

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Caracterização das zonas de alteração hidrotermal do setor NW do depósito de
cobre-ouro Furnas, Província Mineral de Carajás**

Monografia de Trabalho de Formatura

TF 18/01

Aluna: Aghata Zarelli Viana

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Lena Virgínia Soares Monteiro

São Paulo, SP

2018

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Caracterização das zonas de alteração hidrotermal do setor NW do depósito de
cobre-ouro Furnas, Província Mineral de Carajás**

Aghata Zarelli Viana

Lena Virgínia Soares Monteiro

São Paulo, SP
2018

*“The cave you fear to enter
holds the treasure that you seek.”*

Joseph Campbell

Agradecimentos

Dedico esta monografia e agradeço humildemente aos meus pais que sempre me apoiaram em todas as minhas escolhas, sempre acreditaram no meu potencial e mesmo com as dificuldades sempre me ajudaram a atingir meus objetivos.

Agradeço a professora Lena, que além de ótima profissional é uma ótima pessoa. Sou grata pela oportunidade de aprendizado, pela imensa paciência e dedicação ao longo desse ano, sempre disposta a discutir e resolver minhas dúvidas. Sou muito grata por ter tido a oportunidade de conhecer Carajás e um pouco da Vale, uma experiência enriquecedora, que me trouxe colegas e amigos da UNICAMP.

Agradeço as minhas companheiras de pesquisa e de aventuras Chica e Come, que contribuíram com muitas risadas, além de ideias e sugestões para a elaboração desse trabalho. Em especial agradeço a Ju, Tutu e Caloi que compartilharam muitos momentos de risadas, “alegria”, constrangimento, sufoco e perrengues, ao longo desses 5 anos e espero que essa amizade dure muitos anos mais.

Com muito amor agradeço a melhor subpanela da 57, que se tornou a minha família ao longo desses anos, em especial ao Tom, Indy, Cro, Gretchen, Mama, Fê, Pin, Chuka, Madre, Sacolé e Carioca, e a Porkinha, a agregada mais fofa. Ao GGeo, minha segunda família, que forneceu as melhores experiências da minha vida, conhecendo lugares e pessoas incríveis. Agradeço pelo apoio e amizade a Kiwi, Lilo, Sisu, Nit, Waze, Rico, Menos, Ed, Kibe, Paul, Rejeito, Wolverine, Chokito (Psor), aos amigos da UNESP, Nikiti, Aleluia e ao Egric.

Não poderia esquecer as gatas do vôlei geo, com quem compartilhei momentos de emoção e nervoso em muitos campeonatos e BIFs, Gari, Che, Baby, Intru, Tati, Dama, Brenda, Dana, todos os técnicos, Aline, Holanda, Edu, Denis, Portuga e principalmente a geopsico.

Por fim agradeço a todos os professores, desde a escola até a faculdade que contribuíram com toda paciência e conhecimento, em especial o professor Gergely que me ajudou muito tirando minhas inúmeras dúvidas, aos professores Boggiani e Ivo que compartilharam comigo seu conhecimento e amor por cavernas e ao Fofona que além de me ajudar com dúvidas, me ajudou com as crises de graduação, sempre fornecendo cafés e boas risadas. Agradeço aos motoristas, Bira, Adriano e Marciano que sempre nos conduziram com segurança e bom humor e aos funcionários, desde a limpeza até a segurança, que ajudaram a pensar no lgc como minha segunda casa.

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. <i>Pesquisa Bibliográfica</i>	4
3.2.2. <i>Trabalho de campo</i>	5
3.2.3. <i>Petrografia em luz transmitida e refletida</i>	5
3.2.4. <i>Microscopia Eletrônica de Varredura</i>	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
4.1. Província Carajás	5
5. RESULTADOS	8
5.1. Contexto Geológico do depósito de Cu–Au Furnas.....	8
5.2. Caracterização Petrográfica dos Litotipos do Depósito Furnas.....	12
5.2.1. Setor SE.....	12
i) <i>Clorita-(Granada)-Anfibólio-Biotita Xisto</i>	12
ii) <i>Hastingsito</i>	14
iii) <i>Clorita-grunerita xisto</i>	16
iv) <i>Granada-Biotita xisto</i>	17
v) <i>Granada-Grunerita xisto</i>	19
vi) <i>Granito Furnas</i>	21
vii) <i>Andalusita-Biotita-Muscovita xisto</i>	23
5.2.2. Setor NW	25
i) <i>Quartzito a quartzo milonito</i>	25
ii) <i>Biotita-Muscovita- Epidoto xisto</i>	27
iii) <i>Rocha Calciossilicática</i>	29
iv) <i>Clorita-Biotita-(Granada) xisto</i>	31
v) <i>Biotita-Anfibólio xisto</i>	34
vi) <i>Formação Ferrífera Bandada (BIF)</i>	36
vii) <i>Granito Furnas</i>	39
5.3. Caracterização da Alteração Hidrotermal e Evolução Paragenética.....	41
5.3.1. Setor SE.....	41
a) <i>Alteração Sódica (albitização)</i>	42

b)	<i>Silicificação</i>	42
c)	<i>Alteração Potássica (Biotita)</i>	42
d)	<i>Formação de Turmalina</i>	43
e)	<i>Cristalização da Granada</i>	43
f)	<i>Alteração Sódico-Cálcica</i>	43
g)	<i>Enriquecimento em ferro</i>	44
h)	<i>Cloritização</i>	44
5.3.2.	<i>Setor NW</i>	47
a)	<i>Silicificação</i>	47
b)	<i>Alteração Sódica (Albitização)</i>	48
c)	<i>Alteração Hidrolítica</i>	48
d)	<i>Cristalização de Granada</i>	49
e)	<i>Alteração Sódico-Cálcica</i>	49
f)	<i>Formação de Turmalina</i>	50
g)	<i>Alteração Potássica</i>	50
h)	<i>Formação de Apatita</i>	50
i)	<i>Enriquecimento em Ferro</i>	51
j)	<i>Alteração Carbonática</i>	51
k)	<i>Cloritização</i>	52
l)	<i>Epidotização</i>	52
5.4.	<i>Mineralização de cobre e ouro</i>	54
5.5.	<i>Aspectos estruturais</i>	57
5.6.	<i>Relação espacial entre litotipos e alterações hidrotermais</i>	62
6.	<i>DISCUSSÕES</i>	64
6.1.	<i>Natureza dos protólitos</i>	64
6.2.	<i>Alteração hidrotermal</i>	66
6.3.	<i>Mineralização de Cobre e Ouro</i>	67
7.	<i>CONCLUSÕES</i>	68
8.	<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	70

Índice de Figuras

Figura 1. *Principais províncias geotectônicas Neoproterozoicas da América do Sul, com ênfase no Cráton Amazônico e suas províncias. O Cráton São Francisco, os fragmentos cratônicos São Luís e Luís Alves, assim como os orógenos Neoproterozoico Brasília/Pan-Africano estão indicados no leste da figura. Estes cinturões tratam-se da província Borborema (B) no nordeste do Brasil, a província Tocantins (T) na região central e a província Mantiqueira (M) a leste e sudeste do Brasil. Adaptado de Cordani et al. (2000).* .6

Figura 2. (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 dos depósitos minerais. O retângulo amarelo apresenta a área de ocorrência do depósito Furnas.*9

Figura 3. *Mapa geológico e das zonas de alteração hidrotermal da porção sudeste do depósito de cobre-ouro de Furnas (Modificado de Iguma, 2015; Jesus, 2016)*.....10

Figura 4. *Seção geológica-tipo do Depósito Furnas, mostrando a distribuição das zonas de alteração hidrotermal do setor SE do depósito (Jesus, 2016; Alves, 2016).*11

Figura 5. *Seção geológica-tipo do Depósito Furnas, mostrando a distribuição das zonas de alteração hidrotermal do setor NW do depósito. (Modificado de Vale, 2010).*.....11

Figura 6. Aspectos macroscópicos do clorita-(granada)-anfíbólio-biotita xisto. (A) Foliação do clorita-(granada)-anfíbólio-biotita xisto marcada pela orientação de biotita e anfibólios, e porfiroblastos de granada. (B) Porfiroblastos de granada e hastingsita em matriz constituída por clorita, biotita e anfibólio, com lentes deformadas de quartzo. (C) Porfiroblastos de escapolita em uma matriz foliada definida pela orientação de biotita e anfibólios. (D) Foliação crenulada definida pela orientação de biotita e anfibólios, com lentes de quartzo intercaladas. Aspectos microscópicos do clorita-(granada)-anfíbólio-biotita xisto em luz polarizada transmitida. (E) Porfiroblasto de hastingsita com bordas substituídas por grunerita em meio a uma matriz composta por biotita com inclusões de monazita e cristais de magnetita orientados (PD). (F) *Front* de grunerita em meio a uma matriz composta por biotita parcialmente cloritizada (PD). (G) Porfiroblasto de granada com inclusões orientadas de quartzo e magnetita em uma matriz composta por biotita e hastingsita (PD). (H) Cristais de turmalina, biotita e magnetita orientados segundo a foliação S_{n+1} (PD). Abreviações: Bt = biotita, Grt = granada, Mt = magnetita, Mnz = monazita, Qtz = quartzo, Gru = grunerita, Hst = hastingsita, Tur = turmalina, PD = polarizadores descruzados.....13

Figura 7. Aspectos macroscópicos do hastingsito. (A) Porfiroblastos de hastingsita em meio a uma matriz composta por biotita e grunerita. (B) Porfiroblastos prismáticos de hastingsita em meio a uma matriz composta por biotita e clorita. (C) Porfiroblastos prismáticos de hastingsita em meio a uma matriz composta por intercalações entre bandas

de biotita e clorita e bandas de quartzo. (D) Porfiroblastos prismáticos de hastingsita em meio a uma matriz composta por biotita e clorita. Aspectos microscópicos do hastingsito em luz polarizada transmitida. (E) Inclusões orientadas de quartzo, monazita e magnetita em porfiroblastos de hastingsita (PD). (F) Porfiroblastos de hastingsita com porções substituídas por grunerita, disposto de forma fibrorradiada (PD). (G) Porfiroblastos de hastingsita em meio a um *front* de biotita (PD). (H) *Front* de grunerita substituindo bordas de porfiroblastos de hastingsita (PD). Abreviações: Bt = biotita, Qtz = quartzo, Gru = grunerita, Has = hastingsita, Mt = magnetita, Mnz = monazita, PD = polarizadores descruzados.....15

Figura 8. Aspectos macroscópicos do clorita-grunerita xisto. (A) Porfiroblastos de magnetita em meio à matriz composta por grunerita e clorita. Aspectos microscópicos do clorita-grunerita xisto em luz polarizada transmitida. (B) Matriz composta por bandas de grunerita e bandas de clorita com cristais de magnetita orientados (PD). (C) Cristais de grunerita decussados, com cristais tardios discordantes a foliação e *front* de clorita (PC). (D) Bolsão de quartzo em meio a uma matriz composta por clorita e grunerita (PC). (E) Bolsão de quartzo envolto por um *front* de grunerita apresentando cristais aciculares crescendo em direção ao centro do bolsão (PC). Abreviações: Qtz = quartzo, Gru = grunerita, Chl = clorita, Mt = magnetita, PC = polarizadores cruzados, PD = polarizadores descruzados.....17

Figura 9. Aspectos macroscópicos do granada-biotita xisto. (A) Porfiroblastos de granada coalescente em uma matriz composta por biotita. (B) Porfiroblastos de granada em uma matriz de biotita e *fronts* de clorita. (C) *Front* de biotita associado a silicificação envolvendo porfiroblastos de granada. (D) Porfiroblastos de granada coalescente em uma matriz de biotita cortada por uma zona de silicificação. Aspectos microscópicos do granada-biotita xisto em luz polarizada transmitida. (E) Porfiroblastos de granada em uma matriz com lentes de quartzo dobradas e intercaladas a lentes de biotita (PC). (F) *Front* de biotita envolvendo aglomerados de cristais de granada estirados segundo a foliação principal (PD). (G) Porfiroblasto de granada com fraturas preenchidas por clorita em meio a uma matriz composta por biotita e quartzo com bornita associada as zonas ricas em quartzo (PD). (H) Bornita xenomórfica associada a zonas ricas em quartzo e a cristais de clorita, cortando a matriz composta por biotita e porfiroblastos de granada (PD). Abreviações: Qtz = quartzo, Grt = granada, Chl = clorita, Bt = biotita, Bn = bornita, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.18

Figura 10. Aspectos macroscópicos do granada-grunerita xisto. (A) Porfiroblastos de granada em uma matriz composta por intercalações entre bandas de biotita e clorita e bandas compostas por grunerita. (B) Foliação definida por lentes de grunerita e porfiroblastos de granada estirada intercalados com lentes de biotita. (C) Porfiroblastos de granada estirados ao longo da foliação definida pela orientação de cristais de grunerita e um *front* de biotita concordante com a foliação. (D) Porfiroblastos de granada em uma matriz foliada definida pela intercalação entre lentes de grunerita e lentes de biotita. Aspectos

microscópicos do granada-grunerita xisto em luz polarizada transmitida. (E) Foliação definida por cristais de grunerita anastomosada e amoldada em torno de porfiroblastos de granada (PC). (F) Matriz composta por cristais prismáticos de grunerita e aglomerados de granada em meio a um *front* de biotita (PD). (G) Porfiroblastos de granada em meio a uma matriz composta por grunerita, biotita e cristais idioblásticos de magnetita, com cristais de biotita parcialmente substituídos por clorita (PD). (H) Matriz composta predominantemente por aglomerados de granada com fronts de grunerita parcialmente substituída por biotita (PD). Abreviações: Gru = grunerita, Grt = granada, Bt = biotita, Mt = magnetita, Qtz = quartzo, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.....20

Figura 11. Aspectos macroscópicos do Granito Furnas. (A) Alteração potássica com formação de biotita em veios e pervasiva na matriz. (B) Alteração pervasiva do Granito Furnas com a sericitização do feldspato ígneo e alteração potássica em veios e pervasiva na matriz. (C) Veios discordantes de quartzo leitoso, *infills* de biotita e albitização de origem hidrotermal. (D) Alteração pervasiva do Granito Furnas devido a formação de biotita e calcopirita disseminada na matriz. Aspectos Microscópicos do Granito Furnas em luz polarizada transmitida. (E) Porfiroclasto de albita ígnea sericitizada, com geminação apagada e *front* de hastingsita (PC). (F) Matriz do Granito Furnas alterada e deformada, com quartzo com migração de borda de grão e extinção ondulante e cristais de albita sericitizados (PC). (G) Front de grunerita substituindo a matriz do Granito Furnas (PC). (H) Alteração sódic-cálcica da matriz com formação de hastingsita e cristais de albita sericitizados (PC). Abreviações: Gru = grunerita, Qtz = quartzo, Alb = Albita, Bt = biotita, Ser = sericita, Hst = hastingsita, Cpy = calcopirita, PC = polarizadores cruzados.....22

Figura 12. Aspectos macroscópicos do andalusita-muscovita-biotita xisto. (A) Foliação milonítica definida por bitoita e muscovita. (B) Porfiroblastos de granada e andalusita em meio a uma matriz composta por biotita e muscovita. (C) Porfiroblastos de andalusita com bordas substituídas por biotita. (D) Bornita em veios cortando a matriz concordante a foliação principal associada a zonas de silicificação. Aspectos microscópicos do andalusita-muscovita-biotita xisto em luz polarizada transmitida. (E) Foliação crenulada em vermelho, com formação de clivagem de crenulação (S_{n+2}) em amarelo (PC). (F) Lente de quartzo deformada segundo a foliação (PC). (G) Porfiroblastos de andalusita de coloração branca em uma matriz composta por muscovita, biotita e quartzo (PD). (H) Porfiroblasto de andalusita com bordas alteradas para muscovita e biotita e porfiroblastos de granada em uma matriz composta por biotita (PC). Abreviações: And = andalusita, Ms = muscovita, Bt = biotita, Bn = Bornita, Grt = granada, PC = polarizadores cruzados, PD = polarizadores descruzados.....24

Figura 13. Aspectos macroscópicos do quartzito a quartzito milonito. (A) Óxidos de manganês e limonita marcando os planos da foliação e de fraturas discordantes. (B) Brechas hidrotermais com preenchimento de limonita. (C) Veio de quartzo leitoso

discordante da foliação do quartzito com precipitação de limonita no contato entre o veio e a rocha encaixante. (D) Drusas de quartzo piramidal em meio a veios de quartzo leitoso discordantes a foliação do quartzito. Aspectos microscópicos do quartzito a quartzo milonito. (E) Foliação anastomosada marcada por cristais de biotita e clorita (PD). (F) Cristais de epidoto xenoblástico em meio a foliação definida por biotita e lentes de quartzo e feldspato (PD). (G) Variação da granulometria do quartzo e feldspato de uma banda em relação a outra (PC). (H) Cristais de albita associados aos aglomerados de epidoto (PC). Abreviações: Qtz = quartzo, Lm = limonita, Ep = epidoto, Alb = albita, Bt = biotita, Chl = clorita, Fds = feldspato, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.26

Figura 14. Aspectos macroscópicos do anfibólio-biotita-sericita xisto. (A) Foliação anastomosada definida por muscovita e biotita e veio discordante de albita com hematita associada. (B) Matriz foliada definida por muscovita e bioita com calcopirita disseminada. Aspectos microscópicos do anfibólio-biotita-sericita xisto em luz polarizada transmitida. (C) Foliação milonítica com formação de pares S/C (planos S em vermelho e C em amarelo) definidos por muscovita e biotita (PC). (D) Matriz composta por cristais de quartzo, muscovita, biotita, clinozoisita e aglomerados de apatita. Substituição de cristais de biotita por muscovita (PD). (E) Zona milonitizada a cisalhada (em vermelho) com cominuição dos cristais de quartzo e feldspato limitando cristais de calcita tardios (PC). Abreviações: Cpy = calcopirita, Bt = biotita, Ms = muscovita, Czo = clinozoisita, Ap = apatita, Fds = feldspato, Cal = calcita, Hem = hematita, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.28

Figura 15. Aspectos macroscópicos da rocha calciossilicática. (A) Porfiroclasto de quartzo envolto por *fronts* de alteração carbonática e lentes cloritizadas. (B) Matriz da rocha calciossilicática composta predominantemente por calcita, quartzo e feldspato com cloritização pervasiva da matriz e em vênulas. (C) Veios deformados e rompidos de abita, quartzo e epidoto hidrotermal cortando a rocha calciossilicática. (D) Veio de hematita (especularita) cortando a rocha calciossilicática formada por calcita, quartzo, tremolita e clorita pervasiva na matriz. Aspectos microscópicos da rocha calciossilicática em luz polarizada transmitida. (E) Porfiroblasto de tremolita com bordas e fraturas substituídas por calcita associada a *fronts* de alteração em uma matriz quartzo-feldspática (PC). (F) Bolsões de quartzo e feldspato e restos de tremolita em meio a *fronts* de alteração carbonática (PC). (G) *Front* de clorita sobrepondo alteração carbonática (PC). (H) Aglomerados de cristais de epidoto xenomórficos associados aos *fronts* de clorita (PD). Abreviações: Ter = tremolita, Alb = albita, Qtz = quartzo, Bt = biotita, Ep = epidoto, Hem = hematita, Cal = calcita, Anf = anfibólio, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.30

Figura 16. Aspectos macroscópicos do clorita-biotita xisto. (A) Foliação milonítica do clorita-biotita xisto com porfiroclastos de quartzo. (B) Foliação milonítica penetrativa e porfiroblastos sericitizados em uma matriz composta por biotita e clorita. (C) Granada compondo cerca de 60% da matriz do clorita-biotita xisto. (D) Porfiroblastos de apatita na

matriz do clorita-biotita xisto, com calcopirita disseminada. (E) Foliação definida pela orientação de porfiroblastos prismáticos de turmalina. (F) Vênulas de feldspato potássico discordantes da foliação do clorita-biotita xisto. (G) Vênula de epidoto tardia cortando a matriz composta por biotita e clorita. (H) Intensa limonitização associada à silicificação seguindo a foliação do clorita-biotita xisto. Aspectos microscópicos do clorita-biotita xisto em luz polarizada transmitida. (I) Porfiroblasto de granada envolto e com fraturas preenchidas por biotita cloritizada (PD). (J) Bolsões sigmoidais de quartzo recristalizado envoltos por biotita compondo a foliação principal com aspecto anastomosado (PC). (K) Matriz composta predominantemente por aglomerados de cristais de granada envoltos por quartzo, albita, biotita e magnetita (PD). (L) Aglomerados de cristais de apatita envoltos por clorita em uma matriz quartzo-feldspática cortada por vênulas tardias de stilpnomelano e cristais xenoblásticos de magnetita (PD). (M) Porfiroblastos de turmalina estirados segundo a foliação principal em uma matriz quartzo-feldspática (PD). (N) Pseudomorfo sericitizado em meio à foliação milonítica composta por biotita e lentes de quartzo e feldspato (PC). Abreviações: Cpy = calcopirita, k-fds = feldspato potássico, Qtz = quartzo, Bt = biotita, Ep = epidoto, Hem = hematita, Mt = magnetita, Pds = pseudomorfo, Tur = turmalina, Chl = clorita, Alb = albita, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.....34

Figura 17. Aspectos macroscópicos do biotita-anfibólio xisto. (A) Foliação marcada pela orientação de cristais de grunerita, biotita e hastingsita. (B) Matriz foliada com lentes de grunerita, biotita e hastingsita compondo a foliação S_{n+1} dobrada (em vermelho). (C) Matriz composta por grunerita e biotita cortada por uma vênula de epidoto concordante a foliação e lentes de albita hidrotermal. Aspectos microscópicos do biotita-anfibólio xisto em luz polarizada transmitida. (D) Substituição da grunerita por hastingsita nas bordas e ao longo dos planos de clivagem (PD). (E) *Front* de hastingsita cortando e substituindo porfiroblastos de grunerita e a hastingsita sendo substituída por biotita (PD). (F) *Front* de hastingsita substituindo porfiroblastos de grunerita, sobreposto por um *front* de biotita (PD). Abreviações: Gru = grunerita, Hst = hastingsita, Bt = biotita, Mt = magnetita, Ep = epidoto, PD = polarizadores descruzados.36

Figura 18. Aspectos macroscópicos da formação ferrífera bandada (BIF). (A) Fino bandamento composicional caracterizado por bandas constituídas por magnetita e hematita e bandas com quartzo, feldspato e clorita, cortadas por vênulas de albita concordantes à foliação. (B) BIF cortada por vênula de hematita e magnetita com calcopirita associada. (C) Matriz da BIF finamente foliada cortada por uma vênula de clorita e albita concordante a foliação. (D) BIF com foliação S_{n+1} dobrada (em vermelho) e cortada por porfiroblastos de calcopirita associada a silicificação. Aspectos microscópicos da formação ferrífera bandada em luz polarizada. (E) Bandamento composicional da BIF (LT) (PD). (F) Textura de substituição de porfiroblastos de magnetita por hematita placóide, martitização (LR). (G) Cristais de hastingsita parcialmente substituída por biotita, dispersos na matriz da BIF (LT)

(PD). (H) Vênula de carbonato associada a cloritização, a entrada de albita hidrotermal e cristais de rutilo. Textura de preenchimento de espaços vazios, com a formação de cristais de albita subidioblásticos (LT) (PC). Abreviações: Qtz = quartzo, Alb = albita, Fds = feldspato, Hem = hematita, Mt = magnetita, Rt = rutilo, Chl = clorita, Hst = hastingsita, Cal = calcita, Bt = biotita, Cpy = calcopirita, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados, LR = luz refletida, LT = luz transmitida.....38

