apenas por actinolita, que aparece em cristais prismáticos, subeuédricos, entre 0,02 mm e 0,8 mm, com pleocroísmo em tons de verde claro.

Nas porções da rocha ricas em magnetita, há ocorrência de faixas descontínuas ricas em carbonato e faixas ricas grunerita. Os cristais de carbonato são subeudrais a anedrais, possuem duas direções de clivagem bem definidas e, por vezes, concentram-se em aglomerados com formato arredondado, com diversas inclusões de magnetita cúbica subeuédrica, ou cortado por vênulas de bornita. A grunerita (0,04 mm e 0,2 mm) é prismática, subeuédrica, incolor ou apresenta discreto pleocroísmo verde pálido. Por vezes ocorre como cristais isolados englobados por magnetita ou bornita.

A bornita concentra-se em uma vênula de 5 mm, englobando tanto magnetita (Fig. 17A), como carbonato e grunerita. Ocorre também preenchendo fraturas dos porfiroblastos ou os interstícios entre os aglomerados de cristais de magnetita (Fig. 17C) ou ainda, pouco expressivamente, disseminada entre as faixas de carbonato ou de grunerita, bem como no actinolita xisto, ou em vênulas (menores do que 0,3 mm) nos interstícios destes. Inclusa na magnetita, há rara ocorrência de calcopirita arredondada a elipsoidal, menor do que 0,05 mm.

Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e EDS identificaram raras microinclusões de cassiterita e galena nas vênulas de bornita (Fig. 17E). A galena possui quantidade significativa de selênio na composição e aparece, também, associada às bordas das estruturas (Fig. 17F). Hessita (Ag_2Te) é encontrada nas bordas de bornita. Análises de

EDS identificaram pequena quantidade de urânio na composição do mineral, o que pode ser indicativo de microinclusões de uraninita.

Nas amostras com predominância de calcopirita, a análise de MEV identificou cristais disseminados de calcopirita intercrescidos com bornita que podem aparecer com wittchenita (Cu_3BiS_3) nas bordas, enquanto cristais apenas de calcopirita apresentam galena associada. Disseminados em meio às zonas silicificadas, estão presentes microcristais arredondados de monazita com alto teor de cério, lantânio e neodímio, uraninita com quantidade expressiva de cério, além de um tungstanato. A análise química semi-quantitativa de EDS indicou que o tungstanato possui composição similar à da wolframita ($(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4$) e da ferberita (FeWO_4), sendo mais enriquecido em ferro e possuindo quantidade pouco expressiva de manganês e significativa de nióbio e estrôncio.

5.1.6 Grupo VI: Pirrotita hospedada em muscovita–biotita–quartzo–xisto

A tipologia do Grupo VI tem como sulfeto predominante a pirrotita, com calcopirita e bornita subordinadas (Fig. 18 e 19) hospedados por muscovita-biotita–quartzo xisto e biotita–clorita xisto; esse último característico apenas de uma amostra.

O muscovita-biotita–quartzo xisto possui coloração bege e granulação fina a média. A foliação é marcada por lentes de quartzo azuladas menores do que 1 mm, intercaladas com lâminas de biotita e muscovita (material creme muito fino) e lâminas quartzo–feldspáticas, ou ainda, pela alternância milimétrica entre porções silicificadas e bandas ricas em muscovita e biotita. Microscopicamente, é possível observar que há duas foliações nessa rocha: a foliação S_n , marcada pela orientação de cristais de biotita, relativamente mais desenvolvida, pela alternância entre bandas quartzo–feldspáticas e bandas ricas em biotita, ou ainda pela associação entre biotita e muscovita orientadas dentro de microlitons com quartzo granular; a clivagem de crenulação S_{n+1} , definida pela orientação de biotita, relativamente menor. A textura é lepidogranoblástica, definida por biotita e/ou muscovita orientadas e por quartzo e/ou feldspato granulares.

Paralelo à S_n , há ocasional ocorrência de um veio hidrotermal que corta o muscovita-biotita-quartzo xisto, com silicificação nas bordas e pirrotita na porção mais central, além de uma zona de alteração sericitica entre o veio e a rocha encaixante. Na porção sericitizada, as feições do xisto são totalmente apagadas, restando apenas aglomerados arredondados de sericita com interstícios preenchidos por clorita euédrica a subeuédrica, por vezes encoberta com um material alaranjado. Na interface entre a porção sericitizada e a silicificação, está presente uma alta concentração de grafita, que pode ocorrer intercrescida com cristais de muscovita relativamente bem desenvolvida dentro da zona de alteração.

Na porção silicificada, o quartzo ocorre com granulação relativamente maior do que na rocha encaixante, porém possui as mesmas feições de deformação. Além disso, faixas de biotita vermelha e muscovita ocorrem orientadas dentro da zona.

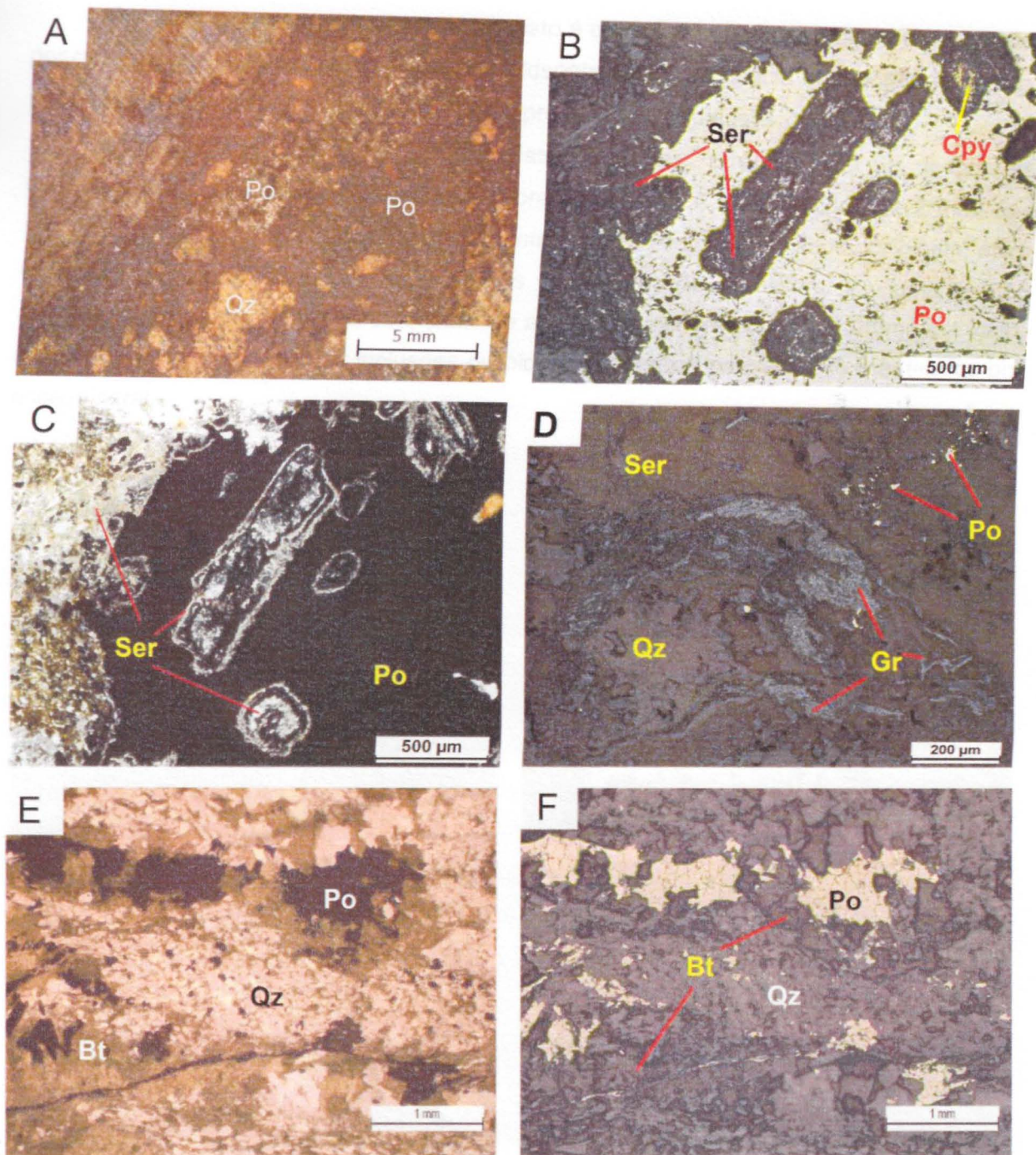


Figura 18: fotografia (A) e fotomicrografias (B, C, E e F) representativas da tipologia do Grupo VI com pirrotita hospedada em muscovita-biotita-quartzo xisto, amostra FD39 186,00 m. A: pirrotita orientada segundo a foliação do xisto, em zonas de substituição, com fragmentos desde angulosos até arredondados de quartzo e do xisto. B (luz refletida) e C (luz transmitida com polarizadores descruzados) mostram uma vênula de pirrotita englobando pseudomorfos euédricos (provavelmente andaluzita) totalmente substituídos por sericita e pirrotita. Além disso, algumas porções da borda da vênula estão com a mesma estrutura dos pseudomorfos. D: concentração de grafita (Gr) na interface entre zona de sericitização e zona de silicificação (luz refletida). E (luz transmitida com polarizadores descruzados) e F (luz refletida) mostram uma vênula de pirrotita fortemente associada a cristais euédricos de biotita verde, com quartzo também associado. Pirrotita (Po), quartzo (Qz), calcopirita (Cpy), sericita (Ser), grafita (Gr), biotita (Bt).

A mineralogia do muscovita-quartzo-xisto é composta, em ordem modal decrescente, por quartzo, muscovita (quando presente), feldspato muito fino, biotita e, subordinadamente, por clorita associada à biotita, com ocasional presença de andalusita.

Macroscopicamente, são observadas estruturas arredondadas e levemente deformadas na direção da foliação com coloração marrom e menores do que 2 mm, que representam cristais de andalusita parcialmente ou totalmente substituídos por biotita, além de zonas silicificadas que chegam a poucos centímetros de espessura. Em uma secção delgada, é possível observar raros cristais de andalusita menores do que 1,25 mm no xisto, muito corroídos, com diversas inclusões de biotita marrom ou parcialmente manteados por esse mineral.