Figura 19. Aspectos macroscópicos do Granito Furnas. (A) Alteração pervasiva do Granito Furnas, formando biotita e muscovita e vênulas de albita hidrotermal. (B) Granito Furnas alterado com *infills* de clorita, biotita e muscovita. (C) Granito Furnas intensamente cloritizado com bolsões de quartzo e albita hidrotermal e formação de turmalina na matriz. (D) Intensa cristalização de granada obliterando as feições do Granito Furnas. Aspectos microscópicos do Granito Furnas em luz polarizada transmitida. (E) Alteração potássica com formação de biotita brechando e substituindo a matriz do Granito Furnas (PD). (F) *Front* de biotita e muscovita, com cloritização associada isolando bolsões sigmoidais de quartzo recristalizado (PC). (G) Porfiroclastos de quartzo com migração de borda de grão e forte extinção ondulante e albita sericitizada com geminação apagada (PC). (H) *Front* de muscovita com cloritização tardia (PC). Abreviações: Qtz = quartzo, Ms = muscovita, Bt = biotita, Chl = clorita, Alb = albita, Tur = turmalina, Grt = granada, Fds = feldspato, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.40

Figura 20. Aspectos macroscópicos das alterações hidrotermais do setor SE. (A) Intensa albitização do Granito Furnas cortada por vênulas de biotita e veio de quartzo leitoso tardio. (B) Vênula de albita com bornita associada, discordante a matriz. (C) Silicificação cortada por *infills* de biotita. (D) Cristalização de granada associada a formação de biotita e silicificação pervasiva da matriz. (E) Cristalização de granada envolta por *fronts* de biotita. (F) Porfiroblastos de hastingsita em meio a uma matriz de clorita e biotita. (G) *Fronts* de grunerita associada a *fronts* de biotita e granada estirada ao longo da foliação milonítica. (H) Intercalação entre lentes de grunerita e clorita e domínios com cristalização de granada. Abreviações: Qtz = quartzo, Chl = clorita, Alb = albita, Bt = biotita, Gru = grunerita, Hst = hastingsita, Bn = bornita, Grt = granada.46

Figura 21. Aspectos microscópicos das alterações hidrotermais do setor SE em luz polarizada transmitida. (A) Vênula de albita hidrotermal com textura de preenchimento e bolsão de quartzo deformado (PC). (B) *Front* de biotita castanha alterando a matriz composta por muscovita no Granito Furnas (PD). (C) Cristais de turmalina verde azulada orientadas segundo a foliação (PD). (D) Aglomerados de granada envoltos por clorita e associados a silicificação e cristalização de magnetita (PD). (E) Cristais de hastingsita prismáticos dispostos de forma decussada na matriz compondo hastingsito (PC). (F) Matriz do Granito Furnas com albita sericitizada e feições de milonitização, com quartzo e feldspato cominuído, além de *front* de grunerita. (G) *Front* de grunerita substituindo a matriz do

hastingsita (PC). (H) Intercalação entre domínios compostos por grunerita e domínios de biotita cloritizada (PD). (I) *Front* de biotita cloritizada substituindo domínios ricos em hastingsita. Abreviações: Qtz = quartzo, Chl = clorita, Alb = albita, Bt = biotita, Gru = grunerita, Hst = hastingsita, Mt = magnetita, Fds = feldspato, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.47

Figura 22. Aspectos macroscópicos das alterações hidrotermais do setor NW. (A) Zona silicificada com fraturas preenchidas por limonita, calcopirita e hematita. (B) Porfiroblastos de turmalina orientados segundo a foliação em uma matriz quartzo-feldspática com intensa albitização, cloritização e alteração potássica. (C) Foliação milonítica definida por biotita e muscovita no biotita-muscovita-epidoto xisto e vênula de albita com hematita associada. (D) Cristalização de granada nos clorita-biotita-(granada) xistos. (E) Intensa alteração potássica com formação de feldspato potássico com vênulas discordantes de epidoto. (F) Vênulas de biotita cortando zonas com intenso enriquecimento em ferro e remobilização de hematita e magnetita. (G) Porfiroblastos de apatita em meio ao clorita-biotita-(granada) xisto com calcopirita disseminada. (H) Enriquecimento em ferro com formação de hematita e magnetita na matriz e com vênulas de calcopirita e limonita associadas. (I) Veio de calcita com porfiroblastos de magnetita e calcopirita associados. (J) Matriz do clorita-biotita xisto cortada por vênulas discordantes de epidoto com calcopirita associada. Abreviações: Lm = limonita, Qtz = quartzo, Chl = clorita, Alb = albita, Bt = biotita, Ms = muscovita, Cpy = calcopirita, Hem = hematita, Mt = magnetita, Grt = granada, Ep = epidoto, Ap = apatita, Tur = turmalina, K-fds = feldspato potássico.....53

Figura 23. Aspectos microscópicos das alterações hidrotermais do setor NW. (A) Vênula de quartzo recristalizada com albita hidrotermal sericitizada, concordante a foliação e limitada por um domínio composto por granada e biotita (LT) (PC). (B) Vênula de albita com textura de preenchimento e cristais de calcita e rutilo associado (LT) (PC). (C) Foliação milonítica com lentes sigmoidais de quartzo recristalizado e *fronts* de biotita e muscovita (LT) (PC). (D) Aglomerados de cristais de granada compondo predominantemente a matriz e associados a silicificação e cristalização de magnetita (LT) (PD). (E) *Front* de hastingsita substituindo cristais de grunerita com magnetita associada (LT) (PD). (F) Porfiroblastos de turmalina estirados ao longo da foliação em matriz quartzofeldspática (LT) (PD). (G) *Front* de biotita definindo a foliação milonítica e isolando bolsões de quartzo e feldspato (LT) (PD). (H) Aglomerados de cristais granulares de apatita envoltos por clorita e associação com vênulas tardias e discordantes de estilpnomelano (LT) (PD). (I) Veio de magnetita substituída por hematita placoide configurando uma textura de substituição, martitização (LR). (J) Enriquecimento em ferro com formação de grunerita prismática decussada (LT) (PC). (K) *Front* de clorita cortando o domínio com intensa alteração carbonática e formação de calcita nas rochas calciossilicáticas (LT) (PC). (L) Epidoto associado a *fronts* de clorita (LT) (PD). Abreviações: Qtz = quartzo, Chl = clorita, Alb = albita, Bt = biotita, Gru = grunerita, Hst =

hastingsita, Hem = hematita, Mt = magnetita, Grt = granada, Stp = estipnomelano, Rt = rutilo
Ep = epidoto, Tur = turmalina, Cal = calcita, Fds = feldspato, Bt = biotita, PD = polarizadores
descruzados, PC = polarizadores cruzados, LT = luz transmitida, LR = luz refletida.54

Figura 24. Aspectos macroscópicos das da mineralização no setor SE (A a E) e no
setor NW (F a J). (A) Zona silicificada com *infills* de biotita e vênulas discordantes de bornita
configurando um padrão *stockwork*. (B) Mineralização com bornita disseminada e
concentrada na matriz associada a vênula de albita. (C) Bornita associada à zona de
silicificação. (D) Bornita associada a veios de quartzo dobrado em matriz com intensa
formação de biotita. (E) Bornita associada a veios de quartzo sin-deformacionais. (F)
Calcopirita formada no interior de vênulas de hematita associadas a um sistema rúptil. (G)
Calcopirita associada a megacristais de magnetita em veio de calcita. (H) Pirita disseminada
ao longo da foliação dos clorita-biotita xistos. (I) Vênulas discordantes de calcopirita
cortando a matriz. (J) Veio de calcopirita maciça discordante e cortando uma zona om
intenso enriquecimento em ferro. Abreviações: Qtz = quartzo, Chl = clorita, Alb = albita, Bt =
biotita, Cpy = calcopirita, Hem = hematita, Mt = magnetita, Bn = bornita, Cal = calcita.56

Figura 25. Aspectos microscópicos da mineralização do setor NW em luz polarizada
refletida. (A) Porfiroblastos de pirita envoltos por uma massa de calcopirita com cristais de
magnetita associada. (B) Relação espacial entre a calcopirita e óxidos de ferro. Relação de
substituição de cristais de magnetita por hematita placóide (martitização). (C) Área mapeada
por MEV com a associação de calcopirita, pirita, magnetita e hematita. (D) Imagem por
elétrons refletidos obtidas por EDS, mostrando ausência de zoneamento mineral na
calcopirita e pirita. (E) *Spot* (em vermelho) realizado no centro na calcopirita mostrando pico
de Platina. Abreviações: Cpy = calcopirita, Hem = hematita, Mt = magnetita.57

Figura 26. Aspectos macroscópicos dos aspectos estruturais do setor SE (A a E) e
do setor NW (F a J). (A) Foliação milonítica crenulada dos xistos aluminosos. (B)
Bandamento composicional e foliação milonítica marcada do granada-grunerita xisto. (C)
Vênulas sin a tardi Sn+1 dobradas e deformadas. (D) Vênula de quartzo deformada. (E)
Mineralização de bornita em vênulas e brechas. (F) Foliação milonítica Sn+1 marcada nos
clorita-biotita-(granada) xistos. (G) Foliação milonítica Sn+1 dobrada (em vermelho) no
biotita-anfibólio xisto. (H) Vênula de quartzo leitoso deformada e cortada por vênulas de
epidoto discordantes. (I) Zona silicificada e fraturada com preenchimento de limonita. (J)
Brecha hidrotermal com fragmentos do clorita-biotita-(granda) xisto com bordas de quartz
prismático e cimentados por limonita e Abreviações: Bn = bornita, Ms = muscovita, Bt =
biotita, Grt = granada, Chl = clorita, Gru = grunerita, Alb = albita, Qtz = quartzo, Anf =
anfibólio, Mt = magnetita, Lm = limonita, Cpy = calcopirita, Ep = epidoto.59

Figura 27. Aspectos microscópicos dos aspectos estruturais do setor SE (A a F) e do
setor NW (G a L) em luz polarizada transmitida. (A) Foliação pretérita Sn preservada no
interior do porfiroblasto de granada (PD). (B) Ribbon de quartzo recristalizado e dobrado ao

longo da foliação principal S_{n+1} (PC). (C) Foliação S_{n+1} crenulada definida pela orientação de cristais de biotita (PD). (D) *Ribbons* de quartzo e porfiroblasto de granada deformados ao longo da foliação S_{n+1} crenulada (PC). (E) Foliação S_{n+1} crenulada e amoldada a porfiroblasto de granada também deformado (PC). (F) Foliação S_{n+1} crenulada com formação de clivagem de crenulação presente nos xistos aluminosos (PC). (G) Foliação milonítica S_{n+1} definida pela orientação de biotita (PD). (H) Porfiroblastos de turmalina orientados ao longo da foliação S_{n+1} (PD). (I) Foliação milonítica crenulada com deformação de *ribbons* de quartzo (PC). (J) Foliação milonítica S_{n+1} com sigmoides de quartzo recristalizado, com bordas lobadas, migração de borda de grão e recristalização dinâmica (PC). (K) Foliação milonítica com formação de pares S/C no muscovita-epidoto xisto (PC). (L) Limite cisalhado com cominuição de grãos seprando cristais tardios de calcita do domínio quartzoso (PC). Foliação S_n em linhas pontilhadas azuis, S_{n+1} em vermelho e clivagem de crenulação em amarelo. Abreviações: Ms = muscovita, Bt = biotita, Grt = granada, Chl = clorita, Czo = clinozoisita, Qtz = quartzo, Fds = feldspato, Mt = magnetita, Cal = calcita, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados. 60

Figura 28. Distribuição de litotipos em concordância com a descrição macroscópica dos testemunhos de sondagem FUR FD120 e FUR FD 128 do setor NW do depósito cupro-aurífero Furnas a esquerda. Perfis propostos por Jesus (2016) referentes aos testemunhos de sondagem FUR FD02 e FUR FD45 a direita. Abreviações: Hem = hematita, Mt = magnetita, Chl = clorita, Anf = anfibólio, Bt = biotita, Gru =grunerita, Kfs = feldspato potássico, Carb = carbonato, Hast = hastingsita, Act = actinolita. 63

Índice de Tabelas

Tabela 1. Relação entre as fases de alteração hidrotermal e a paragênese mineral característica (Jesus, 2016 modificada).....	45
Tabela 2. Relação entre as fases de alteração hidrotermal e a paragênese mineral característica do Setor NW	52
Tabela 3. Tabela paragenética em relação às distintas estruturas do setor SE do depósito Furnas (Jesus, 2016 modificada).	61
Tabela 4. Tabela paragenética em relação às distintas estruturas do setor NW do depósito Furnas.	62

RESUMO

O depósito de Furnas, localizado na Província Carajás, representa um importante depósito de cobre e ouro pertencente à classe dos depósitos de óxido de ferro–cobre–ouro (IOCG). Na Província Carajás se localizam alguns dos depósitos IOCG de classe mundial, dos quais grande parte são associados e alinhados à Zona de Cisalhamento do Cinzento, estrutura importante e influenciadora na formação destes depósitos.

Apesar de se localizar em uma das províncias minerais mais estudadas e importantes do país, o depósito de Furnas ainda não é completamente compreendido. Embora corresponda a um *trend* mineralizado com mais de 9 km de extensão, os estudos prévios já realizados concentram-se somente no setor SE do depósito, faltando informações do depósito como um todo. Portanto, este estudo caracteriza os padrões de alteração hidrotermal do setor NW do depósito Furnas, as principais paragêneses, seus tipos e estilos permitindo uma melhor caracterização da distribuição regional e do zoneamento das alterações hidrotermais no depósito Furnas.

Referente ao setor SE, análises macroscópicas e microscópicas permitiram a identificação de: clorita-(granada)-anfibólio-biotita xisto, hastingsito, clorita-grunerita xisto, granada-biotita xisto, granada-grunerita xisto, Granito Furnas, localizados na zona de *hangingwall* e o andalusita-muscovita-biotita xisto, localizado na zona de *footwall* do depósito. Estes litotipos encontram-se alterados hidrotermalmente e apresentam as seguintes alterações hidrotermais: albitização, silicificação, alteração potássica com formação de biotita, formação de turmalina, cristalização de granada, alteração sódico-cálcica, enriquecimento em ferro e cloritização. A mineralização de cobre–ouro é controlada predominantemente por estruturas dúcteis e caracterizada pela presença de calcopirita, pirita, bornita, calcocita e ouro, assim como minerais de ETRs.

Por sua vez, no setor NW, foram identificados sete tipos litológicos: quartzito a quartzo milonito; biotita-muscovita-epidoto xisto; rocha calciossilicática e clorita-biotita-(granada) xisto localizados na zona de *hangingwall* (capa), e o biotita-anfibólio xisto; formação ferrífera bandada (BIF) e Granito Furnas reconhecidos na zona de *footwall* (lapa). A sequência da alteração hidrotermal observada no setor NW é notadamente distinta daquela do setor SE e inclui albitização, silicificação, alteração hidrolítica, formação de granada, alteração sódico-cálcica, formação de turmalina, alteração potássica, formação de apatita, enriquecimento em ferro, alteração carbonática, cloritização e epidotização. A mineralização do setor NW é representada pela presença de calcopirita e pirita, controlados por estruturas rúpteis, assim como grande parte das zonas de alteração observadas no setor NW.

ABSTRACT

The Furnas deposit, located in the Carajás Province, represents an important copper–gold deposit belonging to the iron oxide–copper–gold (IOCG) deposits. In the Carajás Province are located some of the world-class IOCG deposits, in part located within the Cinzento Shear Zone, an important structure for the formation of these deposits.

Even located in one of the most studied and important Brazilian mineral provinces, the Furnas deposit is not yet completely understood. It corresponds to a mineralized trend with more than 9 km in length, but the previous studies already performed are concentrated only on the SE sector of the deposit, lacking information from the deposit as a whole. Therefore, this study characterizes the hydrothermal alteration pattern of the NW sector, the main alteration and ore paragenesis and their types and styles, providing a better characterization of regional alteration distribution and zoning of the Furnas deposit.

Relative to the SE sector, macroscopic and microscopic analysis allowed the identification of: chlorite-(garnet)-amphibole-biotite schist, hastingsite, chlorite-grunerite schist, garnet-biotite schist, garnet-grunerite schist, and the Furnas Granite, located at the hangingwall zone, and the andalusite-muscovite-biotite schist, located at the footwall zone. These lithotypes are hydrothermally altered and present the following hydrothermal alteration: albitization, silicification, potassic alteration with biotite, formation of tourmaline, crystallization of garnet, sodic–calcic alteration, iron enrichment, and chloritization. The copper–gold mineralization is predominantly controlled by ductile structures and characterized by the presence of chalcopyrite, pyrite, bornite, chalcocite and gold, as well as ETR-bearing minerals.

On the other hand, in the NW sector, seven lithotypes were identified: quartzite to quartz mylonite; biotite-muscovite-epitodote schist; calc-silicate rock, and chlorite-biotite-(garnet) schist located at the hangingwall zone, and the biotite-amphibole schist; banded iron formation (BIF), and the Furnas Granite recognized at the footwall zone. The sequence of the hydrothermal alteration observed in the NW sector is markedly different from that observed in the SE sector and includes albitization, silicification, hydrolytic alteration, garnet formation, sodic–calcic alteration, tourmaline formation, potassic alteration, apatite formation, iron enrichment, carbonatic alteration, chloritization, and epidotization. The mineralization of the NW sector is represented by the presence of chalcopyrite and pyrite, controlled by brittle structures, as well as most of the alteration zones observed in the NW sector.

1. INTRODUÇÃO

A Província Carajás, estabilizada tectonicamente durante o Arqueano, é uma das províncias metalogenéticas mais importantes mundialmente e destaca-se por seus expressivos recursos de minério de ferro, manganês, níquel, EGP, cromo, ouro e cobre (Monteiro *et al.*, 2014). Essa província também possui a maior quantidade conhecida de depósitos de óxido de ferro–cobre–ouro (*iron oxide–copper–gold deposits* ou IOCG; Hitzman *et al.* 1992, Hitzman 2000).

O depósito Furnas se localiza no setor norte do Domínio Carajás e é caracterizado por um *trend* mineralizado de direção preferencial WNW–ESE e aproximadamente 9 km de extensão (Vale, 2010), disposto ao longo da Zona de Cisalhamento Transcorrente do Cinzento (Jesus, 2016).

Hospedado em rochas metavulcanossedimentares referentes ao grupo Rio Novo, o depósito Furnas apresenta características semelhantes às dos depósitos IOCG da Província Carajás, tais como a associação espacial com zonas de cisalhamento regionais, extensas zonas de alteração hidrotermal, além de grandes volumes de magnetita hidrotermal associada aos sulfetos de cobre (Alves, 2016).

Este depósito representa uma importante fonte de minérios de cobre, ouro e ETR, apresentando uma assinatura química peculiar, com enriquecimento em Fe–Cu–Au–ETR–U–Co–Ni (Jesus, 2016) e uma zona mineralizada extensa com bornita–calcocita–magnetita, envolvida por um envelope de alteração hidrotermal com granada–grunerita (Alves, 2016).

Uma característica importante deste depósito é a sua proximidade com expressivos corpos graníticos (e.g. Suíte Igarapé Gelado, ca. 2,74 Ga; Granito Cigano, ca. 1,88 Ga; Jesus, 2016). Contudo, as relações entre o processo de mineralização do depósito de Furnas e a influência da colocação destes corpos graníticos, além dos mecanismos da evolução dos fluidos hidrotermais, ainda são pouco compreendidos. Todos os estudos realizados nesse depósito (Iguma, 2015; Alves, 2016; Jesus, 2016) foram concentrados no setor SE do depósito, no qual os corpos graníticos são interceptados muito localmente. Desta forma, neste projeto, são analisadas e estudadas amostras do setor NW do depósito, visando a caracterização de suas zonas de alteração hidrotermal e sua possível relação com as intrusões graníticas, a partir da comparação com os resultados obtidos para setor SE do depósito (Jesus, 2016; Alves, 2016).

2. OBJETIVOS

Este projeto objetiva a caracterização do modo de ocorrência, distribuição e composição mineralógica das zonas de alteração hidrotermal e mineralizadas do setor NW do depósito Furnas, visando à identificação de padrões regionais de zoneamento e suas possíveis relações com a colocação de corpos graníticos. As metas específicas do estudo incluem:

- I. Identificação dos tipos, estilos e paragênese da alteração hidrotermal do setor NW do depósito Furnas;
- II. Caracterização das tipologias de minério de cobre–ouro e suas relações espaciais com zonas de alteração hidrotermal específicas;
- III. Identificação e detalhamento das associações de minerais de minério e paragêneses, possíveis zoneamentos minerais, texturas dos sulfetos e modo de ocorrência do ouro e elementos traços presente nas zonas mineralizadas;
- IV. Comparação das características do setor NW e SE do depósito, visando auxiliar na confecção de modelos regionais de distribuição das zonas de alteração hidrotermais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

Os materiais utilizados foram disponibilizados pela VALE S.A, e consistem em testemunhos de sondagem realizadas pela empresa. Parte do material foi previamente coletado pela orientadora desse estudo e parte, referente ao setor NW do depósito, foi detalhadamente descrito e amostrado durante a execução do trabalho de campo.

3.2. Métodos

3.2.1. Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica consistiu na consulta de publicações referentes ao contexto geológico da Província Carajás e aos processos genéticos formadores de depósitos minerais hidrotermais, com ênfase nos depósitos de óxido de ferro–cobre–ouro e suas características, incluindo importância de controle estrutural, evolução de fluidos hidrotermais e mecanismos de precipitação de minério. Também foram realizadas consultas a trabalhos realizados no setor SE do Depósito de Furnas, afim de compreender os múltiplos estágios de alteração hidrotermal reconhecidos nesse depósito, assim como sua relação com a mineralização de cobre e sua relação com magmatismo granítico observado na região, com a finalidade de compará-los com os padrões de alteração hidrotermal do setor NW.

3.2.2. Trabalho de campo

Durante os dias 26 de junho a 3 de julho foi realizado trabalho de campo na área do N5, na Serra dos Carajás, nas dependências da empresa VALE S.A., onde foram feitas descrições detalhadas de testemunhos de sondagem do setor NW do depósito Furnas (FUR-FD120 e FUR-FD 128), sendo possível caracterizar os controles estruturais, a distribuição das zonas de alteração hidrotermal, o modo de ocorrência dos corpos mineralizados e possíveis evidências de sobreposição de eventos hidrotermais e mineralizantes.

3.2.3. Petrografia em luz transmitida e refletida

A descrição das secções delgadas-polidas foram feitas utilizando-se microscópios *Olympus BXP 40* de luz refletida e transmitida, pertencentes ao Laboratório Didático de Microscopia Petrográfica, enquanto as fotomicrografias foram obtidas com uso do microscópio *Zeiss Axioplan 2* com câmera *Leica* acoplada de modelo MC 170 HD e *software LAS (Leica Application Suite)*, pertencentes ao Laboratório de Petrografia Sedimentar do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP). O estudo petrográfico foi iniciado com amostras do setor SE do depósito, com uso de coleção de 35 lâminas delgadas-polidas já existentes e com o propósito de compreender os processos de alteração hidrotermal atuantes neste setor, possibilitando assim a comparação com os dados obtidos com as amostras coletadas em campo e 20 lâminas delgadas, sendo 6 polidas referentes ao setor NW.

3.2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura

A análise por microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica (Labmev) do CPGegeo e SHRIMP pertencente ao Instituto de Geociências da USP, com o uso de VPESM (*Viper Pressure Environmental Scanning Microscope*) Quanta 250 da marca FEI, com detectores de elétrons secundários e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), calibrado com Co e detectores do estado físico de Si (Li) da marca Oxford. Foram obtidos mapas composicionais de raios X e análise de química mineral quantitativa comparada com Standart-Less com objetivo de identificar as associações de minerais de minério, possíveis zoneamentos minerais e elementos traços presentes nas zonas mineralizadas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Província Carajás

A Província Carajás (Santos *et al.* 2000, Santos 2003) situa-se na porção sudeste do Cráton Amazônico, de idade arqueana (Teixeira *et al.* 1989, Tassinari 1996, Tassinari &

Macambira 1999, 2004). É caracterizada como uma das mais importantes províncias minerais do planeta, com exemplos de depósitos únicos e de classe mundial, sendo alguns considerados os únicos da classe IOCG de idade arqueana atualmente conhecidos (Xavier *et al.*, 2012; Monteiro *et al.*, 2014).

O Cráton Amazônico localiza-se no norte da América do Sul e compreende o escudo das Guianas e do Brasil Central, sendo separados por uma grande faixa sedimentar representada pelas bacias do Amazonas e Solimões (Vasquez *et al.*, 2008).

Existem, atualmente, duas propostas para compartimentalização do Cráton Amazônico. Uma, elaborada a partir de dados geofísicos e estruturais, considera o Cráton como uma massa continental estável, constituída por doze blocos formados durante o Arqueano e retrabalhados por eventos colisionais posteriores (Santos, 2003). A segunda proposta, construída com base em dados geocronológicos, geofísicos e *trends* estruturais, considera a evolução do cráton a partir de um núcleo antigo formado por rochas arqueanas e eventos de acreção paleoproterozoicas, reativados após o Ciclo Transamazônico (Tassinari, 1996). Com base na segunda proposta, Tassinari e Macambira (2004) dividiram o Cráton Amazônico em seis principais províncias geocronológicas (figura 1).

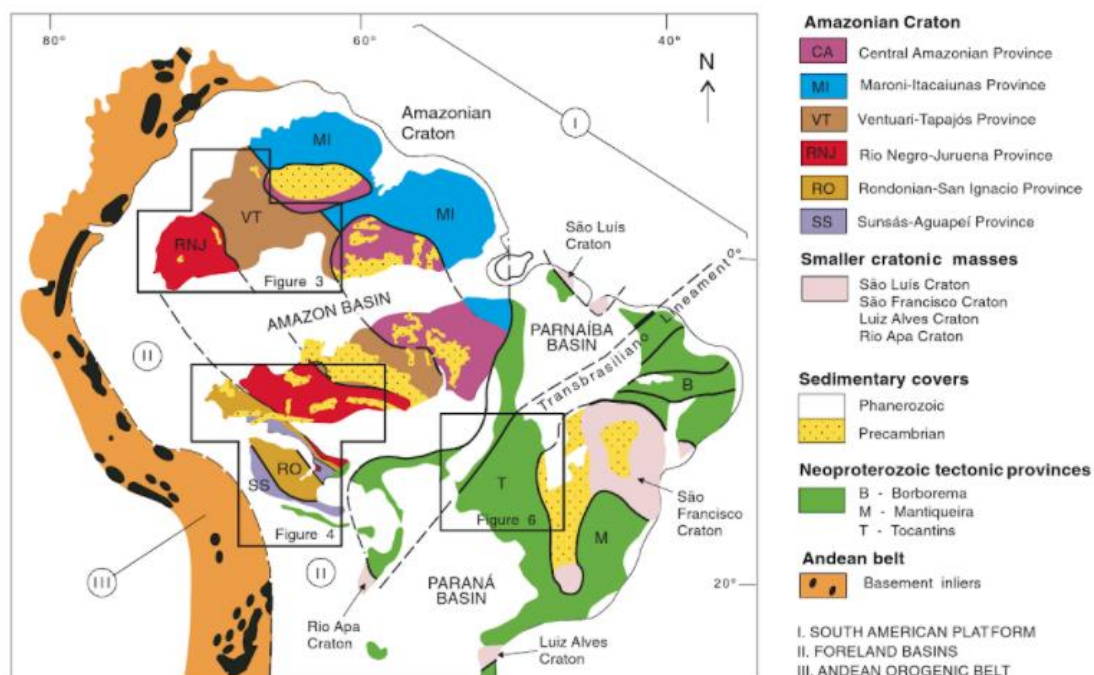


Figura 1. Principais províncias geotectônicas Neoproterozoicas da América do Sul, com ênfase no Cráton Amazônico e suas províncias. O Cráton São Francisco, os fragmentos cratônicos São Luís e Luiz Alves, assim como os orógenos Neoproterozoico Brasília/Pan-Africano estão indicados no leste da figura. Estes cinturões tratam-se da província Borborema (B) no nordeste do Brasil, a província Tocantins (T) na região central e a província Mantiqueira (M) a leste e sudeste do Brasil. Adaptado de Cordani *et al.* (2000).

Essas províncias incluem: Amazônia Central (> 2,3 Ga); Maroni–Itacaiúnas (2,2–1,95 Ga); Ventuari–Tapajós (1,95–1,55 Ga); Rio Negro–Juruaena (1,8–1,55 Ga); Rondoniana–San Ignacio (1,55–1,3 Ga) e Sunsás (1,25–1,0 Ga). A Província Amazônia Central foi subdividida nos blocos Carajás–Iricoumé e Roraima (Tassinari e Macambira, 1999), sendo incluído no primeiro bloco a área da Província Carajás.

A Província Carajás, como definida por Santos (2003), é limitada a oeste por granitoides proterozoicos e rochas vulcânicas e vulcanoclásticas pertencentes ao Supergrupo Uatumã, a leste pela Faixa Araguaia, neoproterozoica, e a norte e a sul, respectivamente, pelos domínios Bacajá e Santana do Araguaia, pertencentes à Província Transamazônica (Vasquez *et al.*, 2008).

Um dos modelos atuais mais aceitos subdivide a Província Carajás em dois principais domínios tectônicos (Souza *et al.*, 1996; Dall’Agnol *et al.*, 2006; Vasquez *et al.*, 2008): Rio Maria, a sul, e Carajás, a norte, limitados por uma descontinuidade regional de direção E-W.

O Domínio Rio Maria, de idade mesoarqueana (3,0 a 2,86 Ga, Almeida *et al.*, 2013), é classificado como um terreno granito-*greenstone* (Machado *et al.*, 1991; Dall’Agnol *et al.*, 2006) com as rochas mais antigas do Cráton Amazônico. É composto por associações tectônicas mesoarqueanas de *greenstone belts*, complexos máfico-ultramáficos, granitoides e ortognaisses tipo TTG e granitos de alto potássio, além de bacias sedimentares paleoproterozoicas e magmatismos anorogênicos orosirianos (Vasquez *et al.*, 2008).

Segundo Souza *et al.* (2001), a evolução o domínio Rio Maria ocorreu em dois principais eventos de acreção de crosta juvenil, distintos temporalmente. O primeiro evento foi definido como um intenso período de magmatismo sintectônico cálcio-alcálico, que resultou na formação das sequências *greenstone*, com a formação dos grupos Gradaús, Serra do Inajá, Babaçu e Lagoa Seca, seguido por um magmatismo trondjemítico sin a tarditectônico formando os complexos máfico-ultramáficos Serra Azul e Gará-Pará. Enquanto o segundo evento foi marcado por um magmatismo de afinidade trondjemítica (ca. 2,87–2,86 Ga), e um volumoso magmatismo cálcio-alcálico enriquecido em magnésio, de caráter sanukitóide (ca. 2,88–2,85 Ga). Este evento resultou na formação dos tonalitos Arco Verde, Caracol e Parazônia, trondjemitos Mogno e Água Fria e granodioritos Rio Maria e Cumaru (Vasquez *et al.*, 2008).

Por sua vez, o Domínio Carajás, é composto por um embasamento mesoarqueano, representado pelos complexos Xingu (ortognaisses de composição tonalítica, granodiorítica e trondjemítica e migmatitos) e Pium (ortogranulitos charnockíticos a enderbíticos e máficos), por rochas supracrustais neoarqueanas da Bacia Carajás e rochas intrusivas neoarqueanas e paleoproterozoicas (Xavier *et al.*, 2012).

As rochas neoarquenas da Bacia de Carajás são representadas pelas sequências metavulcanossedimentares do Supergrupo Itacaiúnas e do Grupo Rio Novo e pela sequência metassedimentar da Formação Águas Claras. O Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988) compreende 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). Por sua vez, o Grupo Rio Novo, aflorante na porção nordeste do Domínio Carajás, é composto por rochas metamáficas, metaultramáficas, quartzitos, formações ferríferas bandadas e filitos sericíticos (Hirata *et al.*, 1982; Araújo & Maia, 1991; Oliveira *et al.*, 1994).

As rochas metassedimentares da Formação Águas Claras recobrem parcialmente as rochas do Supergrupo Itacaiúnas (Araújo *et al.* 1988; Nogueira *et al.*, 1995) e são caracterizadas como metaconglomerados, meta-arenitos, sericita quartzitos, mármores dolomíticos e filitos carbonosos, depositados em ambiente plataformar marinho rasa a fluvial.

As rochas intrusivas, localizadas no Domínio Carajás, resultaram de magmatismo arqueano (ca. 2,76 a 2,74 Ga), representado por granitoides das suítes Plaqué, Planalto, Estrela, Igarapé Gelado e Serra do Rabo (Huhn *et al.*, 1999b; Avelar *et al.*, 1999; Barbosa, 2004; Sardinha *et al.*, 2006; Barros *et al.*, 2009; Feio *et al.*, 2012), e paleoproterozoico (ca. 1,88 Ga), que inclui os granitos alcalinos a subalcalinos do tipo A (e.g., Central de Carajás, *Young Salobo*, Cigano, Pojuca Breves e Rio Branco; Machado *et al.*, 1991; Dall'Agnol *et al.*, 1994; Tallarico, 2003).

5. RESULTADOS

5.1. Contexto Geológico do depósito de Cu–Au Furnas

O depósito cupro–aurífero Furnas localiza-se no setor norte do Domínio Carajás (Figura 2) e caracteriza-se por um *trend* mineralizado de direção preferencial WNW–ESE e aproximadamente 9 km de extensão (Vale, 2010) disposto ao longo da Zona de Cisalhamento Transcorrente do Cinzento (Jesus, 2016).

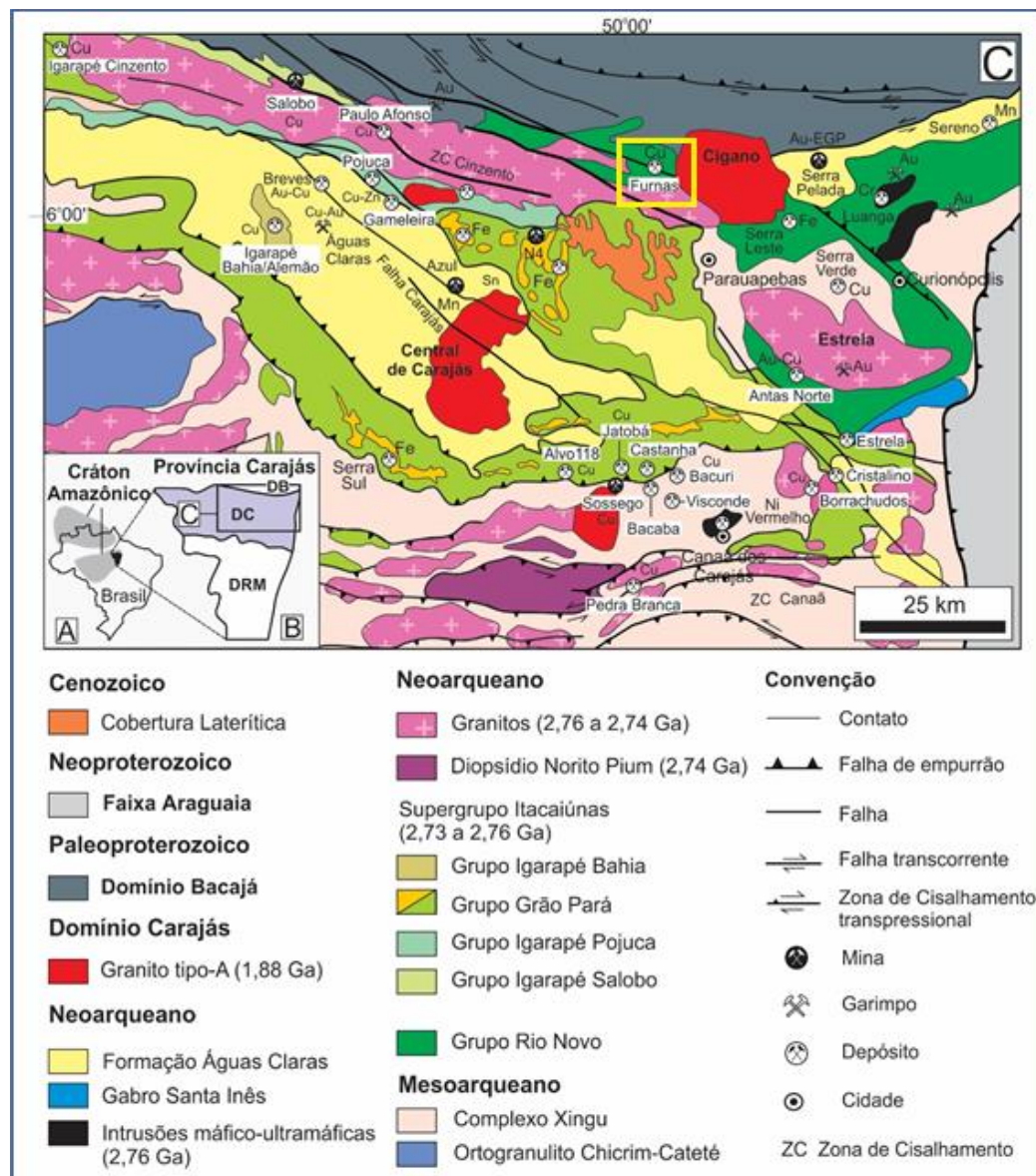


Figura 2. (A) Localização da Província Carajás no Cráton Amazônico; (B) Divisão da Província Carajás nos domínios Rio Maria (DRM) e Carajás (DC), limitado a norte pelo Domínio Bacajá (DB); (C) Mapa geológico do Domínio Carajás da Província Carajás e áreas adjacentes (modificado de Vasquez et al., 2008) com a localização dos depósitos minerais. O retângulo amarelo apresenta a área de ocorrência do depósito Furnas.

Caracterizado como um depósito do tipo IOCG (Hitzman, 1992), o depósito de Furnas (Figura 3) é associado a extensas zonas de cisalhamento regionais e relaciona-se espacialmente a corpos graníticos, como o granito Cigano, localizado no extremo leste do depósito, e o granito Furnas aflorante a oeste do depósito e interceptado por sondagem ao longo do *trend* mineralizado. Este depósito é hospedado por rochas metavulcanossedimentares pertencentes ao Supergrupo Itacaiúnas ou ao Grupo Rio Novo e, possivelmente por rochas metassedimentares da Formação Águas Claras, além do granito Furnas, de idade ainda desconhecida.

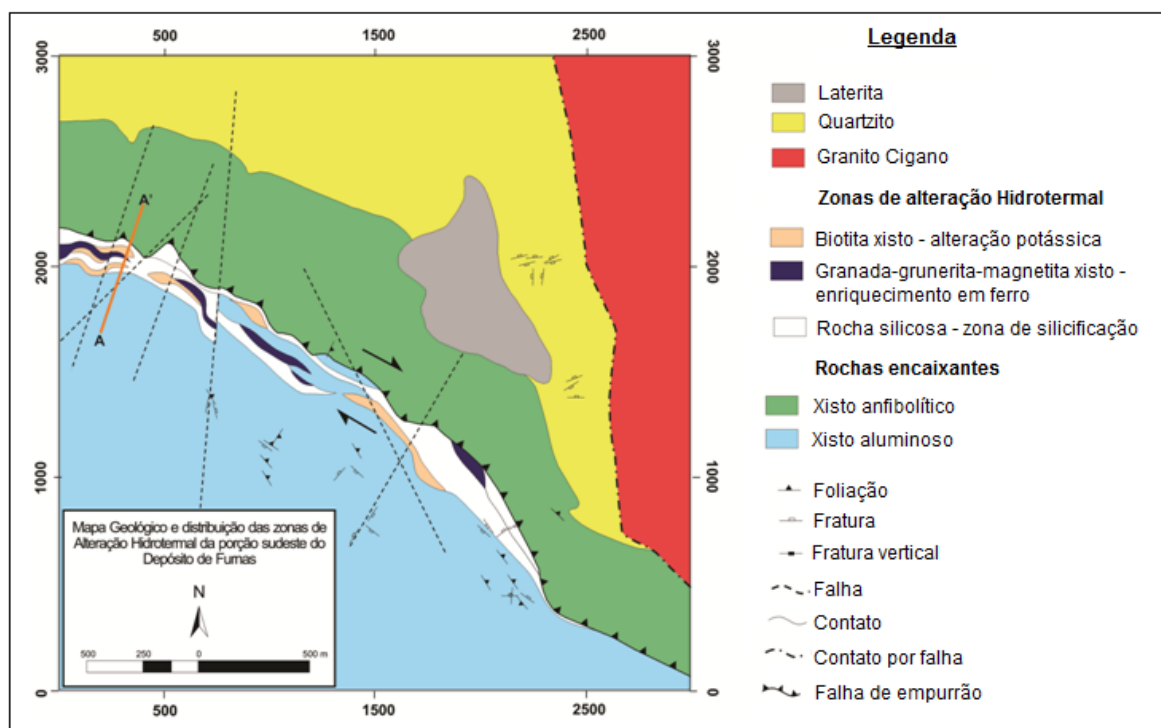


Figura 3. Mapa geológico e das zonas de alteração hidrotermal da porção sudeste do depósito de cobre-ouro de Fumas (Modificado de Iguma, 2015; Jesus, 2016).

Os corpos mineralizados encontram-se alojados ao longo da zona de cisalhamento de direção NW–SE, que é parte do Sistema Cinzento, e são associados a extensas zonas de alteração hidrotermal. No setor SE, a zona de *footwall* (lapa) do depósito é representada por andalusita-muscovita-biotita xisto com estauroлита, enquanto a zona de *hanging wall* (capa) é caracterizada por clorita-granada-anfibólio-biotita xisto (Figuras 3 e 4). Essas zonas são separadas por uma falha de empurrão (Jesus, 2016). A zona de alteração hidrotermal que representa o envelope proximal de alteração em relação aos corpos mineralizados é caracterizada por grunerita-granada-biotita xisto, (anfibólio)-granada-grunerita-magnetita xisto e quartzo milonito (zonas de silicificação), associadas a veios e brechas de calcopirita e bornita tardios (Santos, 2014; Iguma, 2015, Jesus, 2015, em Alves, 2016).

Jesus (2016) classificou os litotipos do setor SE do depósito em quatro principais conjuntos: xistos anfibolíticos, xistos aluminosos, granito Fumas e uma zona de envelope da mineralização, definida como resultado de intensa alteração hidrotermal. Estes litotipos encontram-se bastante deformados e cisalhados, com desenvolvimento de tramas dúcteis a dúcteis-rúpteis representadas por xistosidade, foliação milonítica, que transpõe a xistosidade, além de dobras isoclinais, abertas, parasíticas em S e pitgmáticas, além de *kink bands*, associadas ao desenvolvimento da foliação milonítica em zonas de cisalhamento e por tramas rúpteis-dúcteis a rúpteis, representadas por brechas e fraturas (Vale, 2010, em Jesus, 2016).

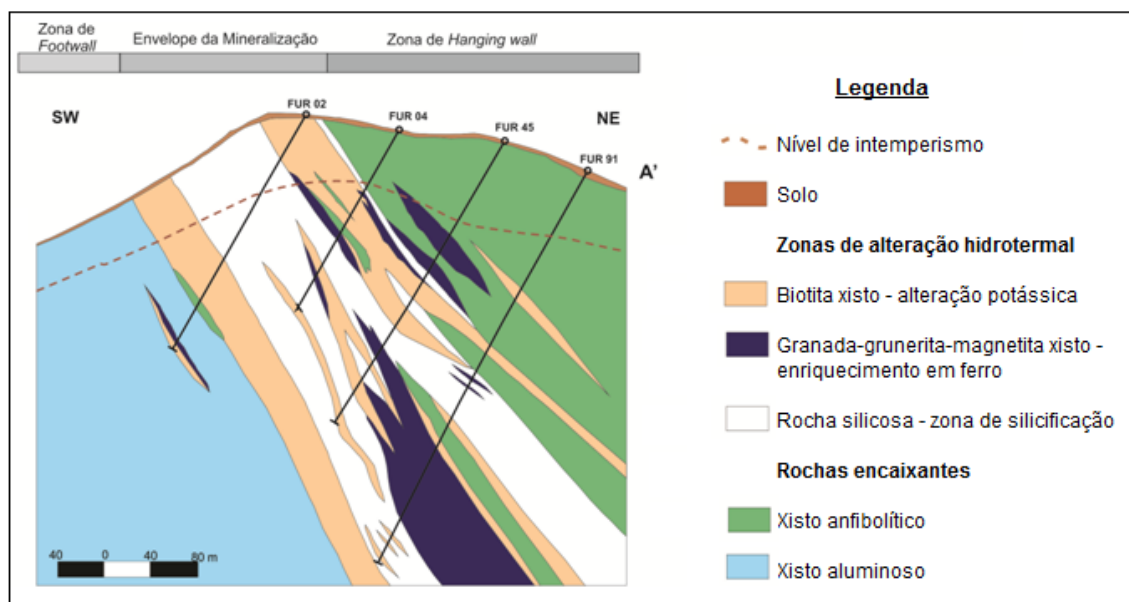


Figura 4. Seção geológica-tipo do Depósito Furnas, mostrando a distribuição das zonas de alteração hidrotermal do setor SE do depósito (Jesus, 2016; Alves, 2016).

Existem poucos estudos referentes ao setor NW do depósito de Furnas caracterizando os litotipos presentes neste setor. Segundo Vale (2010), as sondagens desse setor, apresentadas no perfil esquemático da Figura 5, interceptam rochas silicosas e xistos anfibolíticos cloritizados localizados na zona de *hangingwall* (capa), seguidos por anfibólio xistos com grunerita com intenso enriquecimento em ferro na zona do envelope da mineralização, e rochas silicosas, formações ferríferas e novamente o xisto anfibolítico cloritizado, além do Granito Furnas, na zona de *footwall* (lapa).

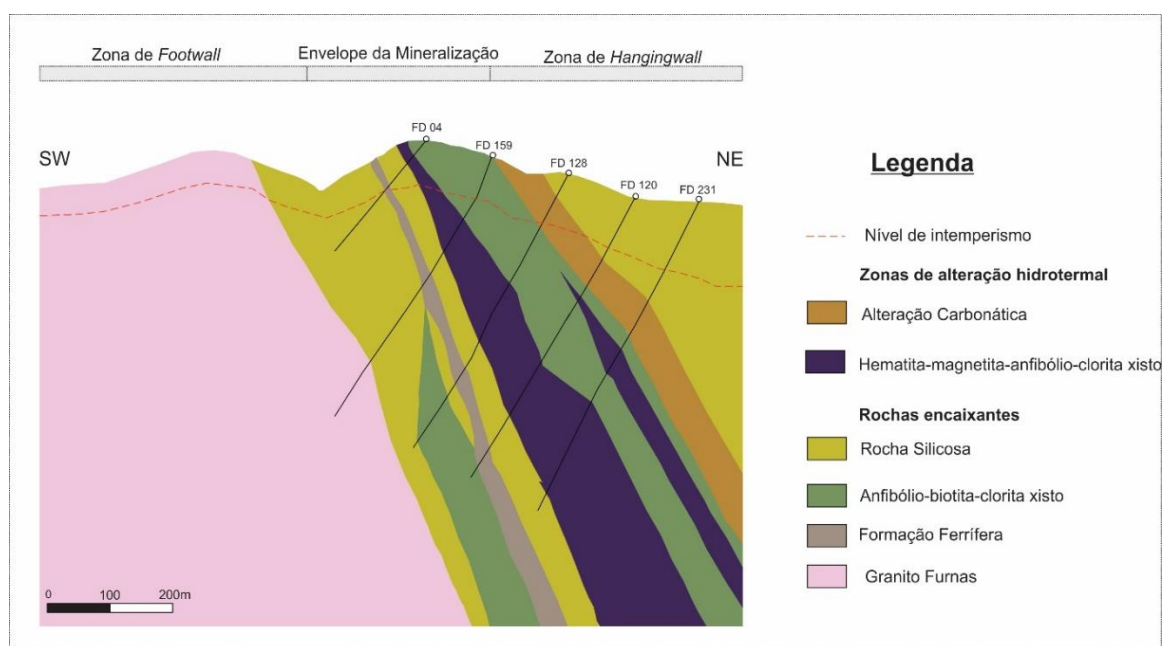


Figura 5. Seção geológica-tipo do Depósito Furnas, mostrando a distribuição das zonas de alteração hidrotermal do setor NW do depósito. (Modificado de Vale, 2010).