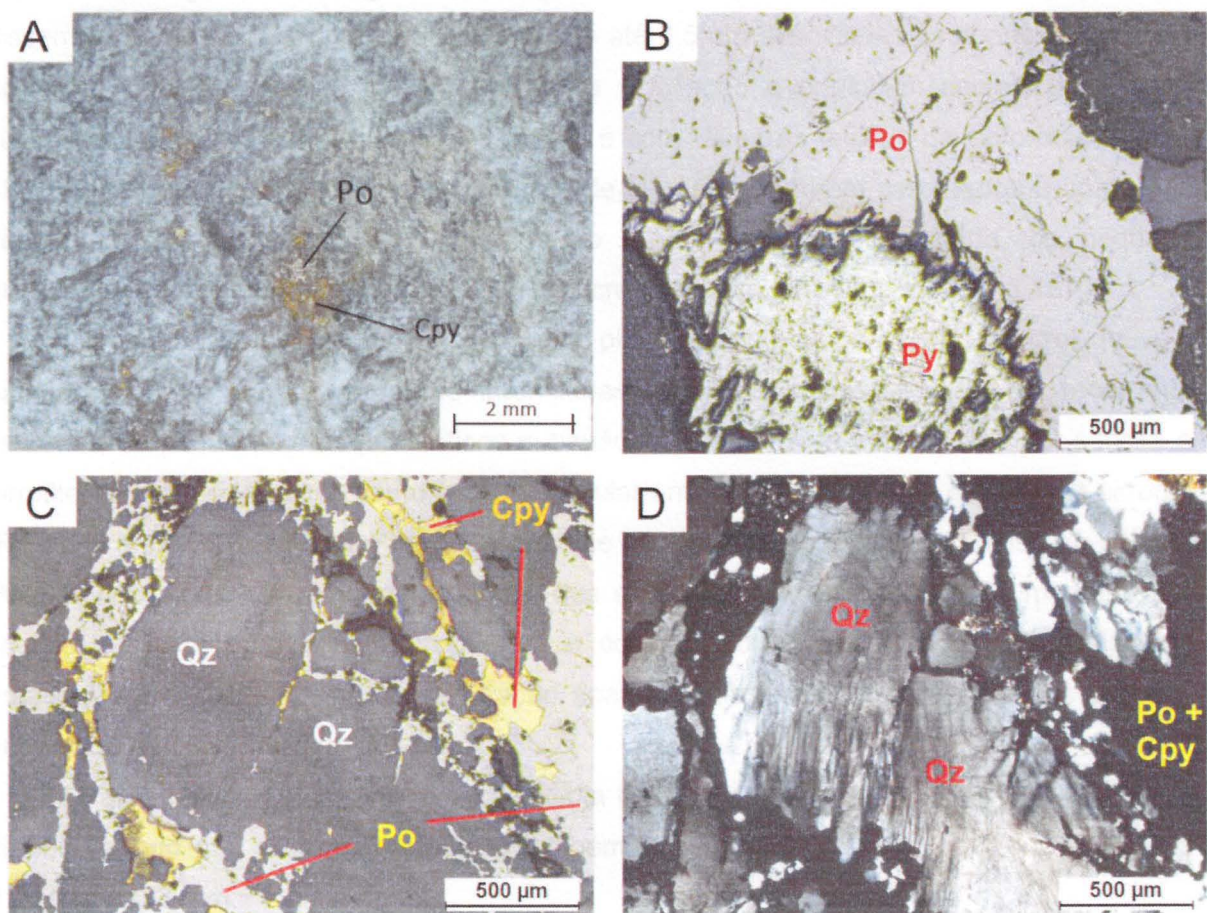


Figura 19: Fotografias (A) e fotomicrografias (B, C e D) da tipologia do Grupo VI com pirrotita (Po) hospedada em biotita–muscovita–quartzo xisto. A (FD02 256,62 m): pirrotita associada à calcopirita, disseminada, em porção silicificada do xisto. B (FD39 186,99 m): cristal de pirita (Py) associado a vênula de pirrotita, com destaque para a borda do grão irregular e corroída no contato com o outro sulfeto (luz refletida). C (FD39 186,99 m): vênulas de pirrotita com intercrescimento de calcopirita (Cpy) e quartzo associado (luz refletida). D: imagem correspondente a C, porém em vista em luz transmitida com polarizadores cruzados, ressaltando a associação entre os sulfetos e cristais de quartzo muito deformados, com lamelas de deformação. Pirrotita (Po), calcopirita (Cpy), pirita (Py), quartzo (Qz).

O quartzo é euédrico a subeuédrico, com extinção ondulante, variando entre 0,3 mm e 2,5 mm. Por vezes, agregados de cristais muito finos de quartzo são observados nos contatos entre grãos maiores do mineral, retratando recristalização dinâmica pelo processo de *bulging* (Passchier e Trouw, 2005). O feldspato apresenta extinção zonada da borda para o centro, sem geminação e é levemente orientado segundo a foliação Sn em algumas porções. A biotita geralmente é bem desenvolvida e apresenta pleocroísmo variando entre tons de verde e de marrom em uma amostra, e em tons de vermelho e marrom em outra.

A pirrotita associada ao muscovita-biotita-quartzo xisto ocorre na forma de bolsões de até 1,3 cm, em vênulas interligadas a estes e entre si (0,04 mm a 2 mm de espessura), e em grãos de 0,005 mm a 2,5 mm, subeuédricos. Também ocorre em vênula de 5 mm de espessura, englobando fragmentos angulosos do xisto ou de quartzo (Fig. 18A), disseminada ou ainda em veios ou bolsões de até 2,5 cm associadas às zonas silicificadas do xisto. Algumas vênulas são concordantes à foliação e englobam cristais de quartzo subeuédricos com bordas retas a irregulares e com diversas feições de deformação (Fig. 19C e 19D), bem como cristais de biotita verde euédrica (também associados a borda das vênulas, Fig. 18E e 18F) e fragmentos do xisto. Há ocorrência, ainda, de pequena quantidade de calcopirita disseminada ou intercrescida com pirrotita (Fig. 19C e 19A).

Na rocha com alteração sericitica, a pirrotita aparece na porção central do veio hidrotermal, com vênulas menores interligadas ou não. Nessas vênulas, há recorrente presença de pseudomorfos prismáticos subeuédricos totalmente substituídos por sericita e pirrotita, formando um zonamento interno irregular entre halos de sericita e halos de pirrotita (Fig. 18B e 18C). Essa feição também aparece nas bordas de diversas vênulas do sulfeto. Pirita ocorre associada à pirrotita, sendo que o contato entre os sulfetos é marcado por cristais de pirita com bordas irregulares e com aspecto corroído (Fig. 19B). Feldspato potássico com aspecto turvo e geminação apagada também ocorre associado à pirrotita, englobado pelas vênulas do mineral.

Raras inclusões de bornita e calcopirita estão presentes em bolsões ou vênulas de pirrotita, sendo que a calcopirita ocorre também disseminada no xisto, com granulação de 0,04 mm a 0,3 mm.

Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e EDS identificaram a associação de galena, teluretos e arsenetos com as vênulas de pirrotita. A galena aparece na borda da bornita, prismática, euédrica e com microinclusões de possível telureto de paládio (Fig. 20A), por vezes com ítrio na composição.

A análise de EDS indicou presença de um arseneto de cobalto e ferro com composição indicativa de alloclasita [(Co,Fe)AsS] ou de glaucodoto [(Co,Fe)AsS], ambos minerais do sistema cristalino ortorrômbico. O mineral está fortemente associado às vênulas de pirrotita, como cristais euédricos octaédricos englobados pelo sulfeto, por vezes com inclusões de fairbankita e de um arseneto de cobalto e ferro sem atual classificação, com

menor somatória do número atômico de seus elementos em relação à aloclásita ou glaucodoto (Fig. 20D).