5.2. Caracterização Petrográfica dos Litotipos do Depósito Furnas

5.2.1. Setor SE

Referente ao setor SE, foram descritas macroscópica e microscopicamente amostras referentes às sondagens FD 02 e FD 45. A partir da descrição e interpretação destas amostras foram identificados os seguintes litotipos: (i) clorita-(granada)-anfibólio-biotita xisto; (ii) hastingsito; (iii) clorita-grunerita xisto; (iv) granada-biotita xisto; (v) granada-grunerita xisto; (vi) Granito Furnas; (vii) andalusita-biotita -muscovita xisto.

i) Clorita-(Granada)-Anfibólio-Biotita Xisto

O clorita-(granada)-anfibólio-biotita xisto, localizado na zona de *hangingwall* (capa), apresenta coloração esverdeada, estrutura foliada (Figura 6-A e B), textura porfiroblástica e matriz predominantemente lepidoblástica fina definida por cristais de biotita (Figura 6-C). É composto, em quantidades variáveis, por biotita, hastingsita, granada (as vezes ausente), clorita, grunerita, magnetita, turmalina, apatita e monazita como acessório.

A foliação principal é definida como S_{n+1} , com resquícios da foliação pretérita S_n , preservada no interior de cristais de hastingsita e granada por inclusões alinhadas. A foliação S_{n+1} no geral ocorre plano paralela, com porções crenuladas a anastomosadas, contornando porfiroblastos de granada pré a S_{n+1} . Também são comuns porções com bandamento composicional composto por intercalações entre bandas granoblásticas compostas por quartzo e bandas lepidoblásticas composta por cristais de biotita e anfibólio orientados (Figura 6-D).

O anfibólio presente compõe até cerca de 20% dessas rochas e inclui cristais de hastingsita e grunerita. A hastingsita é formada em dois estágios, sendo o primeiro S_{n+1} , formando cristais prismáticos orientados segundo a foliação, de coloração verde e forte pleocroísmo em tons de verde azulado. Apresenta muitas inclusões de monazita granular envolta por halos pleocróicos de coloração marrom e, geralmente, é parcialmente substituída por biotita e grunerita ao longo de planos de clivagem ou fraturas (Figura 6-E). A segunda geração de hastingsita é identificada como pós- S_{n+1} e ocorre como porfiroblastos prismáticos discordantes da foliação principal ou como substituição pervasiva em cristais de grunerita.

A grunerita apresenta cristais aciculares incolores e ocorre geralmente como substituição de cristais de hastingsita ou em *fronts* de alteração pervasiva discordantes da foliação, compondo uma textura decussada (Figura 6-F).

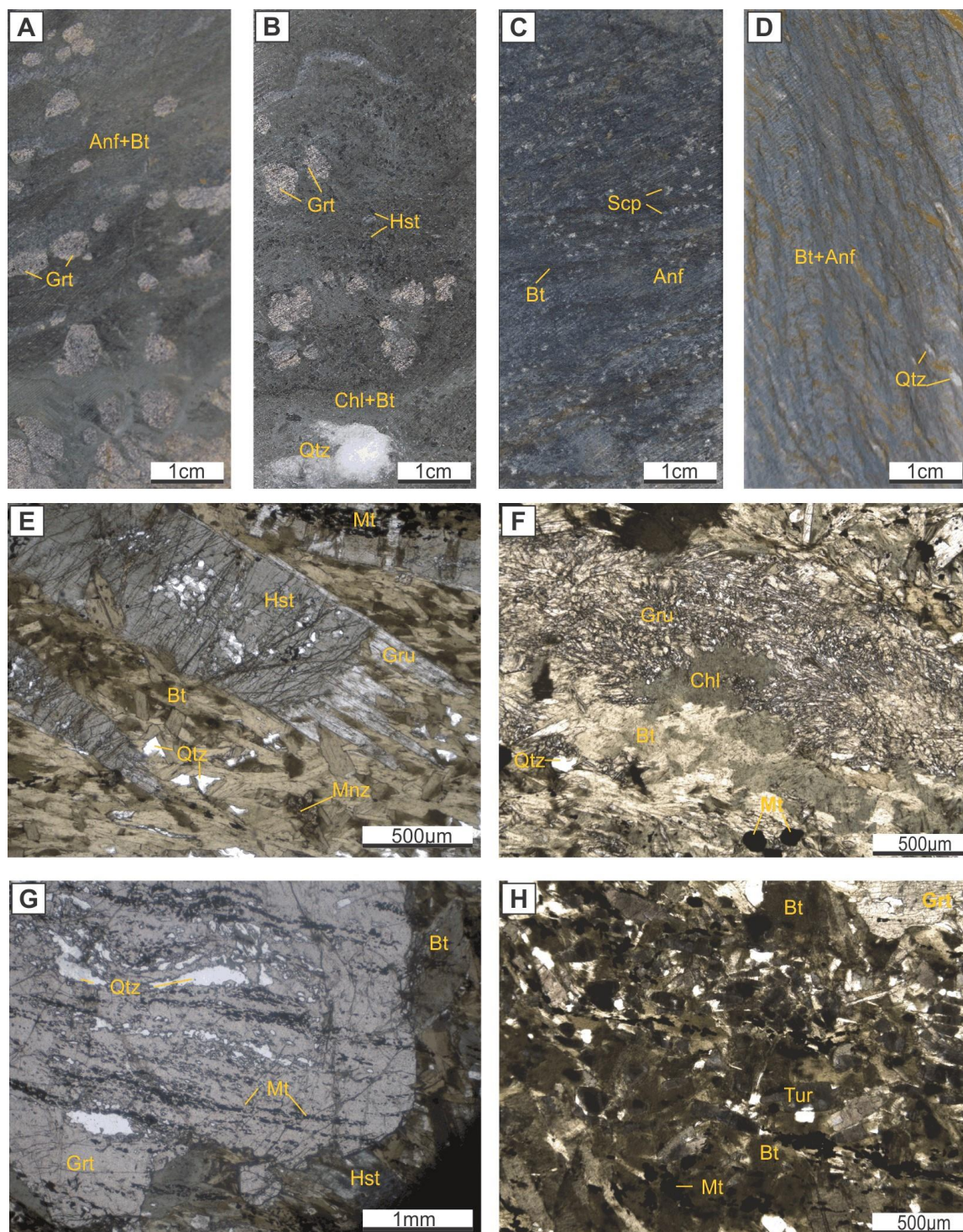


Figura 6. Aspectos macroscópicos do clorita-(granada)-anfibólio-biotita xisto. (A) Foliação do clorita-(granada)-anfibólio-biotita xisto marcada pela orientação de biotita e anfibólios, e porfiroblastos de granada. (B) Porfiroblastos de granada e hastingsita em matriz constituída por clorita, biotita e anfibólio, com lentes deformadas de quartzo. (C) Porfiroblastos de escapolita em uma matrizfoliada definida pela orientação de biotita e anfibólios. (D) Foliação crenulada definida pela orientação de biotita e anfibólios, com lentes de quartzo intercaladas. Aspectos microscópicos do clorita-(granada)-anfibólio-biotita xisto em luz polarizada transmitida. (E) Porfiroblasto de hastingsita com bordas substituídas por grunerita em meio a uma matriz composta por biotita com inclusões de monazita e cristais de magnetita orientados (PD). (F) *Front* de grunerita em meio a uma matriz composta por biotita parcialmente cloritizada (PD). (G) Porfiroblasto de granada com inclusões orientadas de quartzo e magnetita em uma matriz composta por biotita e hastingsita (PD). (H) Cristais de turmalina, biotita e magnetita orientados segundo a foliação Sn+1 (PD). Abreviações: Bt = biotita, Grt = granada, Mt = magnetita, Hst = hastingsita, Anf = anfibólio, Qtz = quartzo, Scp = escapolita, Gru = grunerita, Mnz = monazita, Tur = turmalina.

Mnz = monazita, Qtz = quartzo, Gru = grunerita, Hst = hastingsita, Tur = turmalina, PD = polarizadores descruzados

A biotita perfaz até cerca de 30% da rocha e ocorre principalmente definindo a foliação principal, com cristais subidioblásticos lamelares finos, de coloração marrom acastanhada, geralmente substituídos por clorita pós-(Sn+1).

A granada, quando presente, ocorre como porfiroblastos xenomórficos a subidioblásticos de 4 mm a 7 mm, muitas vezes com formato de amêndoa. São pré a sin-(Sn+1) e preservam a foliação Sn no seu interior, definida pela orientação de inclusões de opacos, grunerita e quartzo (Figura 6-G). Grande parte dos opacos correspondem à magnetita e apresentam hábito cúbico.

O quartzo ocorre como *ribbons*, em cristais isolados na matriz e em inclusões na granada, com cristais xenomórficos apresentando bordas lobadas, com migração de borda de grão e forte extinção ondulante.

Como acessórios de origem hidrotermal ocorrem cristais subidioblásticos de turmalina dispostos ao longo da foliação (Figura 6-H) e cristais de apatita geralmente inclusos em porfiroblastos de granada, além de cristais de magnetita idioblástica cúbica. Também são comuns cristais xenoblásticos de escapolita, dispersos na matriz e posteriores a Sn+1, associados a *fronts* de clorita. Grande parte destes cristais encontram-se intensamente sericitizados.

ii) *Hastingsito*

Localizado na zona de *hangingwall* (capa), o hastingsito apresenta coloração esverdeada, estrutura foliada e granulação fina a média. É composto quase que totalmente por cristais de hastingsita que variam de poucos milímetros até 0,5 cm (Figura 7-A) e, subordinadamente, por opacos (em geral magnetita), quartzo, biotita, clorita e grunerita, que resultam de alteração pervasiva da matriz e dos cristais de hastingsita, além de turmalina e monazita como acessórios (Figura 7-B a D).

Os cristais de hastingsita são idioblásticos prismáticos a xenoblásticos, apresentam coloração esverdeada e forte pleocroísmo em tons azulados. Possuem em grande parte inclusões de opacos, monazita e quartzo, marcando uma foliação anterior (Sn; Figura 7-E) e localmente apresentam textura fibrorradiada (Figura 7-F). Localmente os cristais de hastingsita encontram-se substituídos por biotita e grunerita, principalmente nas suas bordas e ao longo de fraturas (Figura 7-G e H).

A biotita apresenta hábito lamelar, coloração marrom e define a foliação principal Sn+1. Em geral, ocorre associada a *fronts* de grunerita e quando alterada é substituída por cristais de clorita de coloração verde clara e cor de interferência em tons de cinza. A grunerita ocorre localmente substituindo a hastingsita e preenchendo fraturas, ou como

alteração pervasiva em *fronts*. Quando ocorre de forma pervasiva na matriz, a grunerita apresenta um hábito fibroso e é orientada ou disposta em cristais fibrorradiados. Cristais de quartzo apresentam contatos retilíneos, migração de borda de grão e extinção ondulante.

Como acessório são identificados cristais de monazita granulares de 0,04 mm a 0,15 mm, geralmente inclusos em cristais de biotita e hastingsita, apresentando halos pleocróicos em tons escuros e acastanhados.

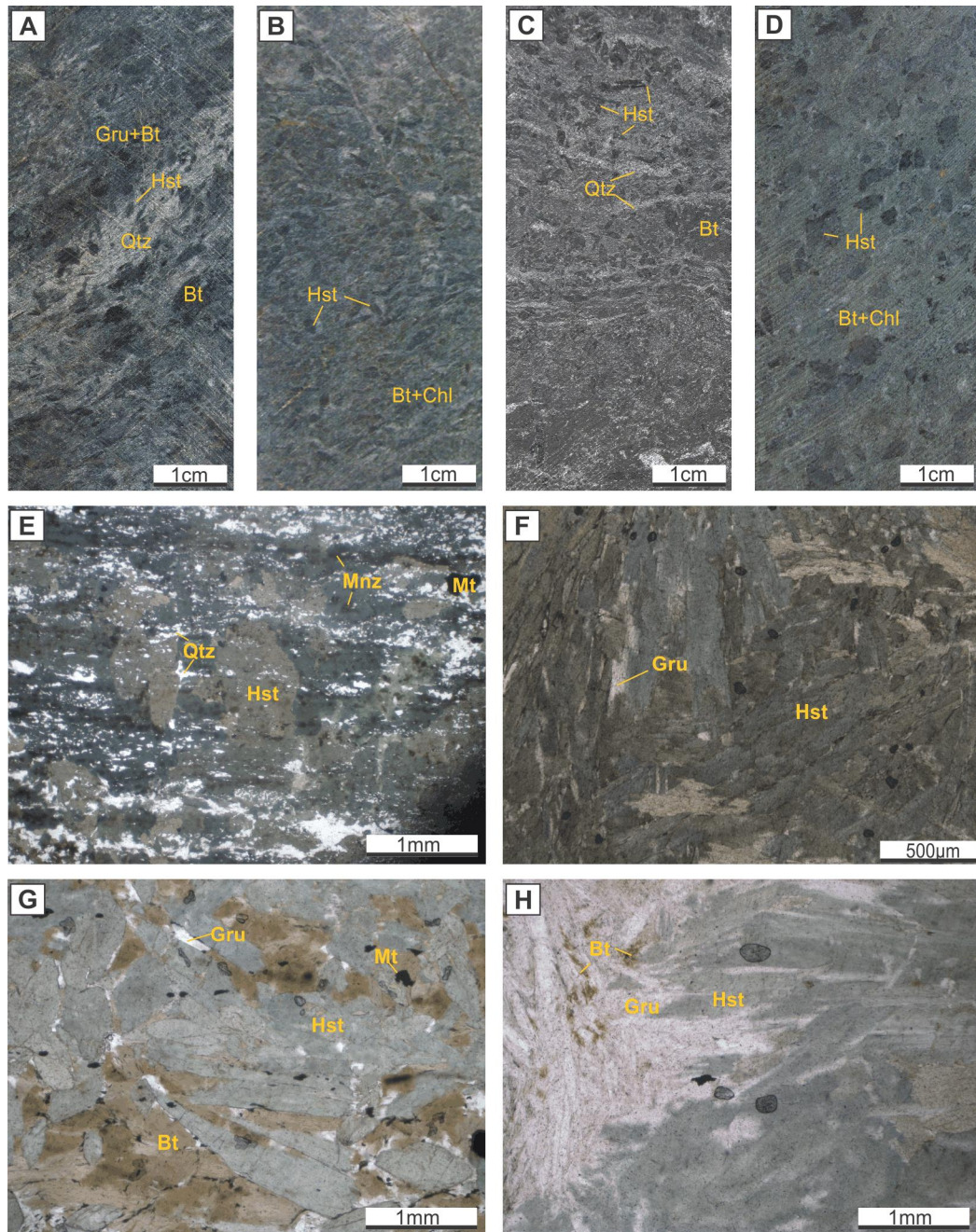


Figura 7. Aspectos macroscópicos do hastingsito. (A) Porfiroblastos de hastingsita em meio a uma matriz composta por biotita e grunerita. (B) Porfiroblastos prismáticos de hastingsita em meio a uma matriz composta por biotita e clorita. (C) Porfiroblastos prismáticos de hastingsita em meio a uma matriz composta por intercalações entre bandas de biotita e clorita e bandas de quartzo. (D) Porfiroblastos prismáticos de hastingsita em meio a uma matriz composta por biotita e clorita. Aspectos microscópicos do hastingsito em luz polarizada transmitida. (E) Inclusões orientadas de quartzo, monazita e magnetita em porfiroblastos de hastingsita (PD). (F)

Porfiroblastos de hastingsita com porções substituídas por grunerita, disposto de forma fibrorradiada (PD). (G) Porfiroblastos de hastingsita em meio a um *front* de biotita (PD). (H) *Front* de grunerita substituindo bordas de porfiroblastos de hastingsita (PD). Abreviações: Bt = biotita, Qtz = quartzo, Gru = grunerita, Has = hastingsita, Mt = magnetita, Mnz = monazita, PD = polarizadores descruzados.

iii) *Clorita-grunerita xisto*

O clorita-grunerita xisto ocorre na zona de *hangingwall* (capa) próximo à zona mineralizada. Apresenta coloração cinza esverdeada, matriz fina e leve bandamento composicional definido por intercalações entre bandas compostas por grunerita e bandas compostas por clorita definindo a foliação principal S_{n+1} (Figura 8-A e B). É composto por grunerita, clorita, quartzo, magnetita e titanita como acessórios.

A foliação principal S_{n+1} milonítica é bem marcada, principalmente pela orientação dos cristais de clorita e grunerita e pelo alinhamento de cristais idioblásticos de magnetita, com porções anastomosadas e apresentando *ribbons* e lentes de quartzo estirado.

A grunerita compõe cerca de 35% da rocha, é incolor, apresenta hábito acicular, ocorre orientada segundo a foliação milonítica e em partes com textura decussada. Duas gerações de grunerita podem ser identificadas nas amostras. A mais antiga define a foliação principal, com cristais menores que variam de 0,1mm a 0,5mm e encontram-se predominantemente orientados e apresentam zoneamento composicional marcado pela variação de cores de birrefringência da borda para o centro dos cristais. A geração mais tardia apresenta cristais maiores, de até 1mm, discordantes da foliação principal e alguns cristais com geminação polissintética (Figura 8-C).

A clorita é $\text{sin-}(S_{n+1})$ e define a foliação principal ocorrendo em cristais lamelares orientados de coloração verde clara, levemente pleocróicos e com birrefringência em tons de cinza esverdeado, compondo cerca de 35% da rocha.

O quartzo ocorre como lentes, cristais intersticiais ou bolsões isolados e envoltos por cristais de clorita e grunerita aciculares (Figura 8-D), muitas vezes com textura decussada e fibrorradiada irradiada das bordas para o centro dos bolsões de quartzo, como textura de preenchimento (Figura 8-E). Os cristais de quartzo apresentam contatos lobados, migração de borda de grão e forte extinção ondulante.

Como acessório a magnetita é $\text{sin-}(S_{n+1})$, ocorre idioblástica com hábito cúbico a xenomórfica, orientada e estirada, definindo a foliação principal.

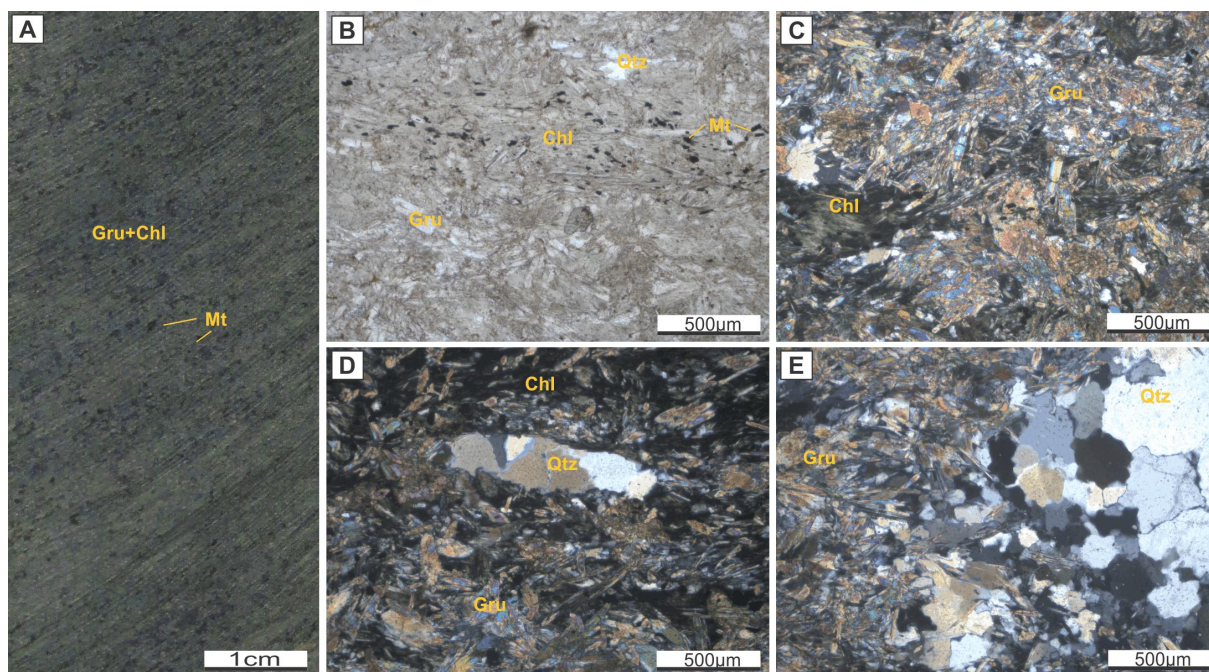


Figura 8. Aspectos macroscópicos do clorita-grunerita xisto. (A) Porfiroblastos de magnetita em meio à matriz composta por grunerita e clorita. Aspectos microscópicos do clorita-grunerita xisto em luz polarizada transmitida. (B) Matriz composta por bandas de grunerita e bandas de clorita com cristais de magnetita orientados (PD). (C) Cristais de grunerita decussados, com cristais tardios discordantes a foliação e *front* de clorita (PC). (D) Bolsão de quartzo em meio a uma matriz composta por clorita e grunerita (PC). (E) Bolsão de quartzo envolto por um *front* de grunerita apresentando cristais aciculares crescendo em direção ao centro do bolsão (PC). Abreviações: Qtz = quartzo, Gru = grunerita, Chl = clorita, Mt = magnetita, PC = polarizadores cruzados, PD = polarizadores descruzados

iv) *Granada-Biotita xisto*

Localizado na zona de *hangingwall* (capa), o granada-biotita xisto representa rochas intensamente hidrotermalizadas e caracterizadas pela intensa alteração potássica pervasiva e formação de granada (Figura 9-A a D). Possui coloração cinza, estrutura foliada a milonítica e leve bandamento composicional, apresentando porções com textura lepidoblástica definida por cristais de biotita, com granada associada e porções predominantemente granoblásticas constituídas por quartzo (Figura 9-E). É composto por quantidade variáveis de quartzo, plagioclásio, biotita, granada, clorita, monazita, magnetita e sulfetos disseminados e em vênulas, principalmente bornita e calcopirita.

A foliação principal S_{n+1} é anastomosada a crenulada, definida pela orientação da biotita sin-deformacional, de hábito lamelar e coloração marrom a verde acastanhada (Figura 9-F). A biotita compõe cerca de 35% da rocha, apresenta granulação que varia de fina a média e apresenta grande quantidade de cristais arredondados de até 0,01mm de monazita envoltos por halos pleocróicos em tons de castanho escuro.

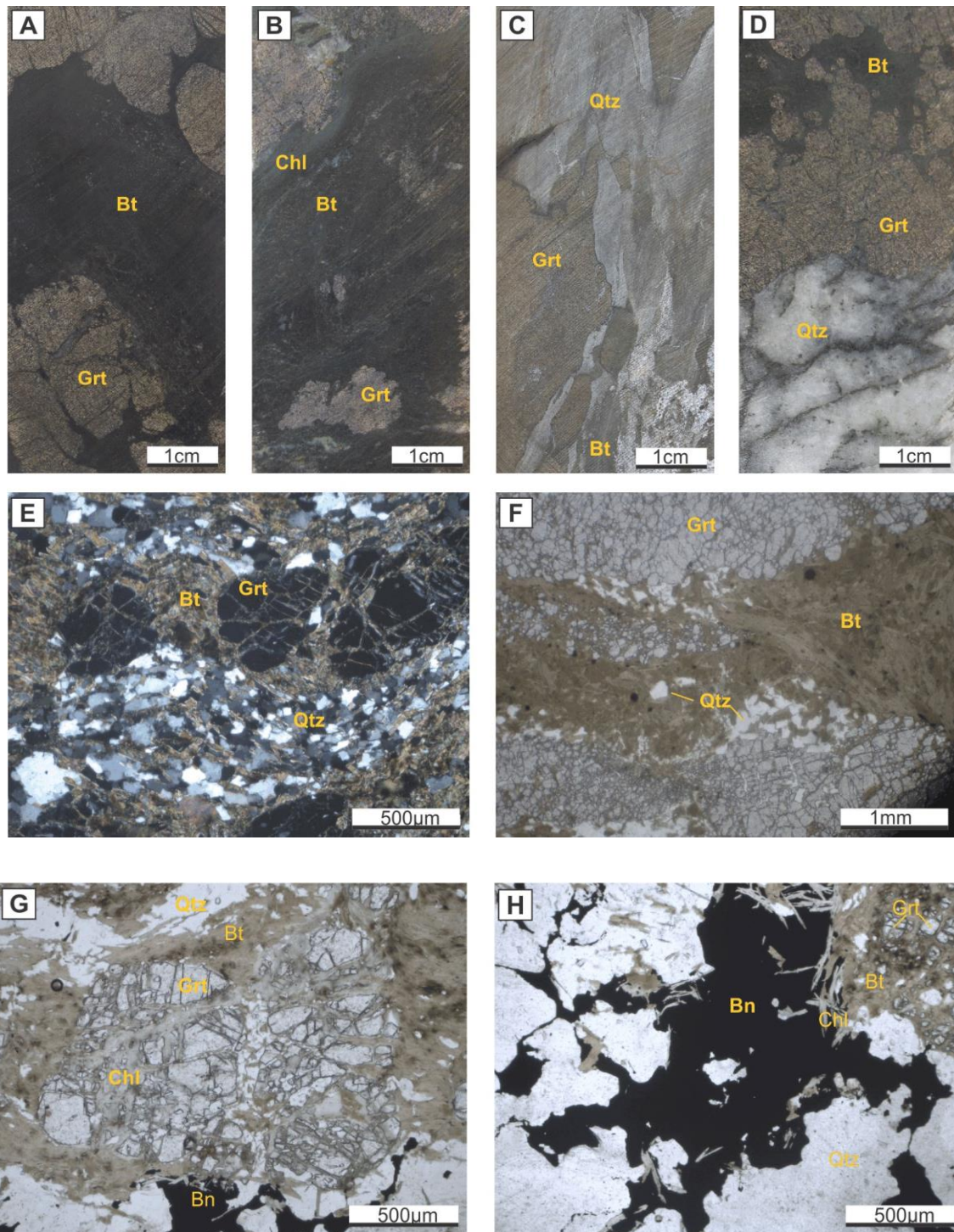


Figura 9. Aspectos macroscópicos do granada-biotita xisto. (A) Porfiroblastos de granada coalescente em uma matriz composta por biotita. (B) Porfiroblastos de granada em uma matriz de biotita e *fronts* de clorita. (C) *Front* de biotita associado a silicificação envolvendo porfiroblastos de granada. (D) Porfiroblastos de granada coalescente em uma matriz de biotita cortada por uma zona de silicificação. Aspectos microscópicos do granada-biotita xisto em luz polarizada transmitida. (E) Porfiroblastos de granada em uma matriz com lentes de quartzo dobradas e intercaladas a lentes de biotita (PC). (F) *Front* de biotita envolvendo aglomerados de cristais de granada estirados segundo a foliação principal (PD). (G) Porfiroblasto de granada com fraturas preenchidas por clorita em meio a uma matriz composta por biotita e quartzo com bornita associada as zonas ricas em quartzo (PD). (H) Bornita xenomórfica associada a zonas ricas em quartzo e a cristais de clorita, cortando a matriz

composta por biotita e porfiroblastos de granada (PD). Abreviações: Qtz = quartzo, Grt = granada, Chl = clorita, Bt = biotita, Bn = bornita, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.

A clorita quando presente, é lamelar a placóide, variando de verde a incolor. A geração de clorita com coloração esverdeada, leve pleocroísmo e birrefringência em tons cinza azulado substitui as bordas de cristais de biotita e é tardia, pós-(S_{n+1}), associada a estruturas rúpteis, enquanto a clorita incolor e de hábito placóide ocorre associada a sulfetos dispostos ao longo da foliação principal e é sin-(S_{n+1}).

A granada ocorre como cristais arredondados xenoblásticos muito fraturados de até 5mm ou como porfiroblastos xenoblásticos com formas de amêndoa de até 1cm. No geral os cristais de granada encontram-se estirados ao longo da foliação principal e envoltos e preenchidos ao longo das fraturas por cristais de biotita e clorita (Figura 9-G). A granada chega a compor cerca de 25% da rocha e apresenta inclusões de quartzo.

O quartzo, compõe cerca de 15% da rocha e ocorre em vênulas e em lentes anastomosadas intercaladas às lentes de biotita (Figura 9-E). Em geral, os cristais são xenomórficos, com bordas lobadas, formação de subgrão e forte extinção ondulante. Associados aos domínios quartzosos ocorrem cristais de plagioclásio hidrotermal (cerca de 10%), xenoblásticos a subidioblásticos, sem geminação polissintética e com extinção ondulante e levemente sericitização.

Sulfetos, tais como bornita e calcopirita, ocorrem disseminados na matriz, em geral, alongados e dispostos ao longo da foliação principal e associados a clorita, quartzo e cristais de magnetita (Figura 9-H).

v) *Granada-Grunerita xisto*

O granada-grunerita xisto localiza-se na zona de *hangingwall* (capa) e é caracterizado pela intensa alteração hidrotermal com *fronts* de grunerita e formação de granada associada. Apresenta coloração cinza clara esverdeada, estrutura maciça, textura porfiroblástica e matriz lepidoblástica definida pela orientação de cristais de grunerita (Figura 10-A a 10-D). É composto por porfiroblastos e aglomerados de granada e uma matriz constituída por quartzo, plagioclásio, grunerita, clorita e biotita.

A foliação principal S_{n+1} é milonítica, em geral planar com porções anastomosadas, principalmente amoldadas a porfiroblastos de granada (Figura 10-E). É definida e composta por *fronts* de grunerita e granada associada. A grunerita é sin-(S_{n+1}), compõe cerca de 35% da rocha e apresenta cristais aciculares, incolores, orientados a decussados, podendo apresentar geminação polissintética.

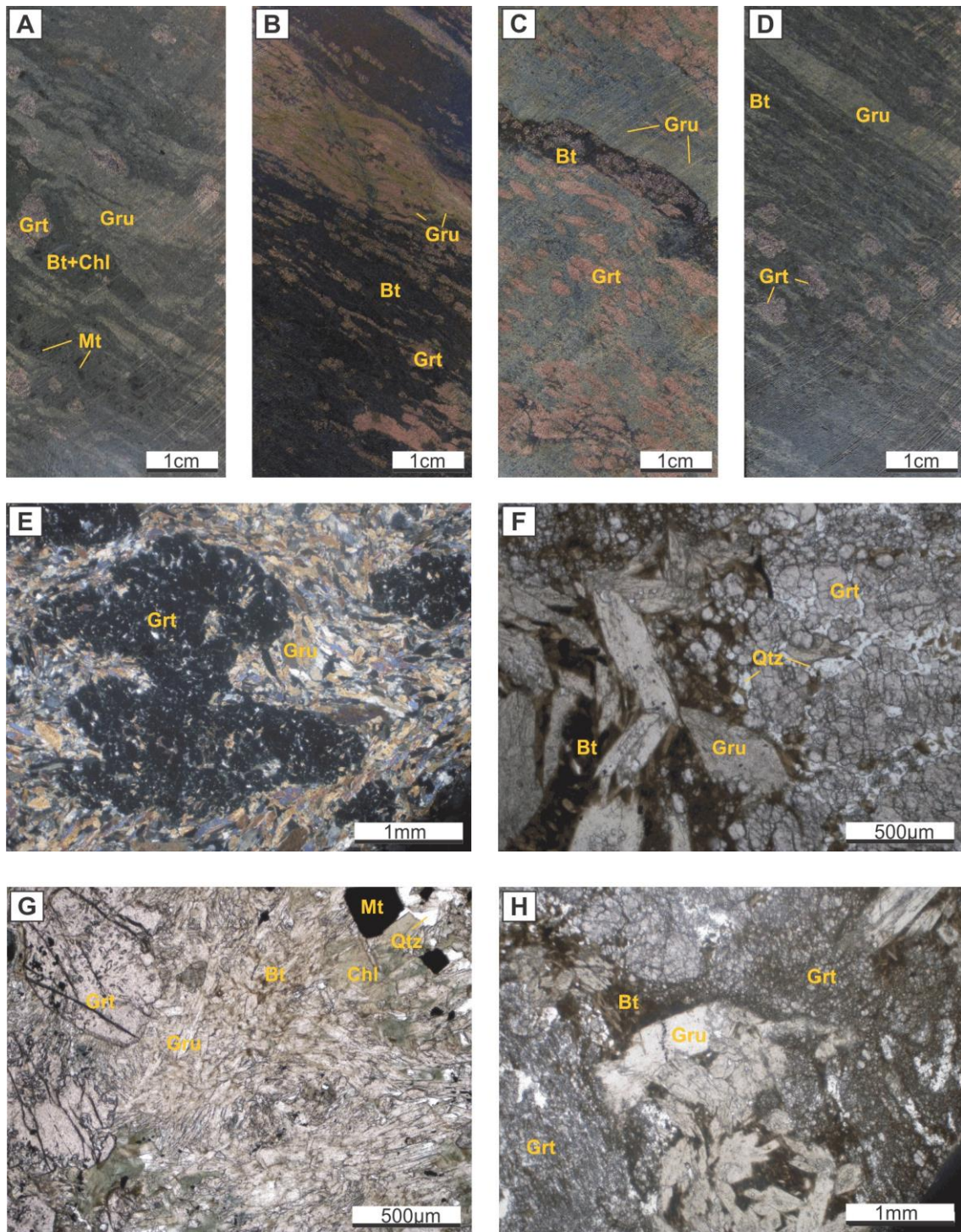


Figura 10. Aspectos macroscópicos do granada-grunerita xisto. (A) Porfiroblastos de granada em uma matriz composta por intercalações entre bandas de biotita e clorita e bandas compostas por grunerita. (B) Foliação definida por lentes de grunerita e porfiroblastos de granada estirada intercalados com lentes de biotita. (C) Porfiroblastos de granada estirados ao longo da foliação definida pela orientação de cristais de grunerita e um *front* de biotita concordante com a foliação. (D) Porfiroblastos de granada em uma matriz foliada definida pela intercalação entre lentes de grunerita e lentes de biotita. Aspectos microscópicos do granada-grunerita xisto em luz polarizada transmitida. (E) Foliação definida por cristais de grunerita anastomosada e amoldada em torno de porfiroblastos de granada (PC). (F) Matriz composta por cristais prismáticos de grunerita e aglomerados de granada em meio a um *front* de biotita (PD). (G) Porfiroblastos de granada em meio a uma matriz composta por grunerita, biotita e cristais idioblásticos de magnetita, com cristais de biotita parcialmente substituídos por clorita

(PD). (H) Matriz composta predominantemente por aglomerados de granada com *fronts* de grunerita parcialmente substituída por biotita (PD). Abreviações: Gru = grunerita, Grt = granada, Bt = biotita, Mt = magnetita, Qtz = quartzo, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.

A biotita, quando presente, ocorre em *fronts* associada a grunerita, com hábito lamelar, coloração acastanhada, geralmente como alteração das bordas dos cristais de grunerita (Figura 10-F), também apresentando substituição por clorita lamelar, de coloração verde clara e leve pleocroísmo (Figura 10-G).

A granada ocorre como porfiroblastos de 0,5 mm a 2 mm, ou como aglomerados de cristais granulares de até 0,3mm, chegando a constituir até 70% da rocha (Figura 10-H). Os porfiroblastos são pré a sin-(Sn+1), com a foliação principal composta por grunerita e biotita, amoldada envolta dos porfiroblastos e fraturas preenchidas por biotita e clorita.

O quartzo compõe cerca de 10% da rocha e ocorre intersticial ou como lentes sigmoidais e anastomosadas, com cristais xenomórficos, contatos subpoligonizados, formação de subgrão e forte extinção ondulante. Associados ao quartzo ocorrem cristais de plagioclásio idióblásticos tabulares a subidióblásticos, com bordas dissolvidas e apresentam geminação polissintética tipo lei da albita, ocorrem principalmente intersticiais a cristais de granada.

vi) *Granito Furnas*

Intercalado aos xistos anfíbolíticos e aos xistos aluminosos, o Granito Furnas ocorre intensamente alterado e deformado. Possui coloração cinza claro, granulação média a grossa, e apresenta uma intensa alteração pervasiva com *fronts* de clorita e grunerita (Figura 11-A a C). Quando pouco alterado, segundo Santos (2014), o Granito Furnas assemelha-se a um hornblenda-biotita monzogranito associado ao *Stock Geladinho*. As amostras analisadas, no geral, são compostas por quartzo, plagioclásio, feldspato potássico, clorita, grunerita, hastingsita, biotita, epidoto, allanita e carbonato como acessório.

A matriz quartzo-feldspática é composta por cerca de 30 % de cristais de albita xenomórficos, formados em duas gerações. A primeira geração é de origem ígnea e apresenta cristais com ausência de geminação polissintética, intensamente sericitizados, enquanto a segunda geração, de origem hidrotermal, é sin-deformacional, com cristais geminados, geralmente deformados, com moderada sericitização nas bordas (Figura 11-E). O feldspato potássico compõe cerca de 30% da matriz e apresenta cristais xenomórficos de feldspato potássico, de origem ígnea, moderadamente alterados.

O quartzo compõe cerca de 30% da rocha e ocorre xenomórfico em bolsões, *ribbons* e lentes alongadas segundo a foliação. Poucos cristais apresentam contatos retilíneos,

sendo mais comum cristais com bordas lobadas, migração de borda de grão e forte extinção ondulante (Figura 11-F).

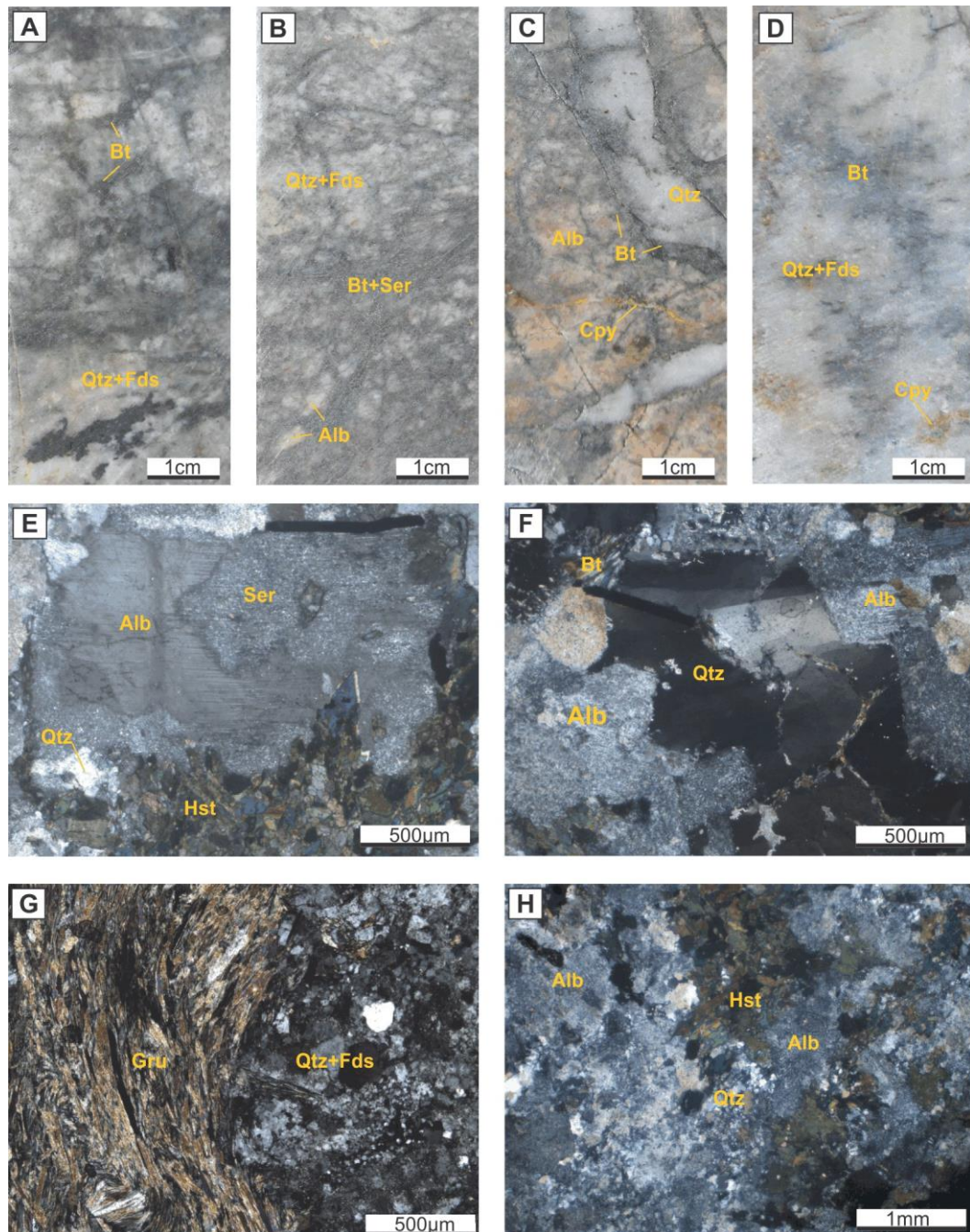


Figura 11. Aspectos macroscópicos do Granito Furnas. (A) Alteração potássica com formação de biotita em veios e pervasiva na matriz. (B) Alteração pervasiva do Granito Furnas com a sericitização do feldspato ígneo e alteração potássica em veios e pervasiva na matriz. (C) Veios discordantes de quartzo leitoso, *infills* de biotita e albitização de origem hidrotermal. (D) Alteração pervasiva do Granito Furnas devido a formação de biotita e calcopirita disseminada na matriz. Aspectos Microscópicos do Granito Furnas em luz polarizada transmitida. (E) Porfiroclasto de albita ígnea sericitizada, com geminação apagada e *front* de hastingsita (PC). (F) Matriz do Granito Furnas alterada e deformada, com quartzo com migração de borda de grão e extinção ondulante e cristais de albita sericitizados (PC). (G) Front de grunerita substituindo a matriz do Granito Furnas (PC). (H) Alteração sódic-cálcica da matriz com formação de hastingsita e cristais de albita sericitizados (PC). Abreviações: Gru = grunerita, Qtz = quartzo, Alb = Albita, Bt = biotita, Ser = sericita, Hst = hastingsita, Cpy = calcopirita, PC = polarizadores cruzados.

A grunerita ocorre em *fronts* de alteração pervasiva (Figura 11-G), principalmente substituindo cristais de biotita associados a *fronts* de alteração potássica anteriores, com cristais prismáticos a aciculares e incolores, com até 0,5 cm, orientados a decussados com aspectos fibrorradiados. A clorita, assim como a biotita, é de origem hidrotermal, ocorrendo como resultado de alteração pervasiva sin a pós-(S_{n+1}). A clorita é muitas vezes posterior a biotita e ocorre principalmente substituindo-a.

Cristais de hastingsita também ocorrem em *fronts* de alteração pervasiva (Figura 11-H) sin a pós-(S_{n+1}), com cristais idioblásticos prismáticos a xenomórficos de até 5mm, de coloração verde azulada e forte pleocroísmo, muitas vezes substituídos por biotita.

vii) *Andalusita-Biotita-Muscovita xisto*

Localizado na zona de *footwall* (lapa), o andalusita-biotita -muscovita xisto apresenta coloração cinza a cinza esverdeado, granulação fina a média, é foliado e apresenta textura porfiroblástica e matriz lepidoblástica. É composto por andalusita, biotita, muscovita, quartzo, plagioclásio, granada e, subordinadamente, clorita, magnetita, epidoto, estaurolita. Apresenta pirrotita, calcopirita e bornita disseminados e em veios (Figura 12-A a 12-D).

A foliação principal S_{n+1} apresenta um padrão anastomosado a crenulado, constituindo clivagem de crenulação (S_{n+2}) definida pelo crescimento de cristais de muscovita (Figura 12-E). No geral, a S_{n+1} é definida pela orientação de biotita e muscovita lamelar, além de *ribbons* e lentes alongadas de quartzo (Figura 12-F). A foliação pretérita S_n é identificada preservada como inclusões orientadas em porfiroblastos de andalusita.

Os porfiroblastos de andalusita são pré a sin-(S_{n+1}), apresentam coloração branca a bege com leve pleocroísmo rosa e ocorrem com hábito tabular a xenoblástico (Figura 12-G). O porfiroblastos variam de 0,5 a 2mm, apresentam muitas inclusões orientadas de quartzo, biotita, magnetita e pirrotita, além de, em grande parte, ocorrerem com bordas alteradas por biotita e muscovita (Figura 12-H).

A biotita é lamelar, de coloração marrom avermelhada, varia de 0,03 mm a 0,5 mm, apresenta inclusões de monazita com halos pleocróicos em tons de marrom escuro. Compõe cerca de 30% da matriz da rocha, definindo a foliação S_{n+1} , assim como em uma geração mais tardia, substituindo as bordas dos porfiroblastos de andalusita. Assim como a biotita, os cristais de muscovita orientados definem a foliação principal e tardiamente substituem as bordas dos cristais de andalusita, além de definir as clivagens de crenulação, crescendo nos planos axiais das dobras. Compõe cerca de 30% da matriz e apresenta cristais lamelares de 0,05mm a 0,6mm.

O quartzo ocorre em lentes e *ribbons* ou em cristais intersticiais na matriz. Compõe cerca de 15% da rocha, com cristais xenomórficos com forte extinção ondulante, bordas lobadas e formação de subgrão. Associados aos bolsões e lentes de quartzo ocorrem

cristais de plagioclásio xenoblásticos com extinção ondulante, em geral, sem geminação polissintética e em grande parte intensamente sericitizados.