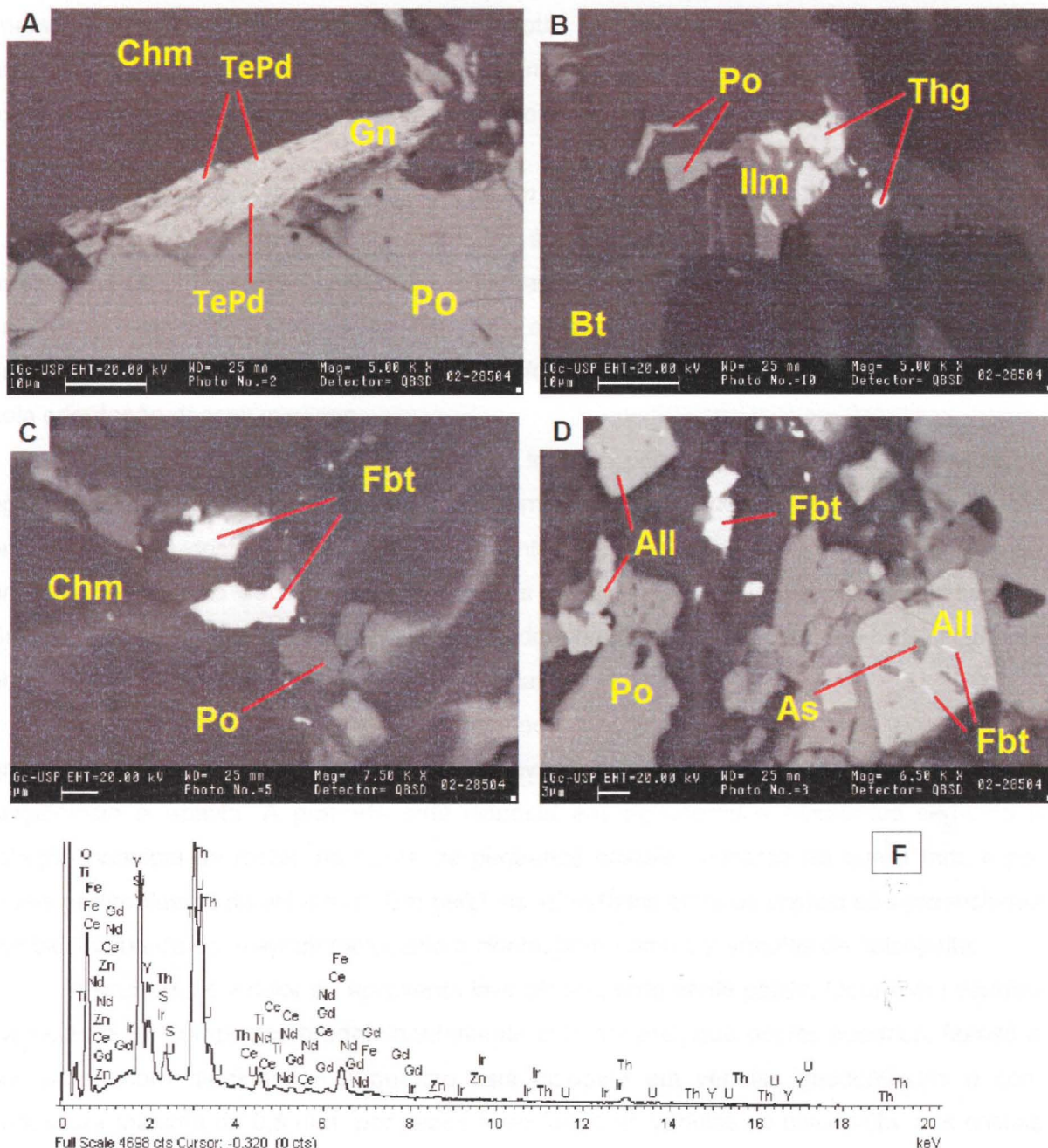


Figura 20: Imagens de elétrons retroespalhados retiradas com o uso de MEV (A, B, C e D) e gráfico de espectroscopia de energia de dispersão obtido por EDS (F), amostra FD 02 285,04 m. A: pirrotita (Po) com galena (Gn) euédrica na borda no contato entre calcopirita e chamosita (Chm). A galena possui microinclusões de telureto de paládio (TePd). B: Cristal de ilmenita (Ilm) com thorogumita (Thg) associada às bordas e como inclusões. Pirrotita (Po) é associada tanto à borda da thorogumita quanto da ilmenita. Biotita (Bt) aparece associada. C: Fairbankita (Fbt) com pirrotita associada, imersas em matriz de chamosita. D: Aloclásita/glaucodoto (All) euédrico associado à pirrotita e com inclusões de pirrotita e arseneto (As) não classificado. Fairbankita aparece associada a pirrotita. F: espectro de EDS da thorogumita, destacando a presença de tório (Th) e urânio (U) e, subordinadamente, ítrio (Y), irídio (Ir), cério (Ce), gadolínio (Gd) e neodímio (Nd). Pirrortita (Po), galena (Gn), chamosita (Chm), telureto de paládio (TePd), ilmenita (Ilm), thorogumita (Thg), fairbankita (Fbt), Aloclásita/glaucodoto (All).

Fairbankita é um telureto de chumbo $[Pb(TeO_3)]$ e aparece, também, como cristais imersos em matriz de chamosita com pirrotita associada. Thorogumita foi verificada associada à ilmenita e pirrotita. A análise semi-quantitativa de EDS identificou presença expressiva de ítrio, irídio, gadolínio, cério, telúrio e neodímio na composição do mineral.

5.1.7 Grupo VII: *Calcopirita hospedada em biotita-granada xistos*

A tipologia de minério do grupo VII é caracterizada por vênulas de calcopirita associadas a muscovita-biotita-quartzo-granada xistos. Macroscopicamente, a rocha encaixante possui uma foliação definida pela orientação de muscovita e porfiroblastos de granada levemente alongados na direção da foliação, com textura lepidoblástica marcada pela orientação desses minerais.

Petrograficamente, o xisto possui uma foliação principal definida pela orientação de aglomerados de granada coalescente, bem como por vênulas de grunerita paralelas a essa orientação, com cristais orientados concordantemente à Sn. Localmente, nas vênulas de grunerita, os cristais do minerais formam uma clivagem de crenulação incipiente em que Sn+1 é oblíqua à Sn. Já a textura predominante é nematoblástica e localmente porfiroblástica, representada por raros porfiroblastos de granada.

A mineralogia do xisto, em ordem modal decrescente, é composta por granada, grunerita, quartzo, biotita e clorita, com eventual presença de allanita, monazita e plagioclásio e apatita. A granada está disposta em aglomerados orientados segundo a foliação principal da rocha, na forma de pequenos cristais, menores do que 1 mm, e por vezes porfiroblastos de até 6 mm. Em geral, os interstícios entre os cristais são preenchidos por biotita fina de cor marrom associada a clorita, bem como por vênulas de calcopirita.

A grunerita é incolor ou apresenta leve pleocroísmo verde pálido. Ocorre em vênulas paralelas à Sn compostas predominantemente pelo mineral, que ocorre euédrico, fibroso e por vezes com geminação. O quartzo está disposto em vênulas descontínuas e com espessura máxima de 0,5 mm, por vezes associadas às vênulas de calcopirita, aos cristais de granada ou sendo englobados por estas. Aparece com extinção ondulante, por vezes setorizada com eventuais contatos interlobados entre si. Os cristais são menores do que 1,7 mm, com ocasionais inclusões de grunerita aciculares.

Biotita aparece com coloração marrom esverdeada, muito fina e nos interstícios entre os cristais de granada, na forma de vênulas, ou associado à clorita (por vezes manteada por esta), menor do que 0,15 mm. Plagioclásio está pouco presente como cristais subeuédricos disseminados e com geminação polissintética preservada, ou ainda na forma de um microliton, no qual aparece orientado segundo Sn-1 com geminação polissintética apagada e cristais menores de que 0,25 mm.

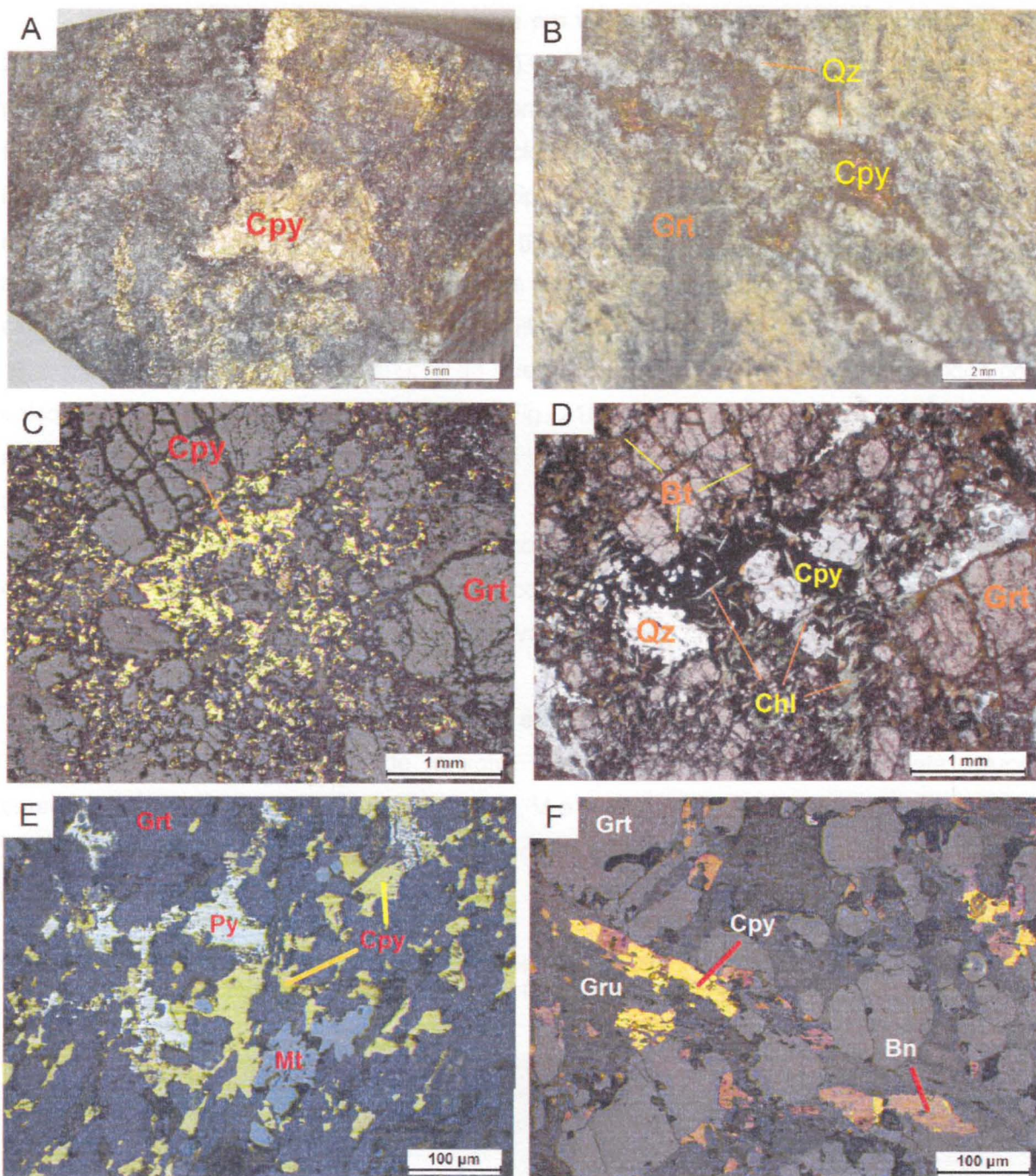


Figura 21: Fotografia (A e B) e fotomicrografias (C, D, E e F) representativas da tipologia de minério do grupo VII. A (FD45 222,52 m): vênulas de calcopirita (Cpy) em muscovita-biotita-quartzo-granada xisto. B (FD45 222,52 m): Vênulas de calcopirita manteadas por quartzo (Qz) cortando o xisto, com porfiroblasto cinza de granada (Grt). C (luz refletida) e D (luz transmitida com polarizadores descruzados) mostram a associação entre vênulas de calcopirita e quartzo + clorita, preenchendo os interstícios entre cristais de granada coalescente (FD04 234,67 m). E (FD04 234,67 m): vênulas de calcopirita e pirita (Py), com magnetita (Mt) subeuédrica e anedral associada (luz refletida). F (FD45 222,52 m): calcopirita intercrescida com bornita (Bn) substituindo a grunerita (Gru) ao longo de seus planos de clivagem. Calcopirita (Cpy), granada (Grt), quartzo (Qz), biotita (Bt), clorita (Chl), pirita (Py), magnetita (Mt), bornita (Bn), grunerita (Gru).

Cristais de allanita estão disseminados e por vezes englobam cristais de granada, enquanto monazita e apatita aparecem inclusas na grunerita.

Macroscopicamente, calcopirita ocorre em vênulas manteadas por quartzo fino (Fig. 21B), ou preenchendo fraturas (Fig. 21A). Microscopicamente, a calcopirita aparece principalmente disseminada, mas também como vênulas não interligadas. Pode ocorrer na forma de lamelas dentro de cristais de clorita, paralelas à foliação e muitas vezes intercrescida com pirita. Está associada, principalmente, às vênulas de biotita e de grunerita, podendo manter parcialmente cristais de granada, estar inclusa dentro de cristais de magnetita, ou aparecer na forma de lamelas paralelas à clivagem dentro de grunerita ou clorita. Além disso, cristais de clorita estão muito associados à calcopirita (Fig. 21C e 21D).

Cristais de bornita são menores do que 0,2 mm, e ocorrem tanto intercrescidos com calcopirita, quanto disseminados na rocha (Fig. 21F) e associados às vênulas de biotita e clorita. Pirita, subeuédrica e menor do que 0,6 mm, apresenta intercrescimento de calcopirita (Fig. 21E) ou é disseminada.