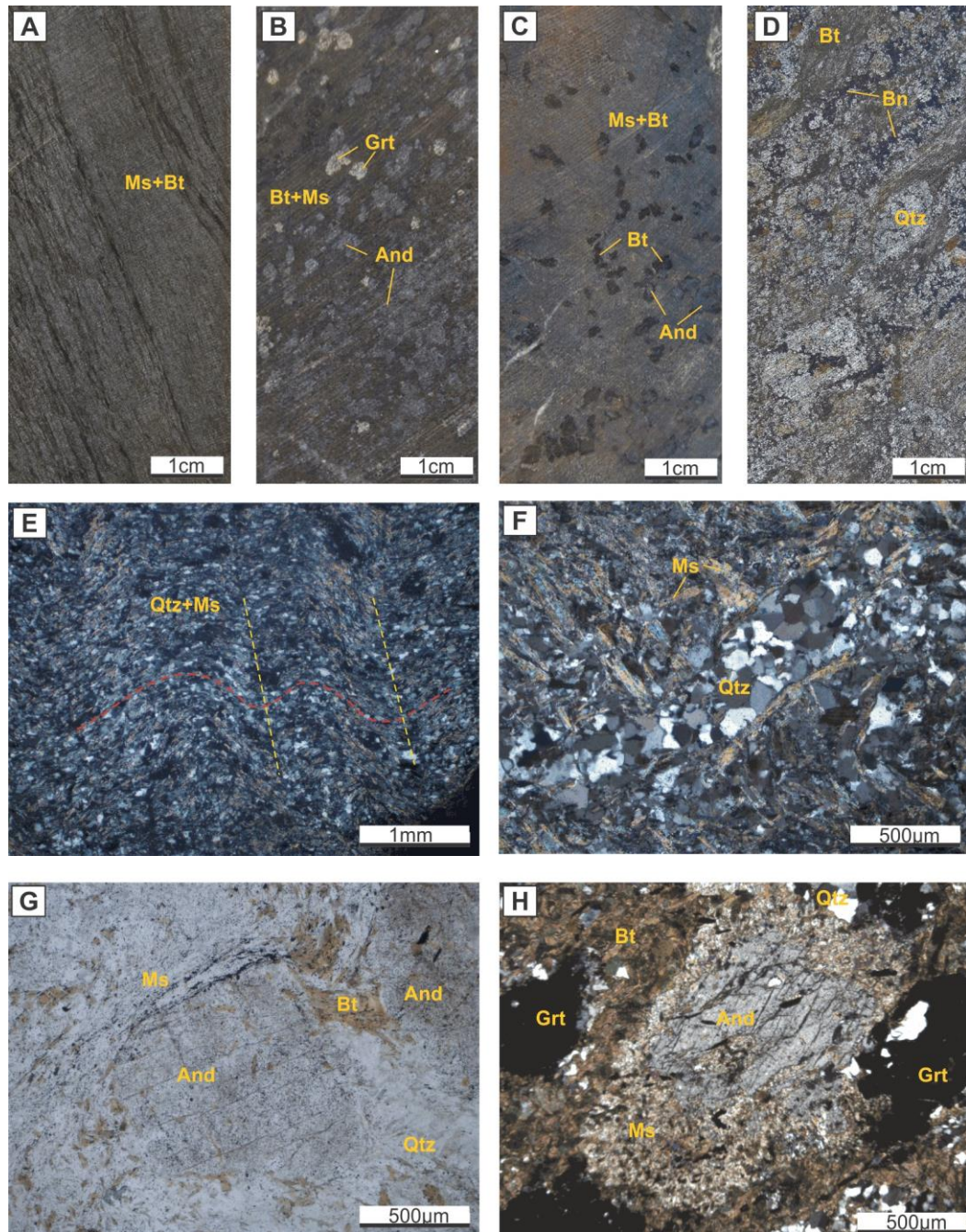


Figura 12. Aspectos macroscópicos do andalusita-muscovita-biotita xisto. (A) Foliação milonítica definida por bitoita e muscovita. (B) Porfiroblastos de granada e andalusita em meio a uma matriz composta por biotita e muscovita. (C) Porfiroblastos de andalusita com bordas substituídas por biotita. (D) Bornita em veios cortando a matriz concordante a foliação principal associada a zonas de silicificação. Aspectos microscópicos do andalusita-muscovita-biotita xisto em luz polarizada transmitida. (E) Foliação crenulada em vermelho, com formação de clivagem de crenulação (Sn+2) em amarelo (PC). (F) Lente de quartzo deformada segundo a foliação (PC). (G) Porfiroblastos de andalusita de coloração branca em uma matriz composta por muscovita, biotita e quartzo (PD). (H) Porfiroblasto de andalusita com bordas alteradas para muscovita e biotita e porfiroblastos de granada em uma matriz composta por biotita (PC). Abreviações: And = andalusita, Ms = muscovita, Bt = biotita, Bn = Bornita, Grt = granada, PC = polarizadores cruzados, PD = polarizadores descruzados.

A granada, nem sempre presente, representa cerca de 5% da rocha e ocorre como porfiroblastos arredondados pré a sin-(Sn+1), que variam de 0,1 mm a 4 mm, com muitas inclusões de biotita e quartzo e geralmente fraturados; ou como agregados de cristais granulares de até 0,9mm, dispostos em lentes estiradas segundo a foliação.

A estaulolita ocorre dispersa na matriz associada e substituída por biotita e muscovita, apresenta coloração bege clara com pleocróismo amarelado característico, são pré-(Sn+1) e encontram-se deformados apresentando extinção ondulante.

Sulfetos, incluindo bornita e calcopirita, ocorrem paralelos à foliação principal, comumente deformada e dobrada.

5.2.2. Setor NW

Referente ao setor NW, foram descritas macroscópica e microscopicamente amostras referentes às sondagens FD 120 e FD 128. A partir da interpretação das descrições foram definidos os seguintes litotipos: (i) quartzito a quartzo milonito; (ii) biotita-muscovita-epidoto xisto; (iii) rocha calciossilicática; (iv) clorita-biotita-(granada) xisto; (v) biotita-anfibólio xisto; (vi) formação ferrífera bandada (BIF) e (vii) Granito Furnas.

i) Quartzito a quartzo milonito

Correspondente a porção mais rasa da zona de *hangingwall* (capa), o quartzito a quartzo milonito é maciço a foliado, com foliação milonítica, coloração cinza esbranquiçada e granulação fina a muito fina (Figura 13-A a D). É composto principalmente por quartzo granular a sacaroidal, com epidoto, albita, feldspato potássico e clorita, além de biotita, óxido de manganês e hematita subordinados, comumente marcando a foliação.

A matriz quartzosa (cerca de 65% da rocha) ocorre em geral com aspecto anastomosado, composta por bolsões sigmoidais a lentes estiradas com cristais xenomórficos, delimitados por cristais lamelares de clorita (Figura 13-E). As lentes e sigmoides apresentam significativa variação de granulação, de 0,03mm a 0,4mm, com cristais que apresentam bordas lobadas, extinção ondulante e migração de borda de grão (Figura 13-F).

Ao longo da foliação milonítica ocorrem aglomerados de cristais xenoblásticos a granulares de epidoto (cerca de 10% da rocha), sin a pós-(Sn+1), que variam de 0,01 a 1mm (Figura 13-G). Na matriz também ocorrem cristais subeuédricos tabulares de albita (10%) e feldspato potássico (5%), com cerca de 0,05 mm. Os cristais de albita encontram-se com bordas arredondadas e apresentam geminação polissintética, enquanto os cristais de feldspato potássico encontram-se associados a cristais de epidoto, apresentando bordas arredondadas, ausência de geminação e feições de deformação (Figura 13-H).

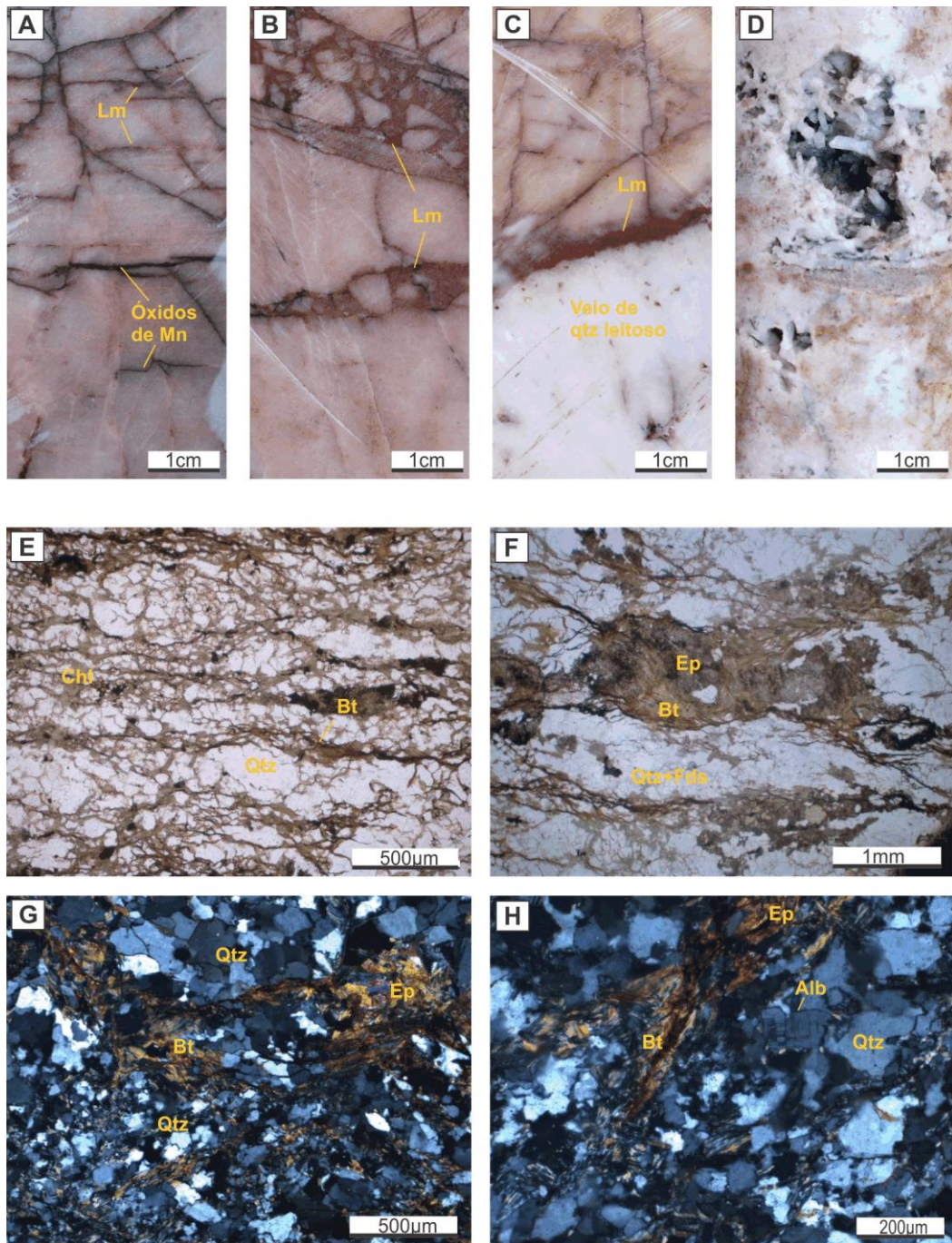


Figura 13. Aspectos macroscópicos do quartzito a quartzo milonito. (A) Óxidos de manganês e limonita marcando os planos da foliação e de fraturas discordantes. (B) Brechas hidrotermais com preenchimento de limonita. (C) Veio de quartzo leitoso discordante da foliação do quartzito com precipitação de limonita no contato entre o veio e a rocha encaixante. (D) Drusas de quartzo piramidal em meio a veios de quartzo leitoso discordantes a foliação do quartzito. Aspectos microscópicos do quartzito a quartzo milonito. (E) Foliação anastomosada marcada por cristais de biotita e clorita (PD). (F) Cristais de epidoto xenoblástico em meio a foliação definida por biotita e lentes de quartzo e feldspato (PD). (G) Variação da granulometria do quartzo e feldspato de uma banda em relação a outra (PC). (H) Cristais de albita associados aos aglomerados de epidoto (PC). Abreviações: Qtz = quartzo, Lm = limonita, Ep = epidoto, Alb = albita, Bt = biotita, Chl = clorita, Fds = feldspato, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.

A biotita compõe cerca de 15% da rocha e define a foliação principal. Apresenta hábito lamelar, coloração acastanhada, varia de 0,04 a 0,15 mm, e em grande parte encontra-se substituída por clorita. A clorita lamelar a fibrosa, compõe cerca de 10% da rocha e apresenta cristais de coloração verde clara, levemente pleocróicos a incolor, com birrefringência anômala em tons de cinza azulado, que variam de 0,02 a 0,3 mm.

Este pacote de rochas apresenta variações muito marcantes, com porções intensamente milonitizadas marcada pela presença de minerais estirados, bolsões de quartzo sigmoidais e anastomosado, e pela orientação dos cristais de biotita sin-deformacionais, posteriormente cloritizados. Outras porções apresentam feições de recrystalização, com a ocorrência de quartzo leitoso, além de zonas com intenso brechamento da matriz cimentada por limonita, configurando uma estrutura do tipo *stockwork*.

Estruturas rúpteis tardias ocorrem, tais como fraturas discordantes à foliação, preenchidas por limonita e/ou óxido de manganês (Figura 13-A e B), veios de quartzo leitoso tardios e discordantes (Figura 13-C) com grande quantidade de drusas com quartzo prismático, que variam de 2 a 5 cm (Figura 13-D), e feições de dissolução facilmente confundíveis com vesículas.

ii) *Biotita-Muscovita-Epidoto xisto*

Observado como uma lente na zona *hangingwall* (capa) com cerca de 3 m de espessura, o biotita-muscovita-epidoto xisto apresenta coloração cinza escura a esverdeada, estrutura foliada a milonítica com a presença de pares S/C, minerais estirados e sigmoidais (Figura 14-A e C). Apresenta textura predominantemente lepidoblástica definida por cristais de biotita e muscovita, intercalada com bandas de textura granoblástica composta predominantemente por quartzo e epidoto. É composta por muscovita, biotita, quartzo, albita, clinozoisita, clorita, apatita, carbonato e titanita como acessórios, além de sulfetos, principalmente calcopirita, disseminados acompanhando a foliação (Figura 14-B).

A foliação milonítica é definida principalmente pela orientação de cristais de muscovita e biotita. A biotita, que compõe cerca de 15% da rocha, apresenta hábito lamelar, coloração marrom acastanhada, pequenas inclusões de clinozoisita e apatita e está associada à alteração potássica pervasiva. Posterior à formação da biotita, ainda sin-(Sn+1), ocorre a formação da muscovita, que perfaz cerca de 15% da rocha, apresentando hábito placóide, com cristais que variam de 0,05 a 0,3mm que definem a foliação, além de ocorrer substituindo a biotita principalmente ao longo dos planos de clivagem e nas suas bordas (Figura 14-D).

O quartzo (25% da rocha) é anterior à foliação milonítica e ocorre restrito a bandas anastomosadas e *ribbons*, apresenta hábito xenomórfico e cristais de 0,02 a 0,7 mm com rotação de subgrão, contatos lobados e extinção ondulante. Associado às bandas quartzosas ocorrem cristais de albita (3% da rocha) tabulares, subeuédricos, de 0,05 mm, com geminação polissintética. Posterior à geração da foliação milonítica, tem-se a cristalização de epidoto e clinozoisita, que compõem cerca de 25% da rocha, apresentando cristais tabulares a xenomórficos de 0,03 a 0,6 mm.

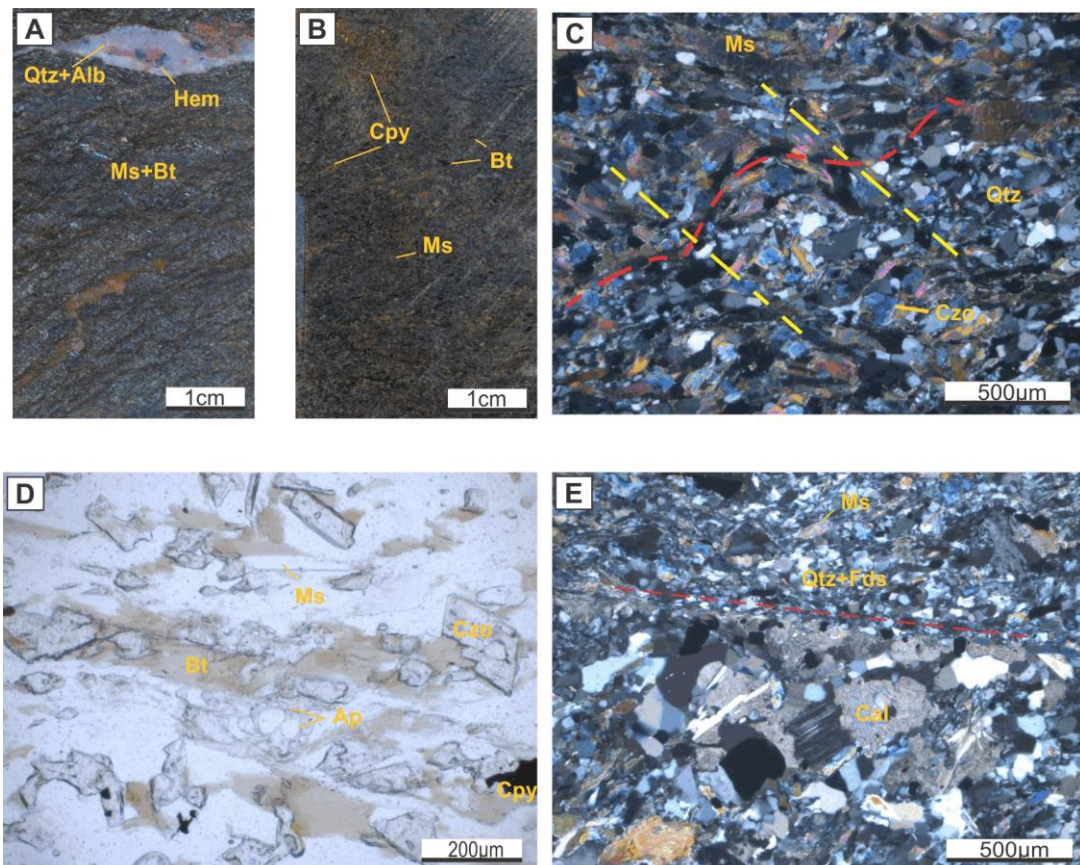


Figura 14. Aspectos macroscópicos do anfibólio-biotita-sericita xisto. (A) Foliação anastomosada definida por muscovita e biotita e veio discordante de albita com hematita associada. (B) Matriz foliada definida por muscovita e biotita com calcopirita disseminada. Aspectos microscópicos do anfibólio-biotita-sericita xisto em luz polarizada transmitida. (C) Foliação milonítica com formação de pares S/C (planos S em vermelho e C em amarelo) definidos por muscovita e biotita (PC). (D) Matriz composta por cristais de quartzo, muscovita, biotita, clinozoisita e aglomerados de apatita. Substituição de cristais de biotita por muscovita (PD). (E) Zona milonitizada a cisalhada (em vermelho) com cominuição dos cristais de quartzo e feldspato limitando cristais de calcita tardios (PC). Abreviações: Cpy = calcopirita, Bt = biotita, Ms = muscovita, Czo = clinozoisita, Ap = apatita, Fds = feldspato, Cal = calcita, Hem = hematita, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.

De origem mais tardia, a clorita tabular e incolor, apresenta birrefringência em tons de cinza, com composição mais magnésiana e ocorre espacialmente associada aos sulfetos disseminados na matriz.

A titanita ocorre como acessório, com cristais xenomórficos granulares, de coloração marrom e forte pleocroísmo, com aproximadamente 0,1mm, dispersos na matriz e principalmente associados a cristais de epidoto e clinozoisita. Cristais subeuédricos arredondados de apatita, dispersos na matriz, variam de 0,05mm a 0,2mm, enquanto cristais xenomórficos a tabulares de carbonato (3% da rocha), de 0,1mm a 0,5mm, são delimitados e cortados por uma zona intensamente milonitizada com intensa deformação dos cristais de quartzo (Figura 14-E), que encontram-se cominuídos e com granulação distinta e inferior ao resto da rocha (0,01mm a 0,1mm).

iii) Rocha Calciossilicática

A rocha calciossilicática é observada na zona de *hangingwall* (capa) como uma lente com espessura aproximada de 30 m, identificada somente em um dos furos estudados. De estrutura foliada, apresenta coloração verde escura a branca, textura porfiroblástica com matriz nemato a granoblástica e granulação fina a média. É composta por porfiroblastos de anfibólio cálcico (Prancha 9-A) e porfiroclastos de quartzo sigmoidais com bordas de albita (Figura 15-A). Sua matriz é constituída por clorita, calcita, epidoto, sulfetos disseminados e apatita como acessório (Prancha 9-B).

Os porfiroblastos de anfibólio (cerca de 15% da rocha) são prismáticos a aciculares e, por vezes, apresentam zoneamento composicional, apresentando bordas compostas por tremolita incolor e centro de actinolita, apresentando leve pleocroísmo em tons de verde pálido. No geral, os cristais variam de 0,05mm a 1mm, são sin a tardi-(Sn+1), apresentando cristais menores orientados e cristais maiores compondo uma textura decussada. Parte destes cristais encontram-se substituídos por calcita, devida a intensa alteração pervasiva entre os planos de clivagem do mineral (Figura 15-E).

A matriz é composta por bolsões de cristais de quartzo (30% da rocha) xenomórficos, de 0,01mm a 1mm, que apresentam migração de borda de grão, formação de subgrão e extinção ondulante. Associado aos bolsões de quartzo ocorrem cristais xenomórficos de albita e feldspato potássico hidrotermais (15%) de 0,05 a 2,5mm, que apresentam bordas lobadas (Figura 15-F).

A matriz quartzo-feldspática apresenta uma alteração carbonática pervasiva intensa, principalmente em *fronts*, com a substituição de grande parte do anfibólio da rocha por calcita, que pode compor quase que 50% da rocha. A alteração carbonática e formação da calcita é sin a tardi-deformacional, apresentando cristais de calcita subeuédricos, levemente deformados, que variam de 0,01 a 1mm. Posterior à formação dos cristais de calcita observa-se *fronts* com clorita lamelar, de coloração verde clara e birrefringência em tons de verde acinzentado, com cristais de cerca de 0,1mm (Figura 15-G).

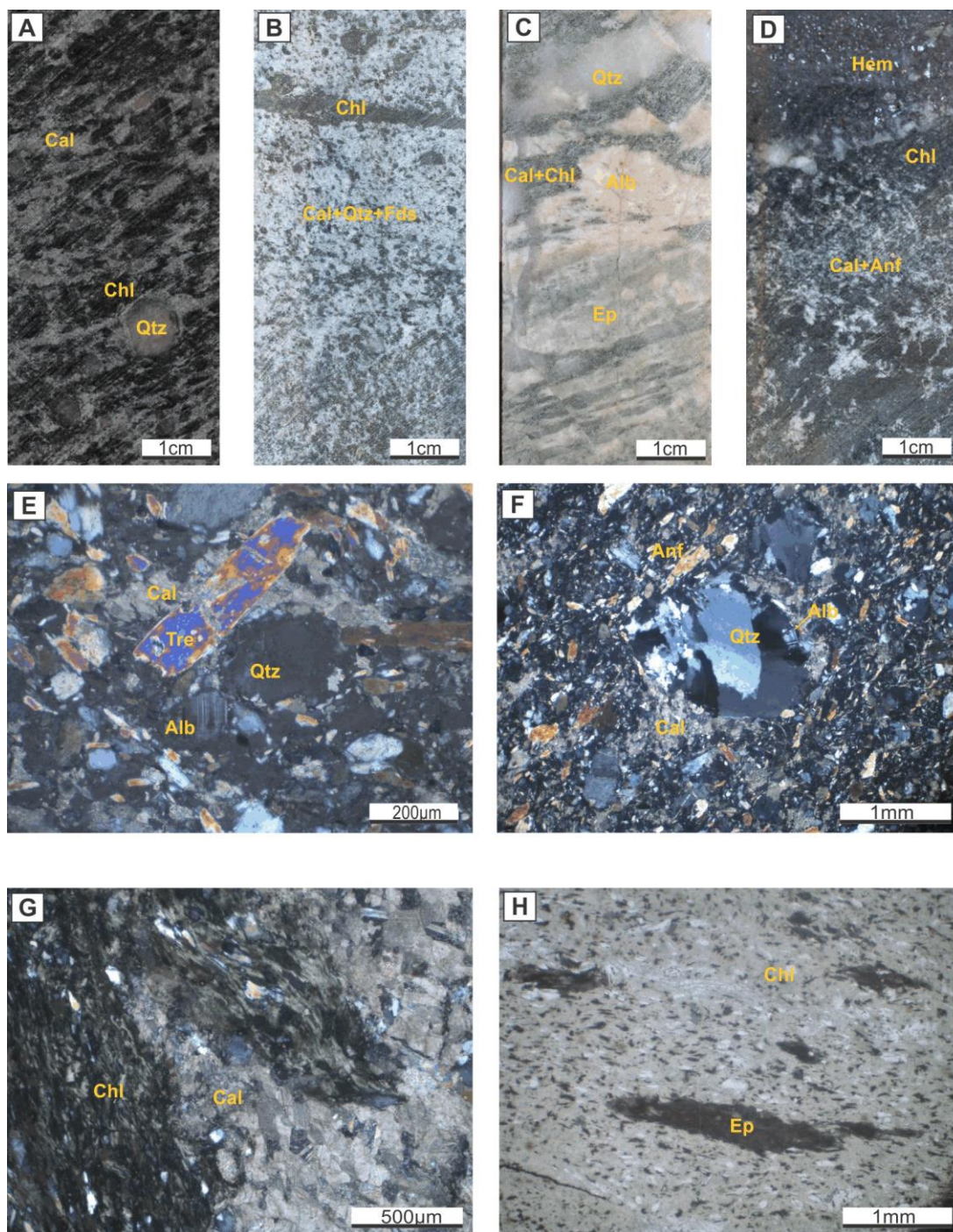


Figura 15. Aspectos macroscópicos da rocha calciossilicática. (A) Porfiroclasto de quartzo envolto por *fronts* de alteração carbonática e lentes cloritizadas. (B) Matriz da rocha calciossilicática composta predominantemente por calcita, quartzo e feldspato com cloritização pervasiva da matriz e em vênulas. (C) Veios deformados e rompidos de abita, quartzo e epidoto hidrotermal cortando a rocha calciossilicática. (D) Veio de hematita (especularita) cortando a rocha calciossilicática formada por calcita, quartzo, tremolita e clorita pervasiva na matriz. Aspectos microscópicos da rocha calciossilicática em luz polarizada transmitida. (E) Porfiroblasto de tremolita com bordas e fraturas substituídas por calcita associada a *fronts* de alteração em uma matriz quartzo-feldspática (PC). (F) Bolsões de quartzo e feldspato e restos de tremolita em meio a *fronts* de alteração carbonática (PC). (G) *Front* de clorita sobrepondo alteração carbonática (PC). (H) Aglomerados de cristais de epidoto xenomórficos associados aos *fronts* de clorita (PD). Abreviações: Ter = tremolita, Alb = albita, Qtz = quartzo, Bt = biotita, Ep = epidoto, Hem = hematita, Cal = calcita, Anf = anfibólio, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.

Associado aos *fronts* de clorita, geralmente no centro desses, ocorrem aglomerados xenomórficos de epidoto (cerca de 10%), com cristais de 0,04 a 2mm (Figura 15-H).

Controladas por estruturas dúcteis-rúpteis ocorrem muitas vênulas discordantes à foliação S_{n+1} , preenchidas por epidoto, albita e quartzo (Figura 15-C), que muitas vezes apresentam-se deformadas e dobradas. Veios de especularita associadas a estruturas rúpteis também são reconhecidos.

iv) *Clorita-Biotita-(Granada) xisto*

O clorita-biotita-(granada) xisto consiste no grupo de rochas mais representativo do setor NW do depósito Furnas e encontra-se fortemente hidrotermalizado, com porções intensamente cloritizadas, silicificadas, epidotizadas, com formação de granada e enriquecimento em ferro. Observado no *hangingwall* e *footwall* (capa e lapa), apresenta coloração cinza esverdeada, estrutura foliada com porções miloníticas e granulação fina a média (Figura 16-A e B). Na zona do envelope da mineralização, apresenta coloração cinza esverdeada, granulação muito fina e estrutura foliada com bandamento composicional definido por lâminas de hematita e magnetita, resultante do intenso enriquecimento em ferro. No geral é composto por quartzo, biotita, clorita, epidoto, granada, com apatita e turmalina subordinada e sulfetos disseminados, em aglomerados e em veios.

A biotita, originada na intensa alteração potássica pervasiva, compõe até cerca de 25% dessas rochas e define a foliação milonítica. Em geral, a biotita é $\text{sin-}(S_{n+1})$ e foi formada em duas gerações. A primeira é representada por cristais muito finos, com coloração verde acastanhada, substituídos por cristais da segunda geração, placóides com bordas retilíneas, de granulação média, coloração marrom acastanhada, com comuns inclusões de monazita granular envoltos por halos pleocróicos de coloração marrom.

A clorita ocorre com pouca expressão e está associada espacialmente aos domínios ricos em granada, onde ocorre envolvendo e preenchendo fraturas dos cristais e substituindo cristais de biotita (Figura 16-I). Os cristais são lamelares de coloração verde clara, apresentam leve pleocroísmo e birrefringência em tons de cinza esverdeado.

O quartzo recristalizado ocorre em lentes estiradas e sigmoidais policristalinas, com origem pré- (S_{n+1}) (Figura 16-J). Apresenta cristais xenoblásticos, com bordas lobadas, migração de borda de grão gradando para formação de subgrão e extinção ondulante. Associado as lentes de quartzo ocorrem cristais de albita hidrotermal referente ao primeiro estágio de albitização. Estes cristais são xenoblásticos com bordas lobadas e geralmente apresentam geminação polissintética, que pode ocorrer apagada. Em porções restritas, a albita apresenta recristalização dinâmica e forte extinção ondulante, além de intensa

sericitização. A segunda geração de albita é límpida e subidioblástica e ocorre como cristais tabulares a prismáticos, identificados em veios e vênulas discordantes.

Quando presente a granada ocorre como agregados de cristais arredondados restritos a bandas ou como porfiroblastos com formas de amêndoas levemente estirados segundo a foliação, chegando a compor cerca de 60% da rocha (Figura 16-C e K). No geral, apresentam interstícios e fraturas preenchidas por biotita, tardiamente cloritizada, com *infills* quartzo-feldspáticos de granulação muito fina associados à formação de magnetita e hematita.

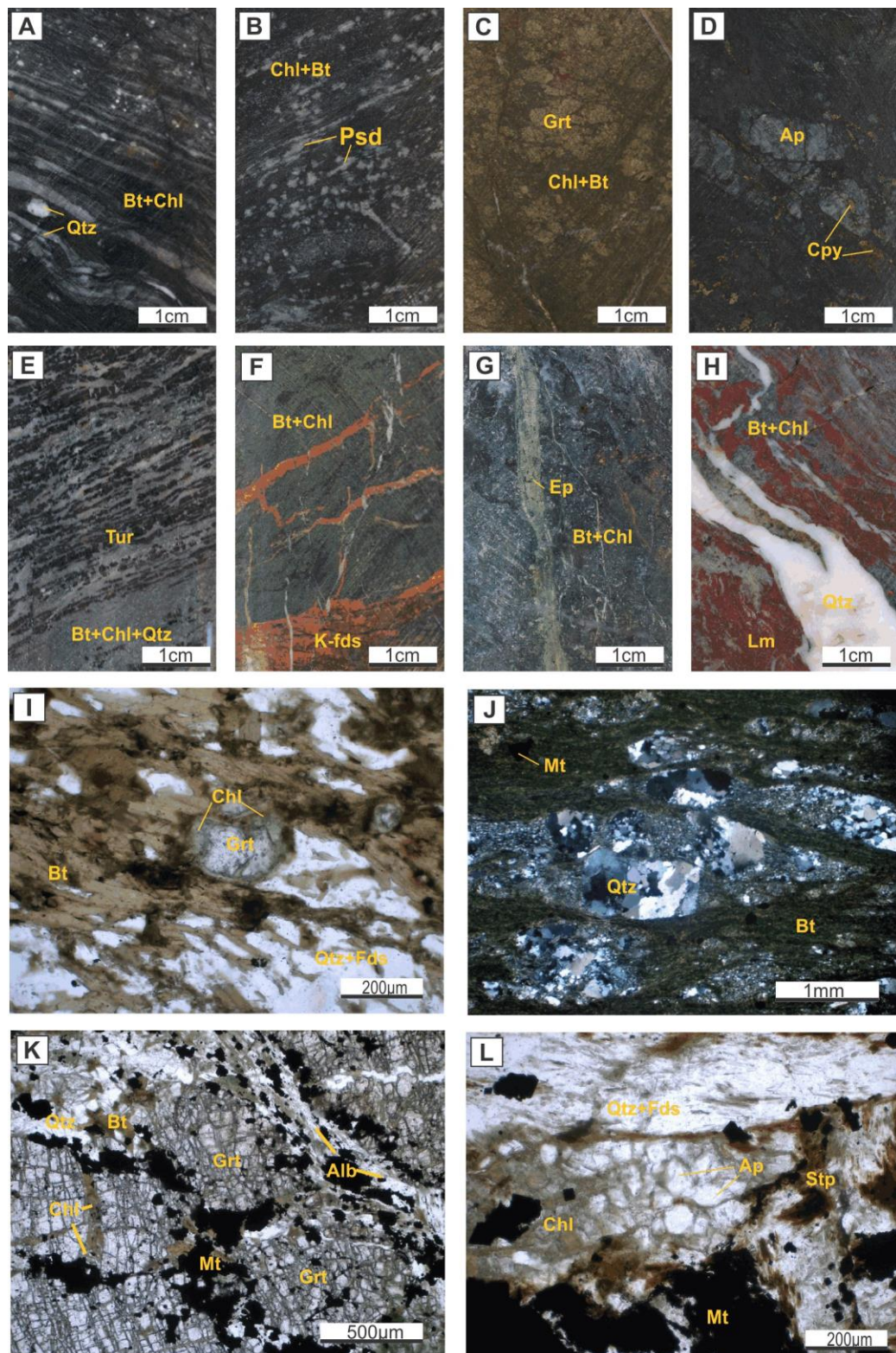
Cristais subidioblásticos a xenoblásticos de magnetita ocorrem dispersos na matriz, atingem até 0,3mm e apresentam feições de dissolução. A quantidade dos cristais de magnetita aumenta conforme a proximidade do envelope da mineralização e intensificação do enriquecimento em ferro.

Subordinadamente ocorrem cristais de apatita, com até 0,2mm, dispostos na matriz como aglomerados (Figura 16-L) ou como inclusões, podendo ocorrer como porfiroblastos tabulares e alongados, de coloração branca e até 5 cm (Figura 16-D). Porfiroblastos de turmalina de coloração verde escura, hábito tabular, orientadas segundo a foliação, são, em grande parte, envoltos e substituídos por biotita e clorita (Figura 16-E e M).

Aglomerados de allanita são comuns, com cristais granulares dispostos ao longo da foliação milonítica, associados aos domínios com intensa formação de biotita. São gerados em um estágio tardio a pós-(Sn+1).

Principalmente na zona de *footwall* (lapa), o anfibólio-biotita-xisto passa a apresentar aglomerados de “ripas” de coloração branca, de até 2mm (Figura 16-B). Estes pseudomorfos de porfiroblastos são posteriores à foliação milonítica e encontram-se intensamente sericitizados, impossibilitando inferir qual mineral se tratava (Figura 16-N).

São comuns estruturas rúpteis, concordantes e discordantes, como vênulas e veios de quartzo, albita, feldspato potássico, epidoto, carbonato, stilpnomelano e especularita associados a sulfetos e porfiroblastos de magnetita (Figura 16-F e G), além de zonas com intensa limonitização paralela à foliação e como cimento em brechas do clorita-biotita-(granada) xisto (Figura 16-H).



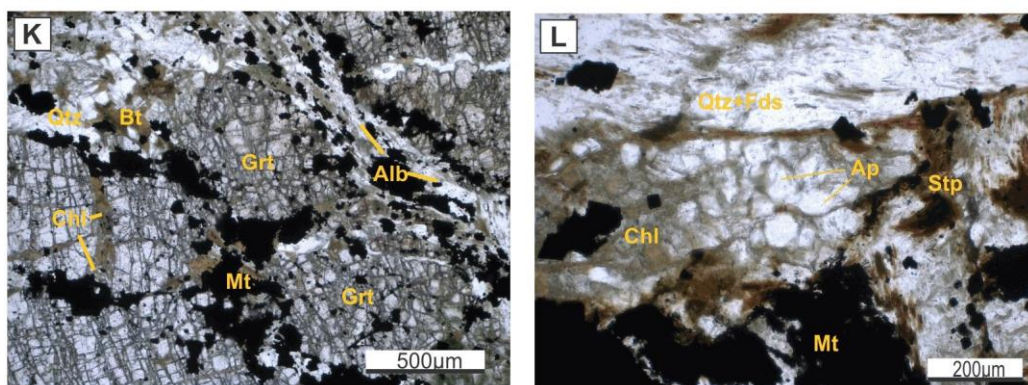


Figura 16. Aspectos macroscópicos do clorita-biotita xisto. (A) Foliação milonítica do clorita-biotita xisto com porfiroclastos de quartzo. (B) Foliação milonítica penetrativa e porfiroblastos sericitizados em uma matriz composta por biotita e clorita. (C) Granada compondo cerca de 60% da matriz do clorita-biotita xisto. (D) Porfiroblastos de apatita na matriz do clorita-biotita xisto, com calcopirita disseminada. (E) Foliação definida pela orientação de porfiroblastos prismáticos de turmalina. (F) Vênulas de feldspato potássico discordantes da foliação do clorita-biotita xisto. (G) Vênula de epidoto tardia cortando a matriz composta por biotita e clorita. (H) Intensa limonitização associada à silicificação seguindo a foliação do clorita-biotita xisto. Aspectos microscópicos do clorita-biotita xisto em luz polarizada transmitida. (I) Porfiroblasto de granada envolto e com fraturas preenchidas por biotita cloritizada (PD). (J) Bolsões sigmoidais de quartzo recristalizado envoltos por biotita compondo a foliação principal com aspecto anastomosado (PC). (K) Matriz composta predominantemente por aglomerados de cristais de granada envoltos por quartzo, albita, biotita e magnetita (PD). (L) Aglomerados de cristais de apatita envoltos por clorita em uma matriz quartzo-feldspática cortada por vênulas tardias de stilpnomelano e cristais xenoblásticos de magnetita (PD). (M) Porfiroblastos de turmalina estirados segundo a foliação principal em uma matriz quartzo-feldspática (PD). (N) Pseudomorfo sericitizado em meio à foliação milonítica composta por biotita e lentes de quartzo e feldspato (PC). Abreviações: Cpy = calcopirita, k-fds = feldspato potássico, Qtz = quartzo, Bt = biotita, Ep = epidoto, Hem = hematita, Mt = magnetita, Pds = pseudomorfo, Tur = turmalina, Chl = clorita, Alb = albita, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.

v) *Biotita-Anfibólio xisto*

O biotita-anfibólio xisto ocorre na zona de *footwall* (lapa) logo abaixo ao envelope de mineralização. Apresenta coloração esverdeada, foliação milonítica com porções dobradas e granulação média a grossa (Figura 17-A e B). É composto por quantidades variáveis de grunerita, hastingsita, clorita, biotita, granada, magnetita, epidoto, feldspato potássico, albita e quartzo.

O pacote de biotita-anfibólio xisto apresenta como anfibólio, predominantemente cristais de grunerita compondo a matriz, com quantidades variáveis de hastingsita associada a *fronts* posteriores. A grunerita, perfaz até cerca de 40% da rocha, apresentando cristais prismáticos a aciculares, de 0,05mm a 4mm, dispostos de forma decussada definindo a foliação Sn+1 (Figura 17-C). Em geral, a grunerita apresenta-se substituída por cristais de

hastingsita, principalmente em suas bordas e ao longo dos planos de clivagem (Figura 17-D).

A hastingsita ocorre em *fronts* tardios (Figura 17-E), principalmente substituindo os cristais de grunerita, em cristais, em geral, euédricos, prismáticos, com coloração verde azulada, muito pleocróicos, atingindo até 1mm.

A biotita ocorre em *fronts* de alteração pervasiva, substituindo principalmente os cristais de hastingsita, em quantidade variáveis (Figura 17-F). Apresenta hábito lamelar a placóide, coloração castanha esverdeada e varia de 0,04 a 0,4 mm. A clorita ocorre em um estágio tardio, principalmente substituindo os cristais de biotita, associada a granada e magnetita e em vênulas tardias discordantes da foliação. Os cristais de clorita são lamelares, de coloração verde clara, pouco pleocróica com birrefringência em tons de cinza esverdeado.

As porções que apresentam matriz quartzo-feldspática são compostos por cristais xenomórficos de quartzo com bordas irregulares, migração de borda de grão e extinção ondulante, além de cristais de feldspato potássico variando de 0,02 a 0,2mm em aglomerados e porfiroblastos de até 3mm, geralmente sericitizados, com hábito tabular a xenomórfico, bordas arredondadas, podendo ou não apresentar geminação polissintética.

A granada, quando presente, ocorre restrita e associada a *fronts* de biotita cloritizada, em aglomerados de cristais granulares de 0,1 a 1mm, envoltos e com fraturas preenchidas por clorita. Os cristais de magnetita, geralmente associados a biotita e hastingsita, apresentam hábito cúbico a xenomórfico e ocorrem intersticiais e intercrescidos a cristais de biotita seguindo os planos de clivagem.

Associados à fase de deformação dúctil-rúptil ocorrem vênulas discordantes à foliação S_{n+1} , muitas vezes deformadas e compostas por quartzo, clorita e albita hidrotermal límpida, com cristais alongados a prismáticos compondo texturas de preenchimento.

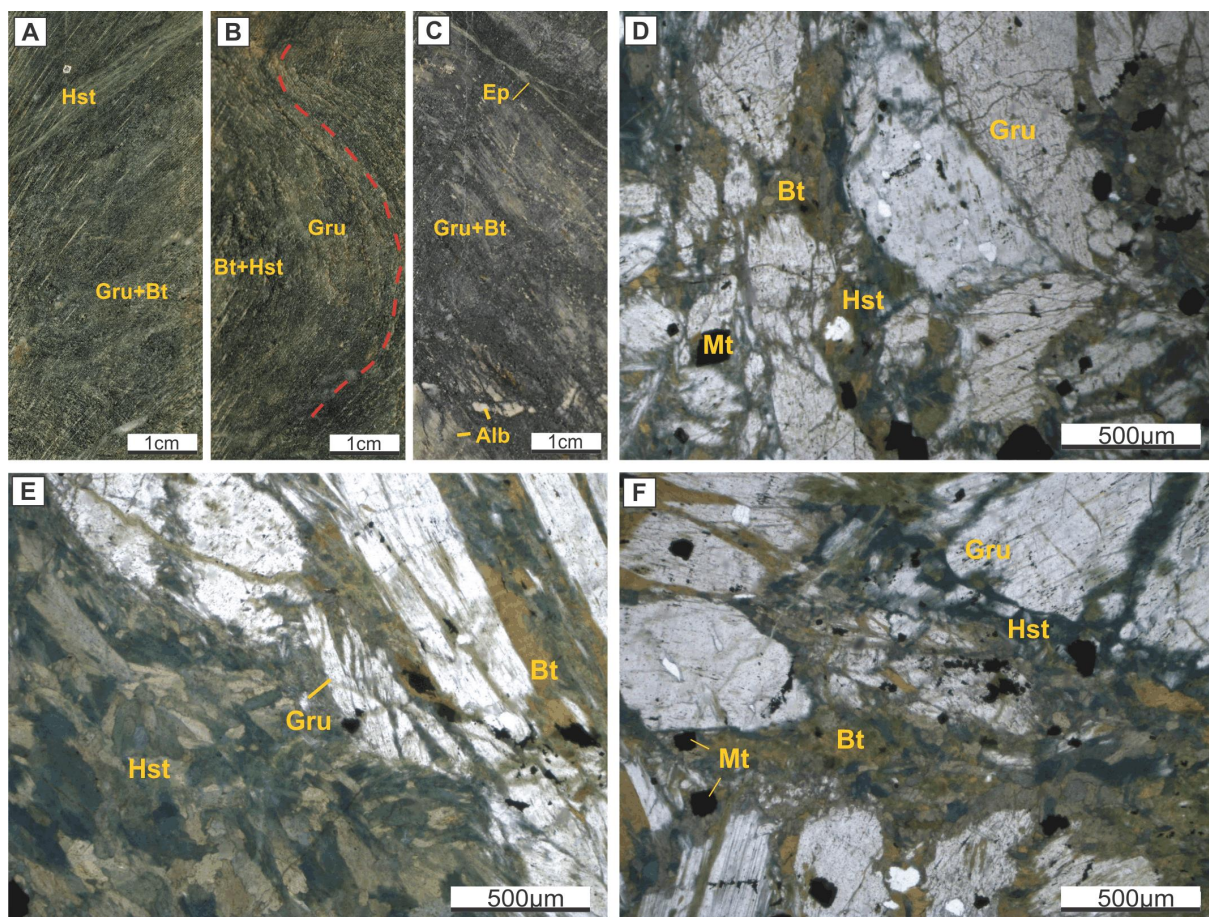


Figura 17. Aspectos macroscópicos do biotita-anfibólio xisto. (A) Foliação marcada pela orientação de cristais de grunerita, biotita e hastingsita. (B) Matriz foliada com lentes de grunerita, biotita e hastingsita compondo a foliação S_{n+1} dobrada (em vermelho). (C) Matriz composta por grunerita e biotita cortada por uma vênula de epidoto concordante a foliação e lentes de albita hidrotermal. Aspectos microscópicos do biotita-anfibólio xisto em luz polarizada transmitida. (D) Substituição da grunerita por hastingsita nas bordas e ao longo dos planos de clivagem (PD). (E) *Front* de hastingsita cortando e substituindo porfiroblastos de grunerita e a hastingsita sendo substituída por biotita (PD). (F) *Front* de hastingsita substituindo porfiroblastos de grunerita, sobreposto por um *front* de biotita (PD). Abreviações: Gru = grunerita, Hst = hastingsita, Bt = biotita, Mt = magnetita, Ep = epidoto, PD = polarizadores descruzados.

vi) Formação Ferrífera Bandada (BIF)

Formação ferrífera bandada ocorre na zona de *footwall* (lapa), logo abaixo da zona mineralizada, em meio à zona de silicificação. Apresenta coloração cinza a cinza esverdeada, estrutura foliada com finas lâminas intercaladas compostas por magnetita e hematita e lâminas constituídas por quartzo e feldspato (Figura 18-A a C e E). A foliação principal é definida como S_{n+1} e ocorre localmente dobrada (Figura 18-D). É composta quase que totalmente por magnetita, hematita, quartzo e feldspato, com clorita, hastingsita, carbonato, apatita, epidoto e monazita subordinados, além de sulfetos, principalmente calcopirita disseminados na matriz e em vênulas.

A matriz é composta, cerca de 35%, por cristais de magnetita, variando de 0,02mm a 0,4mm, formada em duas gerações: a primeira mais antiga ocorre nas finas lâminas como cristais predominantemente xenomórficos e poucos euédricos cúbicos, chegando até 0,2mm, dispostos segundo a foliação, enquanto a geração mais tardia ocorre associada a veios, apresentando cristais cúbicos, chegando até 2mm. A hematita é xenomórfica e compõem cerca de 30% da rocha. Ocorre associada à magnetita e, em grande parte, substituindo-a, constituindo uma feição característica da martitização (Figura 18-F).