Magnetita também está presente, menor do que 0,25 mm, subeuédrica à euédrica, e disseminada. Por vezes há inclusões de calcopirita, que também aparece nas bordas dos cristais de magnetita (Fig. 21E). Pirita é observada cortando cristais de magnetita.

5.2 Assinatura isotópica de enxofre em sulfetos do depósito Furnas

As análises isotópicas de enxofre em sulfetos de cinco dos sete grupos caracterizados anteriormente (grupos I, II, IV, V e VI) foram obtidas nesse estudo (Quadro 2). Foram analisadas quatro amostras de bornita, duas de calcopirita e três de pirrotita (Quadro 2 e Fig. 22).

Quadro 2: Tabela de identificação da composição isotópica de enxofre dos sulfetos de diferentes tipologias de minério do depósito de cobre-ouro Furnas. Bn = bornita; Cpy = calcopirita; Py = pirita; Po = pirrotita.

| Amostra | Grupo | Descrição | Mineral | $\delta^{34}\text{S}_{\text{‰}} \text{ (V-CDT)}$ |
|---------------|-------|--|-------------|--|
| FD04/ 141,25 | I | Bn e Cpy em veio de quartzo/brecha | Bornita | -0,55 |
| FD45/272,45 | I | Bo e Cpy em veio de quartzo/brecha | Bornita | 0,82 |
| FD04/ 181,80 | II | Bn em biotita-anfibólio-clorita xisto | Bornita | 1,53 |
| FD21/ 214,70 | IV | Cpy e py em porções silicificadas de biotita-anfibólio-clorita xisto | Calcopirita | 3,37 |
| FD04/ 86,68 | IV | Cpy em biotita-anfibólio-clorita xisto | Calcopirita | 1,06 |
| FD91/ 344,22 | V | Bn disseminada em magnetitito | Bornita | 1,86 |
| FD02/ 285,04 | VI | Po e Cpy em biotita-quartzo-muscovita xisto | Pirrotita | -0,37 |
| FD39/ 186,00 | VI | Po e Cpy em biotita-quartzo-muscovita xisto | Pirrotita | 1,72 |
| FD002/ 256,62 | VI | Po e Cpy em biotita-quartzo-muscovita xisto | Pirrotita | 0,48 |

Os valores de $\delta^{34}\text{S}$ obtidos para o grupo I variam entre -0,55‰ e 0,82‰; 1,53‰ para o grupo II; 1,06‰ a 3,37‰ para o grupo IV; 1,86‰ para o grupo V e -0,37‰ e 1,72‰ para o grupo VI (Fig. 22). Os valores possuem um erro associado de 0,02‰ e a média dos valores de $\delta^{34}\text{S}$ do depósito é 0,98‰.

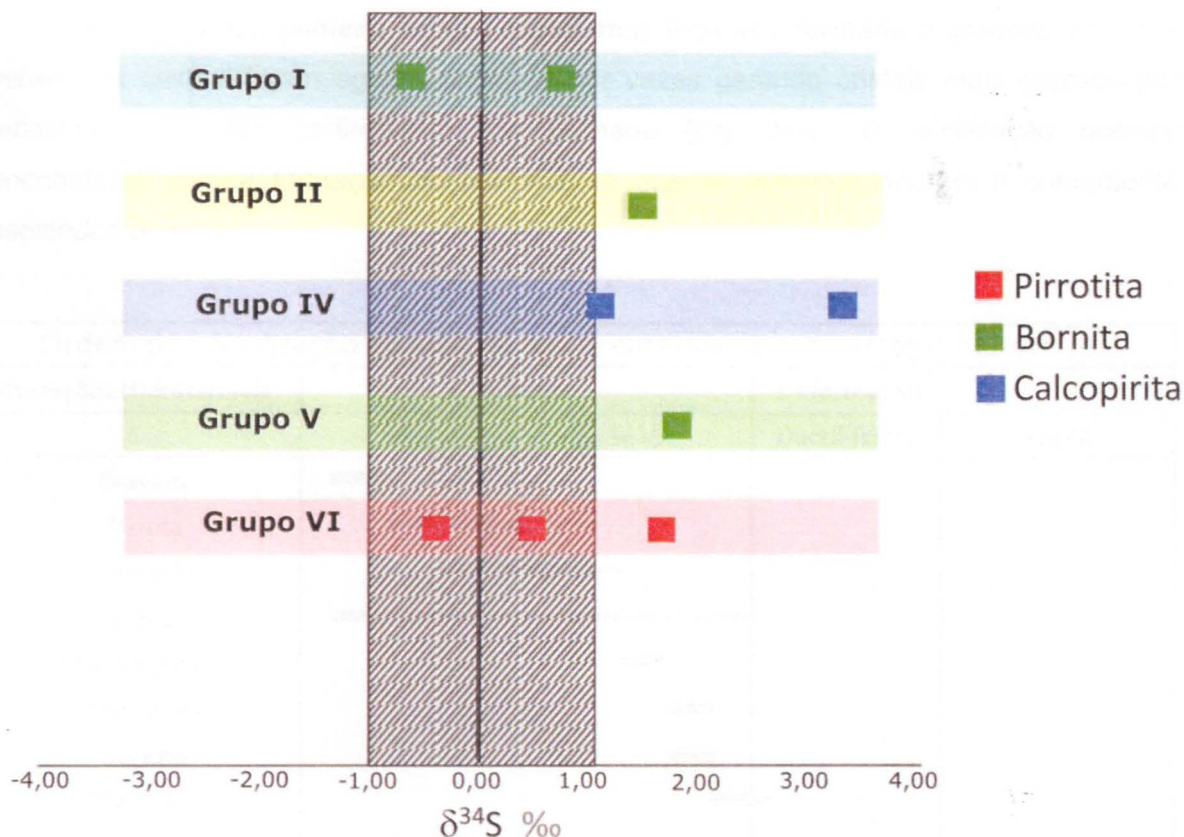


Figura 22: Composição isotópica de enxofre em pirrotita, bornita e calcopirita das tipologias de minério I, II, IV, V e VI do depósito de cobre-ouro Furnas. A área rachurada corresponde à composição isotópica de enxofre do manto.

6. DISCUSSÕES

6.1 Alterações hidrotermais e contexto estrutural

A partir das descrições macroscópica e petrográfica das amostras analisadas, foi possível distinguir nove estágios de alteração hidrotermal nas rochas hospedeiras da mineralização de cobre do depósito Furnas, bem como a caracterizar a deformação atuante durante a cristalização mineral característica de cada estágio (Fig. 23).

Foram identificadas duas foliações principais, por vezes definindo clivagem de crenulação ou xistosidades contínuas à espaçadas. Nas rochas metaluminosas, a foliação Sn é definida pela orientação de cristais de biotita ou pela associação entre biotita e muscovita e, mais raramente, por microlitons monominerálicos de albita alongada segundo a foliação. Já nos anfibolitos e nos magnetitos, a foliação é definida pela orientação de

hornblenda e hastingsita, por vezes grunerita, bem como por traços ou faixas de magnetita. Por vezes, vênulas de bornita, calcopirita e pirrotita ocorrem orientadas segundo a Sn.

A ordem de cristalização mineral das alterações hidrotermais é respectivamente: formação de granada coalescente (quando presente) juntamente com quartzo, biotita, grunerita, feldspato potássico, muscovita e/ou sericita, magnetita, sulfetação associada à albita e formação de clorita tardia e associada a vênulas de sulfeto.

Assim, em um primeiro estágio hidrotermal, teria sido formada a granada em finos cristais. Os cristais foram aglomerando-se, por vezes gerando cristais mais grossos por coalescência ou até porfiroblastos de granada (Fig. 24A). A silicificação ocorreu concomitante com a formação da granada, já que os minerais aparecem comumente associados (Fig. 24A).

| Ordem de cristalização do mineral representativo de cada estágio hidrotermal | | | | |
|--|----------|-------|---------------|--------|
| Alterações Hidrotermais | Foliação | | Deformação | |
| | Sn | Sn+1 | Dúctil-Rúptil | Rúptil |
| Granada | ———— | | | |
| Biotita | ————— | | | |
| Grunerita | ————— | | | |
| Quartzo | ————— | | | |
| Feldspato potássico | | ———— | | |
| Muscovita | | ———— | | |
| Sericita | | ———— | | |
| Magnetita | | ———— | | |
| Albita | | | | |
| Clorita | | | | |
| Pirita | | | | |
| Pirrotita | | | | |
| Calcopirita | | | | |
| Bornita | | | | |
| Calcosina | | | ———— | |
| Covelina | | | | |

Figura 23: Tabela de hierarquização das relações entre minerais de alterações hidrotermais e estruturas.

A fase de silicificação é caracterizada pela formação de veios de quartzo ou zonas silicificadas que cortam as rochas metaluminosas e os anfíbolitos. No primeiro caso as faixas de quartzo ocorrem orientadas segundo a foliação principal, por vezes ligeiramente dobradas. Nessas estruturas, o quartzo aparece com diversas feições de deformação dúctil, em diversas temperaturas. Em um primeiro estágio deformacional, o quartzo adquiriu lamelas de deformação (Fig. 24B) e contatos interlobados através de recristalização

dinâmica pelo processo de *Grain Border Migration (GBM)* (Passchier e Trouw, 2005), sugerindo silicificação em ambiente deformacional dúctil em temperaturas superiores à 520 °C (Faleiros *et al.* 2010). Conforme ocorreu o resfriamento do sistema, os cristais passaram a ter feições de deformação de temperaturas cada vez menores, que se sobrepoem aquelas de maior temperatura, tais como agregados de subgrãos sobrepostos em contatos interlobados, sugerindo deformação em temperatura entre 300 °C e 410 °C (Faleiros *et al.* 2010).

Logo após a formação de quartzo, ocorreu a cristalização de feldspato potássico, em geral associado a vênulas e veios de quartzo (Fig. 24C), por vezes na porção central desses. Biotita esverdeada foi formada em seguida, por vezes como traços minerais dentro de cristais de feldspato potássico. Além disso, essa ocorre também em contato transicional com uma biotita vermelha (fase provavelmente pertencente ao protólito), no qual a biotita vermelha apresenta tons gradualmente mais esverdeados em direção a contatos com veios hidrotermais compostos por quartzo, biotita, feldspato potássico e bornita.

Posteriormente, ocorreu o estágio de formação da grunerita segundo a foliação *S_n* e em vênulas, também paralelas à foliação principal (Fig. 24A). Os cristais de grunerita se amoldam aos aglomerados de granada e cortam as vênulas de biotita. Esse estágio de alteração hidrotermal também pode ser verificada nos anfibolitos na forma de *fronts* de alteração que provocam a substituição total ou apenas parcial da hornblenda a partir de suas bordas. Neste caso, a alteração está fortemente associada a vênulas de biotita, como verificado pela presença de halos de grunerita no entorno de bolsões preenchidos por sulfeto, ou ainda como uma alteração pervasiva nessas rochas.

O aparecimento da magnetita se deu pouco antes dos sulfetos, já que estão presentes inclusões de calcopirita e bornita dentro de porfiroblastos de magnetita, bem como vênulas de calcopirita cortando cristais do mineral de ferro. Além disso, o mineral em geral está orientado segundo a foliação (Fig. 24E) das rochas encaixantes, indicando que o mineral se cristalizou segundo os planos de foliação pré-existentes. Em uma amostra, percebe-se que a magnetita está alongada na direção de *S_n*, o que indica que o mineral é pré ou sin-cinemático à essa foliação.

A formação dos sulfetos ocorreu durante a fase de deformação dúctil, evidenciado principalmente por vênulas orientadas segundo a foliação principal e, em geral, englobando fragmentos do veio de quartzo (estes com cristais já deformados), cristais de biotita e/ou clorita. Além disso, as vênulas de sulfeto não possuem feições de brechação nas rochas encaixantes ou nos veios hidrotermais. Contemporâneo à sulfetação, houve a formação de albita hidrotermal, tanto nas bordas das concentrações de sulfetos, quando englobada por essas ou ainda na interface entre cristais de feldspato potássico e os sulfetos.

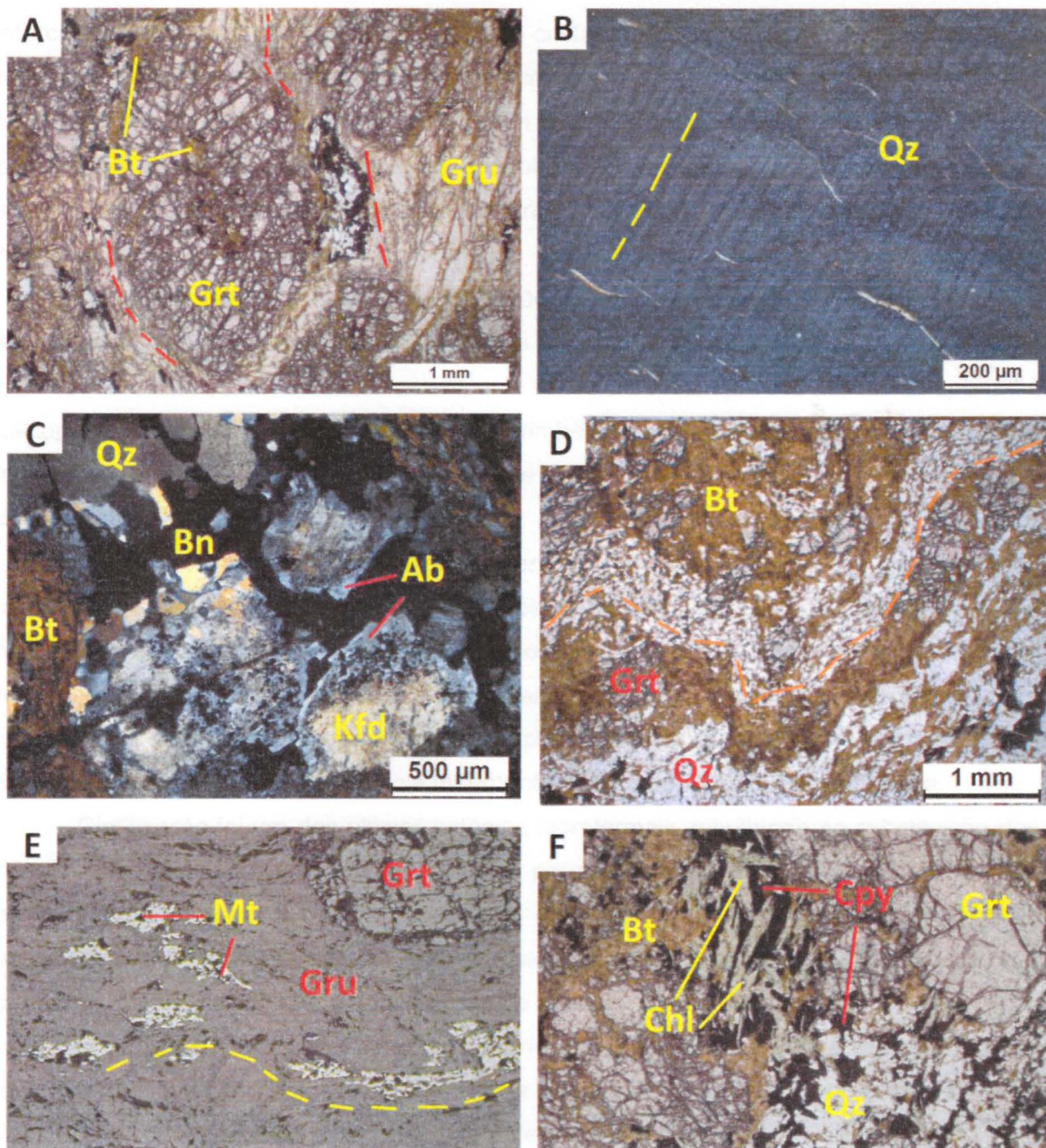


Figura 24: Fotomicrografias representativas das relações entre as fases de alteração hidrotermal. A (FD04 216,35 m): linhas tracejadas indicam direção de Sn. Nota-se que há um aglomerado de cristais de granada coalescentes orientados segundo a foliação, com vênulas de biotita preenchendo os interstícios entre os cristais. Vênulas de grunerita orientada segundo Sn amolda-se aos aglomerados e biotita não corta as estruturas. B (FD04 141,25 m): cristal de quartzo com lamelas de deformação na direção da linha tracejada. C (FD45 216,35 m): Cristais de feldspato potássico (Kfd) com aspecto turvo, englobados por bornita e com albita na interface com o sulfeto. D (Fd 45 220,62 m): foliação Sn marcada pela alternância entre faixas ricas em quartzo e faixas ricas em biotita, com granada associada. A imagem destaca através da linha traceja, a foliação Sn dobrada. E (FD02 234,67 m): magnetita estirada orientada segundo a Sn, destacada pela linha tracejada. F (Fd02 234,67 m): Clorita fortemente associada à calcopirita. Biotita (Bt), granada (Grt), grunerita (Gru), quartzo (Qz), bornita (Bn), albita (Ab), feldspato potássico (Kfd), magnetita (Mt), clorita (Chl).

No estágio de sulfetação, é possível estabelecer uma ordem de cristalização mineral, iniciada pelo aparecimento de pirita, seguida de pirrotita, calcopirita e bornita. Feições de

intercrescimento entre pirita e pirrotita indicam cristalização contemporânea das duas fases minerais. Entretanto, ocasionais cristais de pirita com bordas irregulares e corroídas nos contatos com pirrotita, bem como vênulas com cristais euédricos englobados parcialmente por calcopirita, são características que corroboram com a hipótese de que a fase de sulfetação iniciou-se com a precipitação de pirita pouco antes do aparecimento de pirrotita no sistema.

A relação temporal entre a cristalização de calcopirita e pirrotita não é clara nas amostras, porém ambas aparecem associadas ou intercrescidas, indicando que os sulfetos possuem cristalização no mínimo contemporânea. Já a bornita aparece associada apenas à calcopirita, geralmente intercrescida, mas também mantendo vênulas de calcopirita, indicando que a cristalização da calcopirita teve início pouco antes da bornita, mas perdurou durante a formação dessa.

No muscovita-biotita xisto, sericita altera o feldspato alcalino. Essa está presente tanto associada ao feldspato, quando em zonas de sericitização na interface entre os veios hidrotermais e as rochas encaixantes. Concomitante ou pouco depois da sericitização, houve ocasional formação de grafita, em uma amostra na qual o protólito provavelmente era rico em matéria orgânica. Essa se concentra principalmente na interface entre a alteração sericitica e a silicificação, bem como é fortemente associada a cristais de muscovita.

Cloritização foi um dos últimos estágios hidrotermais, resultando na substituição dos cristais de biotita por clorita. Clorita também preenche os interstícios entre aglomerados arredondados de sericita dentro de zonas de sericitização, ou ocorre como cristais associados a vênulas de sulfeto (bornita, calcopirita e pirrotita; Fig. 24F), podendo ser contemporânea à sulfetação ou mesmo ter sido iniciada pouco depois dessa.

O sequenciamento da cristalização mineral característica de cada fase hidrotermal indica uma mudança gradativa das condições físico-química do fluido, que torna-se cada vez mais frio com o avanço da evolução do sistema hidrotermal.

Além das alterações hidrotermais associadas a deformação dúctil, há aquelas fases tardias relacionadas a um regime rúptil, caracterizado por veios multicomposicionais que cortam as rochas metaluminosas, os anfibolitos e os magnetitos, bem como todas as fases hidrotermais citadas. Os veios podem ser preenchidos por carbonato e/ou estilpnomelano, epidoto em associação com feldspato potássico, sericita associada a albita e escapolita ou ainda por bornita ou calcopirita associadas a albita.

Assim, é possível sequencializar as fases de alteração hidrotermal da mais antiga para a mais recente: formação de granada, silicificação, alteração potássica (quartzo-feldspato potássico-biotita-sericita), alteração ferro-sódica (grunerita-albita-magnetita), sulfetação, cloritização e formação de veios multicomposicionais.

Durante o resfriamento do sistema, houve exsolução de calcosina na bornita, gerando um intercrescimento por vezes simplectítico entre os minerais. Além disso, um

segundo evento hidrotermal com precipitação de calcopirita associada a deformação essencialmente dútil é verificada através de crescimento de calcopirita acicular com eixo c perpendicular à fraturas que cortam vênulas de bornita. Por fim, o último evento hidrotermal foi caracterizado por substituição das bordas de calcosina e bornita por covelina, ou ao longo de fraturas nos minerais, indicando um aumento da fugacidade de oxigênio do sistema, decorrente da evolução de um mesmo fluido hidrotermal ou ainda da circulação de água meteórica.

6.2 Mineralização cupro-aurífera

As tipologias de minério foram agrupadas em sete grupos principais: sulfetos associados a veios de quartzo, sem reconhecimento da rocha hospedeira ou a rochas fortemente silicificadas (**grupo I**); bornita em vênulas hospedadas em biotita–anfibólio–clorita xistos (**grupo II**), bornita-(calcopirita) hospedada em biotita–clorita xistos (**grupo III**), calcopirita-(pirita) hospedada em biotita–anfibólio–clorita xistos (**grupo IV**), calcopirita ou bornita associadas à magnetita (**grupo V**), pirrotita hospedada em biotita–quartzo–muscovita xistos (**grupo VI**) e bornita-calcopirita hospedada em brecha (**grupo VII**).

Os estilos de mineralização consistem principalmente em veios, vênulas e bolsões que cortam as diferentes rochas hospedeiras em direções paralelas à foliação S_n ou ainda sem direção preferencial. Sulfetos disseminados aparecem em todas as tipologias.

A mineralização é composta, predominantemente, por bornita e calcopirita, e, subordinadamente, calcosina e covelina. Pirita e pirrotita aparecem associadas à mineralização principal.

Os sulfetos possuem associações recorrentes com outros minerais hidrotermais, em especial o quartzo e a magnetita, que aparecem em todos os grupos. Grunerita é comumente verificada nas bordas dos sulfetos, tanto como cristais aciculares, quanto prismáticos, associada à todos os grupos, exceto III e VI. Albita é encontrada associada às bordas de sulfetos nos grupos I, III, IV e VI, enquanto clorita é identificada, também nas bordas, nos grupos VI, VI e VII.

Elementos menores e terras raras (ETR) foram identificados nos grupos analisados por microscopia eletrônica de varredura com EDS acoplado. Associados à bornita do **grupo I**, há presença de V (rutilo); Ce e U (thorogumita e soddyita); Os, Ir, Th e U (thorogumita) e Y (soddyita). Já no **grupo IV**, calcopirita é encontrada em associação com Nd, La e Ce, presentes na bastnasita, e Co, encontrado na composição do sulfeto.

O **grupo VI** é o que apresenta maior variedade de elementos menores e ETR relacionados com o sulfeto (pirrotita). Pd aparece na composição de galena, Co e As em possível alloclasita ou glaucodoto, Te em faibankita, thorogumita e incluso em galena (neste caso, com Y e Pd), além de Y, Nd, Gd, Ir, Th e U na composição de thorogumita.

Em conjunto com a bornita do **grupo V**, foi verificada presença de Ce e La (monazita e bastnasita); Nd (monazita); Sr, Nb e W (ferberita/wolframita) e U (bastnasita), enquanto na calcopirita foram identificados Ag e Te (hessita); Sn (cassiterita) e Se (galena).

Ocasionalmente os sulfetos possuem associação com biotita verde e/ou clorita, bem como grunerita acicular nas bordas de vênulas e veios de sulfeto.

Jesus (2016) fez uma correlação entre perfis de sondagem dos furos 02, 04, 45 e 91, correlacionando profundidade com os litotipos que ocorrem no depósito, juntamente com os tipos de alteração hidrotermal e os estilos de mineralização (Fig. 27).

A partir disto, nesse estudo foram correlacionados os grupos das tipologias de minério aqui definidas com os estilos de mineralização caracterizados por Jesus (2016), bem como com o litotipo do depósito que hospeda cada grupo (Fig. 27).

Essa correlação mostrou que há uma boa correspondência entre os trabalhos, já que o grupo I ocorre nos furos de número 04 e 45 nas unidades dos xistos anfibolítico e aluminoso com zonas de silicificação, aparecendo em veios e vênulas. O grupo II foi reconhecido nos furos 45 e 91, em intervalos correspondentes ao xisto anfibolítico. Além disso, aparece como brechas (não verificado nesse estudo) e como vênulas e veios.

O grupo III ocorre nos perfis em profundidades correspondentes principalmente ao xisto aluminoso, correlato nesse estudo aos biotita-clorita xistos que hospedam a tipologia de minério, com bornita tanto disseminada (principal modo de ocorrência segundo Jesus, 2016), quanto em veios e vênulas.

A rocha hospedeira do grupo IV (anfibolitos) está correlacionada com o xisto anfibolítico representado nos furos 04 e 45, com o minério ocorrendo principalmente como veios e vênulas. Já as rochas hospedeiras do grupo V (verificado nos furos 91 e 04) são classificadas como magnetitos ou rochas com grande presença de magnetita, representadas no perfil como xisto aluminoso na zona de alteração da magnetita.

Por fim, os grupos VI e VII ocorrem em rochas correlatas ao xisto aluminoso como modo de ocorrência principal em veios e vênulas, bem como em disseminação, como verificado nesse trabalho.

6.3 Fontes de enxofre

Para a identificação da origem do enxofre necessário para a formação da mineralização cuproaurífera, é necessário considerar o fracionamento isotópico de enxofre entre sulfeto (espécie reduzida) e sulfato (espécie oxidada). Os fatores de fracionamento isotópico são controlados por temperatura e estado de oxidação do fluido: quanto menor o estado de oxidação (baixa fugacidade de oxigênio), menor o fracionamento isotópico. Assim, os valores de $\delta^{34}\text{S}$ nos sulfetos não refletem apenas a assinatura isotópica da fonte do fluido, mas também o fracionamento isotópico do enxofre entre diferentes espécies reduzidas e oxidadas formadas a partir dessa fonte.

A pirrotita é cristalizada em condições de pH neutro a ácido e baixa fugacidade de oxigênio (Fig. 25). Por essa razão, no instante de cristalização do sulfeto, o fracionamento isotópico entre a composição isotópica da fonte e do mineral é negligenciável. Isso decorre do fato de que, em condições de baixas de fO_2 , a formação simultânea e em equilíbrio de sulfeto e sulfato é improvável. Nessas condições é possível inferir que o $\delta^{34}S$ da pirrotita é muito similar ao valor de $\delta^{34}S$ da fonte do enxofre no fluido mineralizante. A Fig. 25 ilustra as relações entre as composições isotópicas de enxofre dos sulfetos e de barita formados em diferentes condições de pH e fO_2 a partir de uma fonte mantélica ou magmática ($\Sigma\delta^{34}S = 0\text{‰}$), mostrando que os valores de $\delta^{34}S$ em sulfetos podem ser extremamente variáveis mesmo quando formados a partir de uma mesma fonte de enxofre.

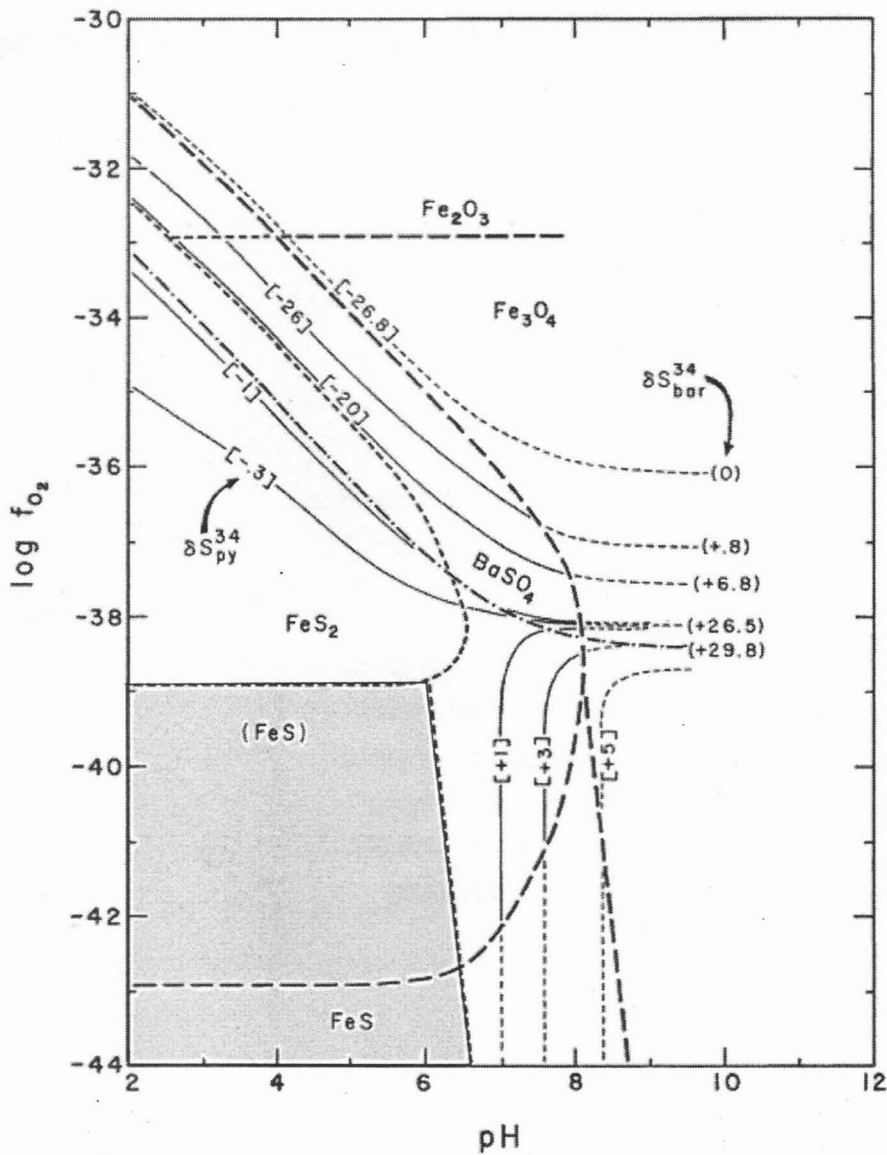


Figura 25. Comparação entre a posição dos contornos de $\delta^{34}S$ em relação aos campos de estabilidade do sistema Fe-S-O e barita a 250°C, considerando o valor de $\Sigma\delta^{34}S = 0\text{‰}$. Linhas sólidas: contornos de $\delta^{34}S$. (Ohmoto e Rye, 1974).

Assim, foram utilizados os valores de $\delta^{34}\text{S}_{\text{‰}}$ medidos na pirrotita para caracterizar a fonte do enxofre associado à formação dos sulfetos, em especial do Grupo VI. Comparando-se os valores obtidos e aqueles característicos de cada tipo de fonte de enxofre (Fig. 1), é possível concluir que o enxofre é proveniente, predominantemente, de fonte magmática, cuja composição isotópica característica é de 0‰. Isso pode apontar para a participação de enxofre presente em fluidos exsolvidos durante a cristalização de rochas ígneas da província ou de enxofre lixiviado das rochas ígneas por fluidos hidrotermais de outra origem. Além disso, valores mais elevados de $\delta^{34}\text{S}$ da pirrotita (até 1,72‰) pode sugerir neutralização do fluido mineralizante, inicialmente ácido e reduzido no estágio de formação dos sulfetos do Grupo VI.

A presença de magnetita em outros grupos aponta para condições um pouco mais oxidadas, contudo a presença de sulfatos não foi observada. Assim, é possível que também a composição isotópica de calcopirita e bornita sejam próximas à da fonte magmática de enxofre.

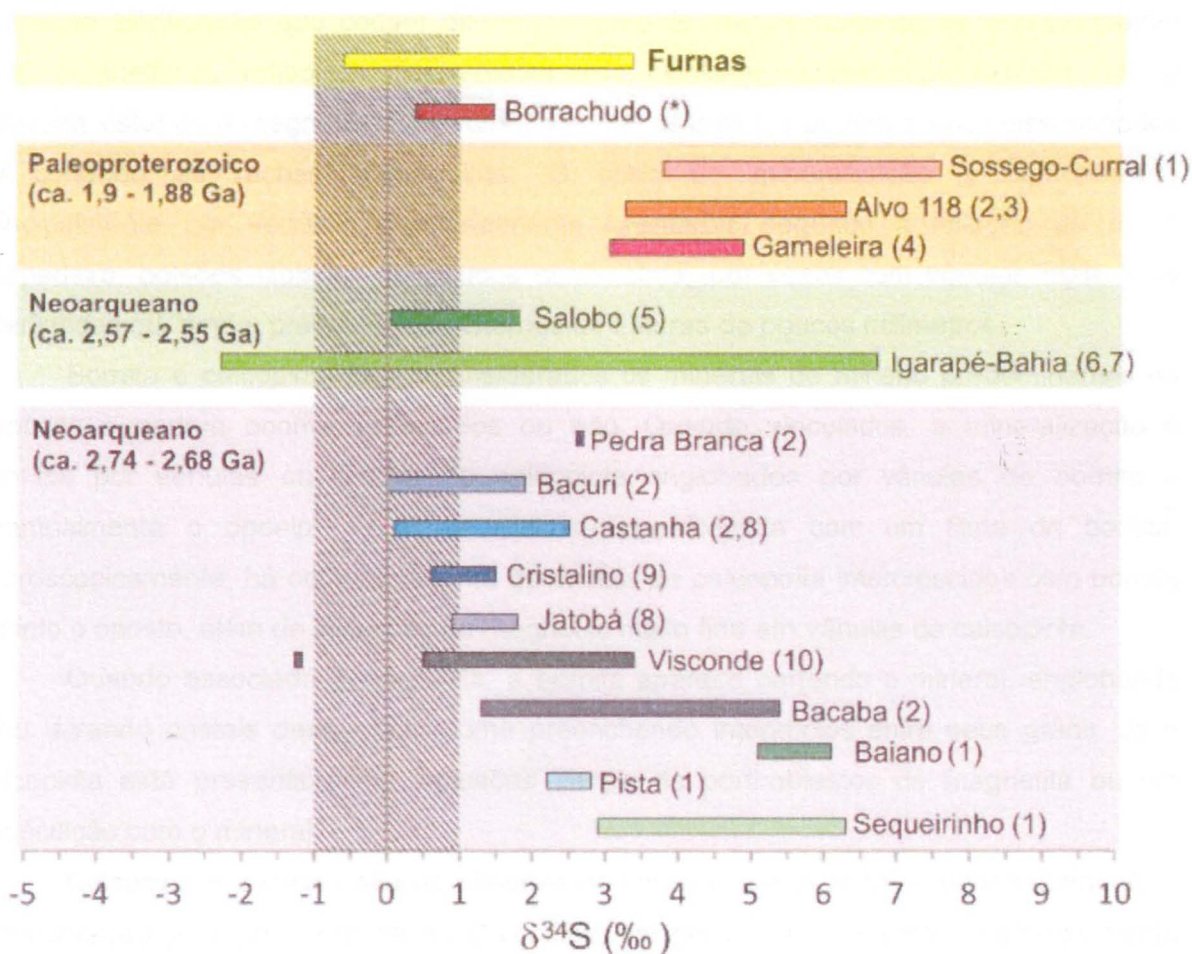


Figura 26. Composição dos isótopos de enxofre em depósitos do tipo IOCG da Província Carajás, com destaque para a assinatura do depósito Furnas. A área rachurada representa a composição do manto. (modificado de Previato, 2016).

Ao comparamos a assinatura isotópica de enxofre dos sulfetos do depósito Furnas com os demais depósitos IOCG de Carajás (Fig. 26), percebe-se que o intervalo de valores de $\delta^{34}\text{S}$ dos sulfetos do depósito estudado é similar à dos depósitos Salobo, Bacuri, Castanha, Visconde e Igarapé Bahia. Todos esses depósitos apresentam sobreposição dos valores de $\delta^{34}\text{S}$ de seus sulfetos com o campo do enxofre magmático com deslocamento para valores mais elevados de $\delta^{34}\text{S}$, apontando para variações em parâmetros físico-químicos (pH, por exemplo) ou participação de fontes de enxofre de outros reservatórios.

7. CONCLUSÕES

Descrições macroscópicas e microscópicas dos testemunhos de sondagem com maior expressividade de sulfetos permitiram identificar que o minério predominante no depósito Furnas é composto pelas paragêneses calcopirita-bornita, pirita-pirrotita-bornita-calcopirita e calcosina-covelina-calcopirita principalmente associadas à estruturas rúpteis e dúcteis-rúpteis (veios, vênulas e fraturas).

Em geral, calcopirita e bornita ocorrem fortemente associadas a veios de quartzo ou zonas de silicificação que cortam diferentes tipos de rochas hospedeiras (biotita-quartzito, magnetitos, anfíbolitos, clorita-biotita xisto, clorita-grunerita-turmalina-biotita xisto, e actinolita xisto) ou à magnetita. Subordinadamente, os sulfetos podem ocorrer disseminados ou cortando as rochas hospedeiras. O estilo de mineralização é caracterizado principalmente por vênulas, ocasionalmente orientadas segundo a foliação da rocha hospedeira, bolsões isolados de poucos centímetros, por vezes com vênulas mais finas interligadas ou, ainda, preenchendo sistemas de fraturas de poucos milímetros.

Bornita e calcopirita foram considerados os minerais de minério predominantes no depósito e podem ocorrer associados ou não. Quando vinculados, a mineralização é definida por vênulas ou cristais de calcopirita englobados por vênulas de bornita e eventualmente o oposto, ou ainda cristais de calcopirita com um filme de bornita. Microscopicamente, há ocorrência tanto de cristais de calcopirita intercrescidos com bornita quanto o oposto, além de inclusões de magnetita muito fina em vênulas de calcopirita.

Quando associada à magnetita, a bornita aparece cortando o mineral, englobando e/ou isolando cristais desse, bem como preenchendo interstícios entre seus grãos. Já a calcopirita está presente como inclusões dentro de porfiroblastos de magnetita ou em associação com o mineral.

Calcosina e covelina são os minerais de minério que ocorrem subordinadamente à mineralização principal do depósito. Calcosina, em geral, aparece como intercrescimento simplectítico com bornita, enquanto covelina aparece tanto substituindo bornita a partir de suas bordas ou preenchendo fraturas nesse mineral. Também substituiu ou é ainda intercrescida à calcosina.

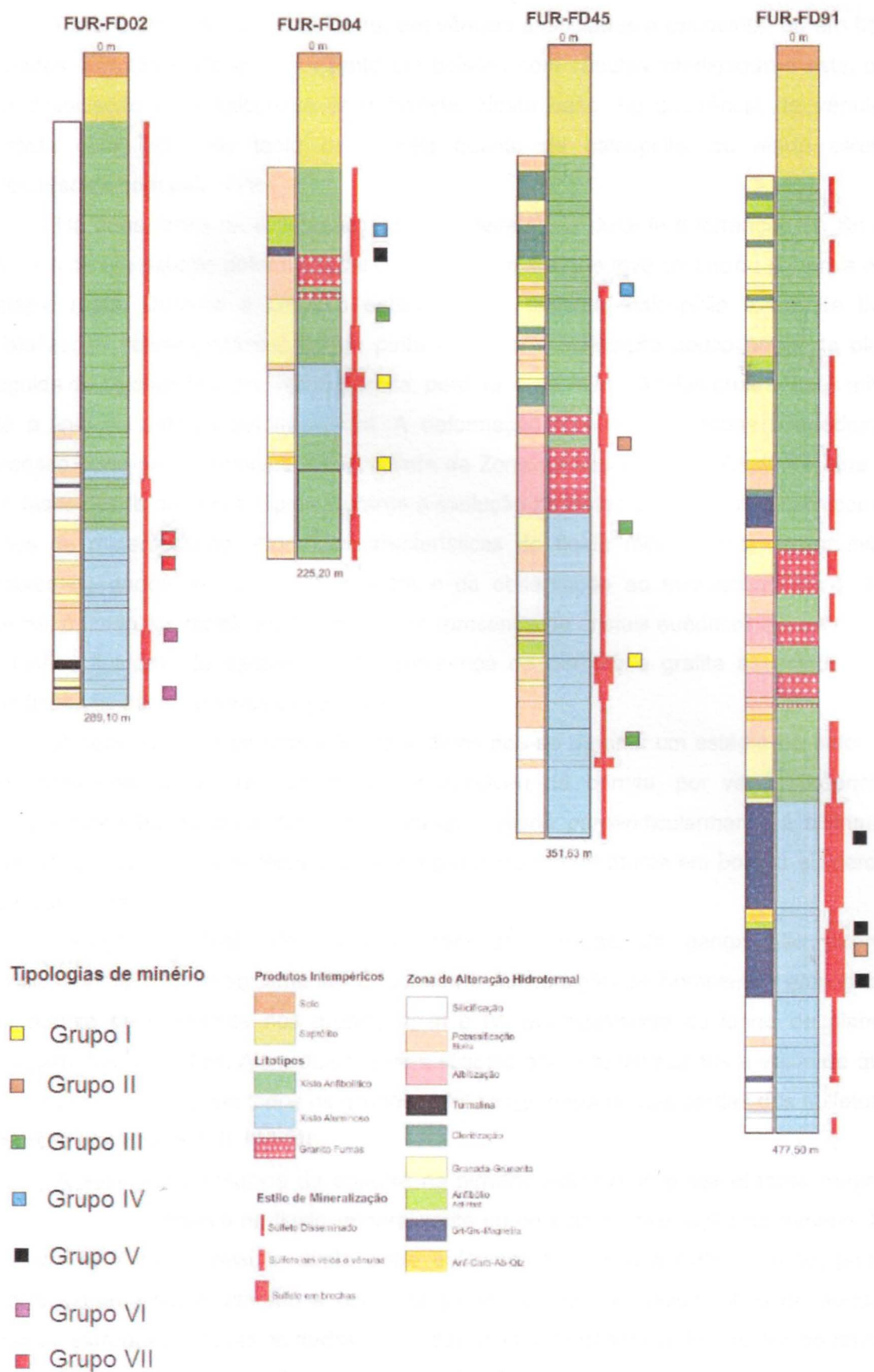


Figura 27: perfil dos furos de sondagem 02, 04, 45 e 91 da Vale no depósito de Furnas, correlacionando os litotipos principais do depósito com as zonas de alteração hidrotermal, o estilo de mineralização e a profundidade em que há ocorrência das tipologias do minério dos grupos I a VII descritos nesse trabalho (modificado de Jesus 2016).

Pirita é encontrada, geralmente, em vênulas associadas à calcopirita, ou em bolsões isolados. Pirrotita pode aparecer tanto em bolsões com vênulas interligadas à este, quanto em associação com calcopirita e/ou bornita. Neste caso, há ocorrência de vênulas de pirrotita com inclusões tanto de bornita quanto de calcopirita, ou ainda calcopirita intercrescida com calcopirita.

Há duas fases de sulfetação, uma que teve início durante a formação de Sn ou no começo de um estágio deformacional dúctil-rútil, e outra que teve cristalizado minerais em um estágio rútil. Durante o primeiro estágio, pirita, pirrotita, calcopirita e bornita tiveram cristalização contemporânea, porém pirita iniciou a cristalização pouco antes de pirrotita, seguida de calcopirita e por último bornita, perdurando a formação das quatro fases minerais até o final do estágio deformacional. A deformação atuante nas rochas hospedeiras do depósito pode ser proveniente da atividade da Zona de Cisalhamento Cinzento, que atuou em fases desde dúcteis a rúpteis durante a evolução do sistema hidrotermal, bem como nas fases de mineralização. Algumas características do fluido mineralizante foram inferidas através de dados isotópicos de enxofre e da observação ao microscópio de inclusões fluidas: o fluido foi inicialmente hipersalino (presença de cristais euédricos de sal dentro de inclusões fluidas), de caráter redutor (presença de pirrotita e grafita associada) e com condições ácidas (presença de pirrotita).

A segunda fase de formação de sulfetos deu-se durante um estágio de deformação essencialmente rútil, na qual calcosina exsolveu da bornita, por vezes preenchendo fraturas nas vênulas do sulfeto; pirita acicular cresce perpendicularmente à sistemas de fraturas que cortam os sulfetos e covelina preenche microfraturas em bornita e intercresce com calcosina.

Relações textuais dos sulfetos com os minerais de ganga são observadas principalmente microscopicamente. É comum a substituição de hornblenda e/ou grunerita por bornita ou calcopirita nos grupos II, III e IV, principalmente ao longo de planos de clivagem dos anfibólios. Além disso, esses sulfetos ocorrem associados a veios de quartzo ou zonas silicificadas em todos os grupos. Albita englobada ou nas bordas dos sulfetos está presente nos grupos I, II, IV e VI.

A assinatura isotópica de enxofre na pirrotita indica uma possível fonte magmática para o enxofre presente no fluido mineralizante ou no sítio de deposição do minério. Não é possível estabelecer relação direta entre o Granito Furnas e a mineralização, pois este ocorre extremamente alterado e como pequenas lentes nos testemunhos de sondagem, além da extrema escassez de dados e estudos acerca da gênese e do protólito do granito.

Calcopirita pode ser observada cortando cristais euédricos de scheelita ou associada à ferberita/wolframita, enquanto bornita é verificada com raras microinclusões de cassiterita. Como o tungstênio e o estanho apresentam afinidade com granitos do tipo A, sua presença sugere que a mineralização possui algum tipo de associação com o granito Cigano,

considerado por Santos (2014) como um plúton granítico anarogênico com idade U-Pb em zircão de 1.883 ± 2 Ma.

Adicionalmente, foram reportados pela primeira vez nesse estudo, a presença no depósito Furnas de rutilo com vanádio associado à magnetita, fases minerais portadoras de U-Th-ETR, tais como thorogumita, soddyita e curita e minerais com Co-As (allocclasita ou glaucodoto). Em especial, a notável presença de irídio e ósmio na thorogumita merece investigações futuras aprofundadas.

O conjunto de dados obtidos nesse estudo indica uma evolução complexa para o sistema hidrotermal responsável pela gênese do depósito Furnas, resultando em assinatura química que inclui uma diversidade de elementos traços (ETR, U, Th, Sn, W, Pb, Co, Pd, Ir, Os) que não pode ser associada à filiação de um único magma. Isso sugere que, além do papel dos granitos, ainda a ser melhor investigado, mecanismos de interação fluido-rocha, envolvendo inclusive rochas (meta)ultramáficas, podem ter exercido importante papel para a gênese do depósito.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DOCEGEO (1988). Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. 35º Congresso Brasileiro de Geologia, 11-54. Belém: SBG.
- Faleiros, F. M., Campanha, G. A. C., Bello, R. M. S., Fuzikawa, K. (2010). Quartz recrystallization regimes, c-axis texture transitions and fluid inclusion reequilibration in a prograde greenschist to amphibolite facies mylonite zone (Ribeira Shear Zone, SE Brazil). *Tectonophysics*, 480, 193-214.
- Faure, G., Mensing, T. M. (2004). *Isotopes: Principles and applications*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.(3).
- Feio, G. R. L., Dall'Agnol, R., Dantas, E. L., Macambira, M. J. B., Gomes, A. C. B., Sardinha, A. S., Oliveira, D. C., Santos, R. D., Santos, P. A. (2012). Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoarchean Planalto Granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites?. *Lithos*, 151, 57-73.
- Figueiredo, B. R. (2010). *Minérios e ambientes*. Campinas: Editora UNICAMP.
- Goldhaber, M. B., Ohmoto, H. (1997). Sulfur and Carbon Isotopes. In: Barnes, H. L. (Org.) *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.(3).
- Heyl, A. V., Landis, G. P., Zatman, R. E. (1974). Isotopic Evidence for the Origin of Mississippi Valley-Type Mineral Deposits: A Review. *Economic Geology*, 69 (6), 992-1006.
- Hirata, W. K., Rigon, J. C., Kadekaru, K., Cordeiro, A. A. C., Meireles, E. A. (1982). Geologia Regional da Província Mineral de Carajás. *Simpósio de Geologia da Amazônia*, v. 1, 100-110. Belém: SBG/Núcleo Norte.
- Hoefs, J. (2009) Variations of Stable Isotopes Ratio in Nature. *Stable Isotope Geochemistry*, 93-227
- Iguma, B. (2015). *Distribuição das zonas de alteração hidrotermal e do minério cuprífero do depósito Furnas, Província Mineral de Carajás, Pará*. Monografia (Trabalho de Formatura). São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Jesus, S. S. G. P. (2015). *Paragênese e distribuição das zonas de alteração hidrotermal do depósito de cobre-ouro de Furnas, Província Mineral de Carajás*. Qualificação de Mestrado. Não publicado. Universidade de São Paulo.
- Jesus, S. S. G. P. (2016). *Múltiplos estágios de alteração hidrotermal do depósito de óxidos de ferro-cobre-ouro Furnas, Província Carajás: evolução paragenética e química mineral*. Tese de Mestrado. Inédito. Universidade de São Paulo.
- Machado, N., Lindenmayer, D.H., Krough, T.E., Lindenmayer, Z.G. (1991). U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49(3-4), 329-354.

- Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Filho, C. R. S., Moreto, C. P. N. (2014). Metalogenia da Província Carajás. In: Silva, M. G., Neto, M. B. C., Jost, H., Kuyumjian, R. M. (Org.), *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, 43-92. CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Hitzman, M. W., Juliani, C., de Souza Filho, C. R., Carvalho, E. R. (2008). Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 34 (3), 317-336.
- Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Souza Filho, C. R., Moreto, C. P. N. (2014). Metalogenia da Província Carajás. In: Silva, M. G., Neto, M. B. C., Jost, H., Kuyumjian, R. M. (Org.), *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, 43-92. CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Moreto, C. P. N., Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Amaral, W. S., Santos, T. J. S., Juliani, C., de Souza Filho, C. R. (2011). Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications. *Mineralium Deposita*, 46, 789-811, DOI 10.1007/s00126-011-0352-9.
- Previato, M. (2016). *Evolução paragenética e regime de fluidos hidrotermais no sistema mineral Borrachudo: implicações para a metalogênese de cobre na Província Carajás*. Tese de Mestrado. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Oliveira, E. P., Tarney, J. (1994). Genesis of the Precambrian copper-rich Caraíba hypersthenite-norite complex, Brazil. *Mineralium Deposita*, 30 (5), 351-373.
- Ohmoto, H. (1972). Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. *Economic Geology*, 67 (5), 551-578.
- Ohmoto, H. (1986). Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16, 1, 491-559.
- Ohmoto, H., Rye, R. O. (1974). Sulfur and Carbon Isotopes and Ore Genesis: A Review. *Economic Geology*, 69, 826-842.
- Passchier, C. W., Trouw, R. A. J. (2005). *Microtectonics*. Estados Unidos: Springer (2).
- Sakai, H. (1968). Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes. *Geochemistry Journal*, 2, 29-49.
- Santos, J.O.S. (2003). Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. In: Bizzi, L.A. (Ed.). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília: CPRM, IV, 169-226.
- Santos, M. H. L. (2014). *Interpretação, inversão 3D de dados magnéticos e modelagem 3D da susceptibilidade magnética medida, aplicadas à prospecção geofísica de depósitos de óxidos de ferro-cobre-ouro (IOCG iron oxide-copper-gold) – Província Mineral de Carajás, Brasil*. Tese (Doutorado). Brasília: Universidade de Brasília.

- Tassinari, C. C. G., Macambira, M. J. B. (2004). A evolução tectônica do Cráton Amazônico. 04. In: V. Mantesso Neto, A., Bartorelli, C. D. R., Carneiro, B. B., de Brito Neves. (Org.) *Geologia do continente Sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (v. 1, 471-485). São Paulo: Beca.
- Vasquez, M. L., Rosa-Costa, L. T. (Org.). (2008). *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de informações Geográficas – SIG: Texto explicativo dos mapas geológicos e de recursos minerais do Estado do Pará: Escala 1:1.000.000*. Programa Geologia do Brasil. Belém: CPRM/CIAMA-PA.
- Xavier, R. P., Monteiro, L. V. S., Moreto, C. P. N., Pestilho, A. L. S., Melo, G. H. C., Delinardo, M. A. S., Aires, B., Ribeiro, C., Freitas, F. H. S. (2012). The Iron Oxide Copper-Gold Systems of the Carajás Mineral Province, Brazil. *Society of Economic Geologists, Inc. Special Publication 16*, 000–000.