A porção quartzosa constitui cerca de 30% da rocha, apresenta cristais xenomórficos, dispostos em aglomerados e em *infills* policristalinos. Em algumas amostras o bulging é predominante, enquanto a maioria das amostras apresentam contatos lobados, migração de borda de grão e forte extinção ondulante. Pouco feldspato potássico e albita são identificados na matriz, ocorrendo somente próximos a zonas com *infills* de carbonato, epidoto e clorita. Em geral, os cristais de feldspato potássico são xenomórficos, com até 0,02 mm e apresentam fraturas substituídas por epidoto.

Cristais de clorita lamelar a xenomórfica, ocorrem em *fronts* de alteração pervasiva, em veios associados a cristais de epidoto e na matriz. Compõem cerca de 15% da rocha, variam de 0,01mm a 0,15mm e apresentam coloração verde clara, pouco a muito pleocróicos e com birrefringência anômala em tons de marrom a cinza arroxado. A hastingsita ocorre subeuédrica a xenomórfica na matriz, em agregados que acompanham a foliação principal. Estes cristais compõem cerca de 5% da rocha, variam de 0,05mm a 0,3mm, com coloração verde azulada e em grande parte apresentam bordas e clivagens cloritizadas (Figura 18-G).

Em estruturas rúpteis tardias concordantes com a foliação ocorrem cristais de carbonato xenomórficos, variando de 0,05mm a 1mm, associados a cristais de albita hidrotermal límpida, xenomórfica alongada, intercrescida das bordas para o centro da fratura, resultando em feições de preenchimento (Figura 18-H), além de cristais de rutilo, aciculares, variando de 0,02mm a 0,15mm e cristais de allanita com bordas de epidoto.

A formação ferrífera bandada apresenta porções silicificadas, além de veios e vênulas rúpteis tardias de quartzo (Figura 18-D), carbonato, epidoto e albita, associados à silicificação, além de uma intensa alteração pervasiva com enriquecimento em ferro formando hematita e magnetita hidrotermais.

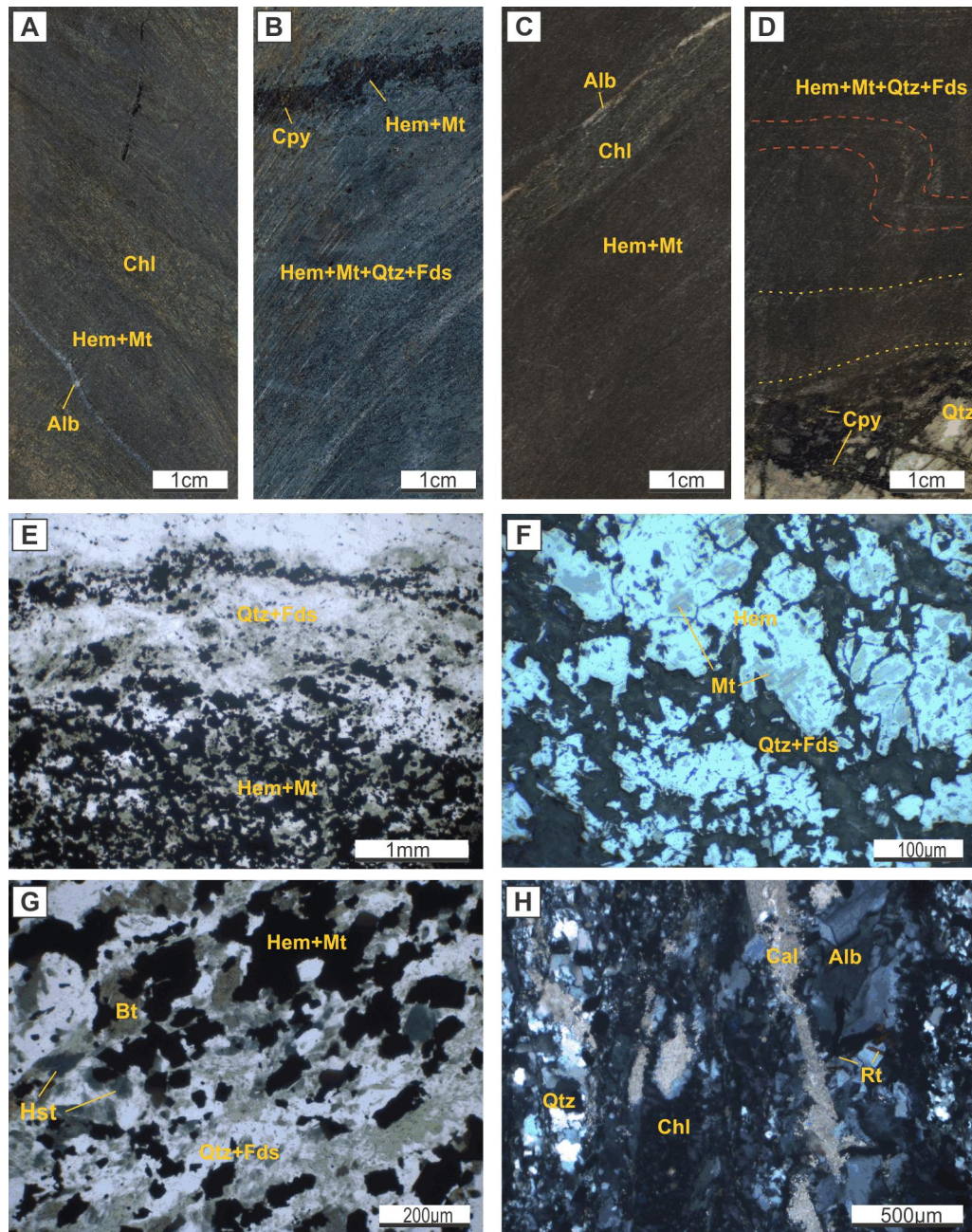


Figura 18. Aspectos macroscópicos da formação ferrífera bandada (BIF). (A) Fino bandamento composicional caracterizado por bandas constituídas por magnetita e hematita e bandas com quartzo, feldspato e clorita, cortadas por vênulas de albita concordantes à foliação. (B) BIF cortada por vênula de hematita e magnetita com calcopirita associada. (C) Matriz da BIF finamente foliada cortada por uma vênula de clorita e albita concordante a foliação. (D) BIF com foliação S_{n+1} dobrada (em vermelho) e cortada por porfiroblastos de calcopirita associada a silicificação. Aspectos microscópicos da formação ferrífera bandada em luz polarizada. (E) Bandamento composicional da BIF (LT) (PD). (F) Textura de substituição de porfiroblastos de magnetita por hematita placóide, martitização (LR). (G) Cristais de hastingsita parcialmente substituída por bioita, dispersos na matriz da BIF (LT) (PD). (H) Vênula de carbonato associada a cloritização, a entrada de albita hidrotermal e cristais de rutilo. Textura de preenchimento de espaços vazios, com a formação de cristais de albita subidioblásticos (LT) (PC). Abreviações: Qtz = quartzo, Alb = albita, Fds = feldspato, Hem = hematita, Mt = magnetita, Rt = rutilo, Chl = clorita, Hst = hastingsita, Cal = calcita, Bt = biotita, Cpy = calcopirita, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados, LR = luz refletida, LT = luz transmitida.

vii) *Granito Furnas*

O Granito Furnas ocorre restrito à base da zona de *footwall* (lapa). Apresenta porções intensamente hidrotermalizadas, com substituição e obliteração total a parcial das feições do protolito, principalmente pela intensa cloritização, alteração potássica e cristalização de granada (Figura 19-A a D). Quando pouco alterado, apresenta coloração cinza clara a esverdeada, estrutura levemente foliada a milonítica e predominante textura granoblástica, e restritas porções lepidoblásticas, definidas pela orientação de cristais de biotita, muscovita e clorita (Figura 19-E). É composto por porções ricas em porfiroclastos de quartzo deformados e estirados seguindo a foliação milonítica e restos de porfiroclastos de feldspato, biotita e clorita hidrotermal, cristais de muscovita de até 1mm, além de sulfetos, principalmente calcopirita, disseminados na matriz. Apresenta composição monzogranítica quando pouco alterado e assemelha-se a um xisto anfibolítico cloritizado quando muito hidrotermalizado.

A matriz quartzo-feldspática reliquiar é observada em bolsões e lentes envoltos por *fronts* de muscovita com biotita e clorita associada (Figura 19-F). Os cristais de quartzo são xenomórficos e apresentam bordas irregulares com migração de borda de grão e forte extinção ondulante. São observados em bolsões, em lentes levemente deformadas e estiradas segundo a foliação, e isolados em porções aglomeradas policristalinas. Em geral, grande parte dos cristais de quartzo encontram-se recristalizados. O feldspato de origem ígnea presente é predominantemente potássico, ocorre em bolsões com cristais xenomórficos ou como porfiroclastos de até 5mm, que encontram-se intensamente alterados. A albita identificada apresenta duas gerações, uma ígnea com porfiroclastos intensamente sericitizados (Figura 19-G) e outra de origem hidrotermal tardia, associados a veios, com cristais subeuédricos que comumente apresentam geminação polissintética.

A muscovita compõe grande parte do que foi observado do Granito Furnas, cerca de 40% da rocha, associada a *fronts* de alteração pervasiva (Figura 19-H), com cristais placóides subeuédricos orientados segundo a foliação milonítica quando presente. Associado à muscovita ocorrem cristais de biotita lamelar a placóide com coloração acastanhada, como alteração pervasiva nas bordas e ao longo dos planos de clivagem substituindo os cristais de muscovita.

Relativo ao estágio mais tardio de alteração, de forma pervasiva ao longo dos planos da foliação ocorrem cristais de clorita lamelar, de coloração verde, levemente pleocróica, com birrefringência anômala em tons de cinza azulado e roxo, indicando composição da variedade clinocloro. Comumente a clorita substitui cristais de biotita e muscovita. Associado à cloritização ocorrem aglomerados de cristais de epidoto de até 0,2mm.

A alteração hidrotermal é intensa nessas rochas, caracterizada por *fronts* de alteração pervasiva com a formação de biotita e clorita e leve epidotização. Conforme a intensidade da alteração hidrotermal aumenta a rocha perde a sua textura e composição granítica gradando para um biotita-clorita milonito.

Estruturas rúpteis tardias são comumente observadas. Em geral, são discordantes à foliação milonítica e encontram-se preenchidas por clorita ou principalmente por cristais subeuédricos de albita límpida hidrotermal, gradando de cristais menores na borda para cristais maiores no centro, com típicas feições de preenchimento e cristais xenomórficos de calcita.

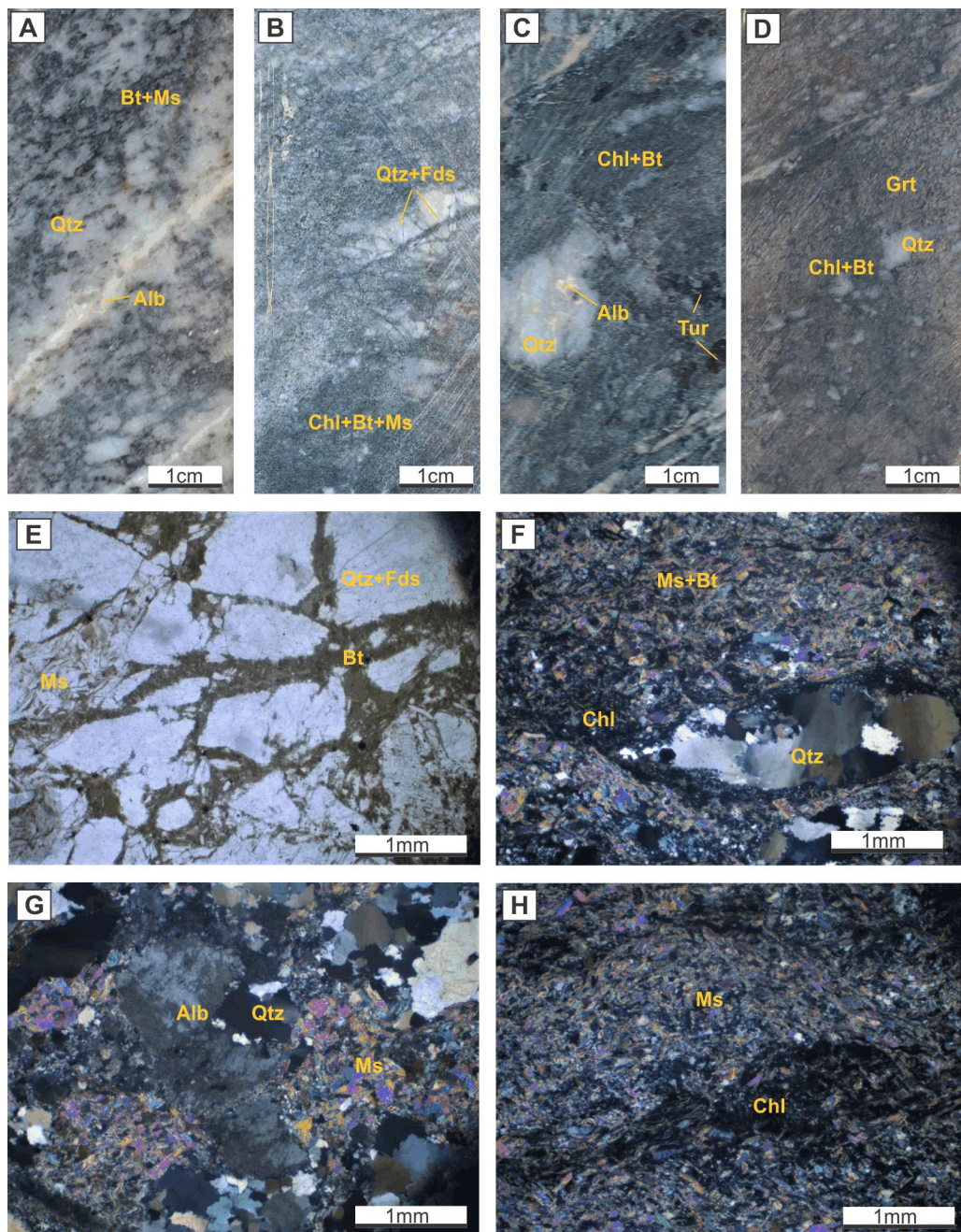


Figura 19. Aspectos macroscópicos do Granito Furnas. (A) Alteração pervasiva do Granito Furnas, formando biotita e muscovita e vênulas de albita hidrotermal. (B) Granito Furnas alterado com *infills* de clorita, biotita e

muscovita. (C) Granito Furnas intensamente cloritizado com bolsões de quartzo e albita hidrotermal e formação de turmalina na matriz. (D) Intensa cristalização de granada obliterando as feições do Granito Furnas. Aspectos microscópicos do Granito Furnas em luz polarizada transmitida. (E) Alteração potássica com formação de biotita brechando e substituindo a matriz do Granito Furnas (PD). (F) *Front* de biotita e muscovita, com cloritização associada isolando bolsões sigmoidais de quartzo recristalizado (PC). (G) Porfiroclastos de quartzo com migração de borda de grão e forte extinção ondulante e albita sericitizada com geminação apagada (PC). (H) *Front* de muscovita com cloritização tardia (PC). Abreviações: Qtz = quartzo, Ms = muscovita, Bt = biotita, Chl = clorita, Alb = albita, Tur = turmalina, Grt = granada, Fds = feldspato, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.

5.3. Caracterização da Alteração Hidrotermal e Evolução Paragenética

A caracterização da alteração hidrotermal observada nos setores SE e NW foi feita a partir da interpretação da relação espacial e temporal entre estruturas e paragéneses minerais, com o intuito de tentar definir e hierarquizar estágios de alteração hidrotermal atuantes no depósito como um todo. Foi possível identificar que a alteração hidrotermal ocorre controlada quase que totalmente por estruturas predominantes na rocha, principalmente a foliação principal (Sn+1), além de estruturas rúpteis como falhas e fraturas, identificadas em vários estágios, desde pré e sin-Sn+1, até tardias, pós-Sn+1.

Comparando-se os dois setores descritos percebe-se que a alteração hidrotermal atuante em cada setor é bem distinta. Nas amostras do setor SE é predominante a alteração potássica pervasiva com formação de biotita e cloritização subordinada associada a *fronts* de grunerita, além de zonas de silicificação associadas com veios mineralizados, principalmente com bornita. Por sua vez, no setor NW a alteração predominante foi a cloritização pervasiva em *fronts*, com alteração potássica subordinada, vista também em veios tardios, seguida por zonas de intensa silicificação relacionada a zonas de falhas, com veios de epidoto e albita associados, além de epidotização pervasiva e seletiva da matriz em porções restritas. Em zonas proximais ao envelope da mineralização, são identificadas zonas com intenso enriquecimento em ferro, associadas a formações ferríferas bandadas.

A caracterização das zonas de alteração identificadas estão descritas a seguir.

5.3.1. Setor SE

As zonas de alteração hidrotermal observadas no setor SE obedecem a uma sequência de eventos que se sobrepõem segundo a evolução dos estágios de alteração e múltiplas entradas de fluidos. O evento inicial é caracterizado por uma intensa albitização, principalmente das porções nas quais ocorrem lentes do Granito Furnas. A albitização foi seguida pelos estágios de silicificação, alteração potássica, formação de granada, alteração sódico-cálcica e enriquecimento em ferro, atuantes em quase todos os litotipos observados.

O estágio mais tardio está associado à deformação dútil e é caracterizado pela formação de *fronts* de clorita pervasiva e veios de hastingsita, associados a veios de biotita, quartzo e albita.

a) Alteração Sódica (albitização)

A albitização ocorre como o primeiro estágio de alteração, caracterizado pela alteração e substituição pervasiva das rochas encaixantes com a formação de albita hidrotermal. Este estágio é bem expressivo e melhor identificado nas rochas do Granito Furnas, onde a alteração sódica oblitera quase que totalmente as feições graníticas pretéritas (Figura 20-A).

A alteração sódica ocorre na forma de *fronts* e bolsões de albita límpida, com cristais xenomórficos, com bordas lobadas, geminação deformada e extinção ondulante. A albitização também é observada em estágios tardios associada a veios e a entrada de sulfetos (Figura 20-B), neste caso, apresentam clara textura de preenchimento e cristais subidiomórficos a xenomórficos (Figura 21-A).

b) Silicificação

A silicificação ocorre de forma intensa neste setor, sendo observada em todas as rochas descritas e com maior expressão na zona do pacote de mineralização e nas rochas do Granito Furnas. A silicificação é observada em mais de um estágio: o primeiro é sin-cinemático em relação ao desenvolvimento da foliação milonítica (S_{n+1}) e ocorre na forma de *infills* e *ribbons* de quartzo policristalino deformados (Figura 21-A) ou em *fronts* de alteração pervasiva, observados com maior intensidade nas rochas do Granito Furnas, que segundo Jesus (2016) obliteram a alteração sódica pretérita. Os cristais de quartzo substituem feições pretéritas, chegando a preservar a foliação principal (Figura 20-C). Em geral apresenta hábito xenomórfico, bordas lobadas, migração de borda de grão e forte extinção ondulante.

O segundo estágio foi mais tardio, relacionado a estruturas rúpteis, e ocorre como veios e vênulas discordantes da foliação (Figura 20-D), associados a sulfetos, principalmente bornita e calcopirita. Este estágio é caracterizado principalmente como fissural, com o quartzo e sulfetos preenchendo espaços abertos.

c) Alteração Potássica (Biotita)

A alteração potássica é a alteração mais expressiva observada nas rochas do setor SE, concomitante a posterior a silicificação (Figura 20-C e D). Ocorre em todas as rochas observadas e é caracterizada pela formação de biotita, principalmente em *fronts* com

alteração pervasiva da matriz e obliterando quase que totalmente feições e substituindo minerais dos protólitos (Figura 20-D e E).

A formação de biotita ocorre proximal ao envelope de minério, tanto na zona de *hanging wall* como na zona de *footwall*, sendo observada em mais de um estágio de geração, definidos por Jesus (2016). O primeiro estágio ocorre concomitante à silicificação e sin-(S_n+1), com *fronts* e substituição pervasiva de anfibólios ao longo da foliação milonítica. A biotita formada neste estágio é lamelar fina, como coloração marrom acastanhada, tipicamente apresentando inclusões de monazita, envoltas por halos pleocróicos de coloração marrom escura.

Um segundo estágio é caracterizado pela formação de biotita lamelar, de coloração castanha avermelhada, um pouco mais grossa que a formada anteriormente, que ocorre substituindo as bordas de porfiroblastos de andaluzita nos xistos aluminosos, em *fronts* substituindo cristais de muscovita (Figura 21-B) e preenchendo fraturas dos cristais de granada. O terceiro estágio refere-se à formação de cristais lamelares mais grossos, castanhos, associados espacialmente às zonas de mineralização, comumente apresentando bordas cloritizadas (Figura 21-C). O último estágio é o mais tardio e está associado a processos rúpteis, ocorrendo na forma de veios e vênulas.

d) Formação de Turmalina

A formação de turmalina ocorre associada à primeira geração de biotita, observada com maior expressão no pacote dos clorita-(granada)-anfíbólio-biotita xisto. Os cristais de turmalina são subidioblásticos prismáticos, de granulação média, com coloração verde azulada e pleocroísmo que grada de verde azulado a tons de rosa pálido (Figura 21-C). No geral os cristais encontram-se orientados segundo a foliação e associados aos *fronts* de biotita lamelar de coloração marrom esverdeada.

e) Cristalização da Granada

A cristalização da granada ocorre associada e concomitante a alteração potássica e silicificação (Figura 20-D e E). É caracterizada pela formação de aglomerados de cristais submilimétricos arredondados, dispostos em lentes, muito comuns nas zonas com intensa silicificação (Figura 21-D). Em zonas nas quais a alteração potássica foi mais expressiva a granada ocorre como porfiroblastos de até 1cm, que no geral preservam a foliação S_n , e ocorrem circundados por cristais de biotita que definem a foliação principal milonítica, em porções anastomosadas e amoldadas aos seus porfiroblastos.

f) Alteração Sódico-Cálcica

A alteração sódico-cálcica ocorreu em seguida da alteração potássica e formação de granada. Ocorre principalmente na zona de *hanging wall* (capa), nas zonas mais distais às

zonas de mineralização, alterando o pacote dos clorita-(granada)-anfibólio-biotita xistos. A alteração sódico-cálcica se manifesta pela cristalização de anfibólios, identificados em mais de um estágio de alteração.

O primeiro estágio é caracterizado pela formação de anfibólios de cálcio e ferro, de origem pré a sin-(Sn+1), caracterizados por Jesus (2016) e Iguma (2015), como Fe-tschermakita e K-Fe-sadaganaíta, com zoneamento mineral caracterizado por bordas de actinolita e grunerita, além de grande volume de monazita hidrotermal, presente na forma de inclusões nestes anfibólios.

O segundo estágio é definido pela formação de hastingsita, com origem mais tardia em regime dúctil-rúptil a rúptil, ocorrendo em *fronts* e veios ou constituindo domínios monominerálicos compostos predominantemente por hastingsita (Figuras 20-F e 21-E). Este segundo estágio ocorre associado ao estágio de cloritização e a hastingsita ocorre principalmente substituindo os cristais de grunerita pretéritos.

g) Enriquecimento em ferro

O enriquecimento em ferro ocorre em zonas proximais ao envelope da mineralização na forma de *fronts* de grunerita e na cristalização de magnetita euédrica. A formação de grunerita está associada aos pacotes ricos em granada, mas sua geração foi posterior à formação de granada. Ocorre geralmente em *fronts* que obliteram quase que totalmente o protólito (Figuras 20-G e 21-F), com cristais de grunerita substituindo cristais de hastingsita e biotita (figura 21-G), ou em lentes intercaladas com domínios ricos em clorita (Figuras 20-H e 21-H).

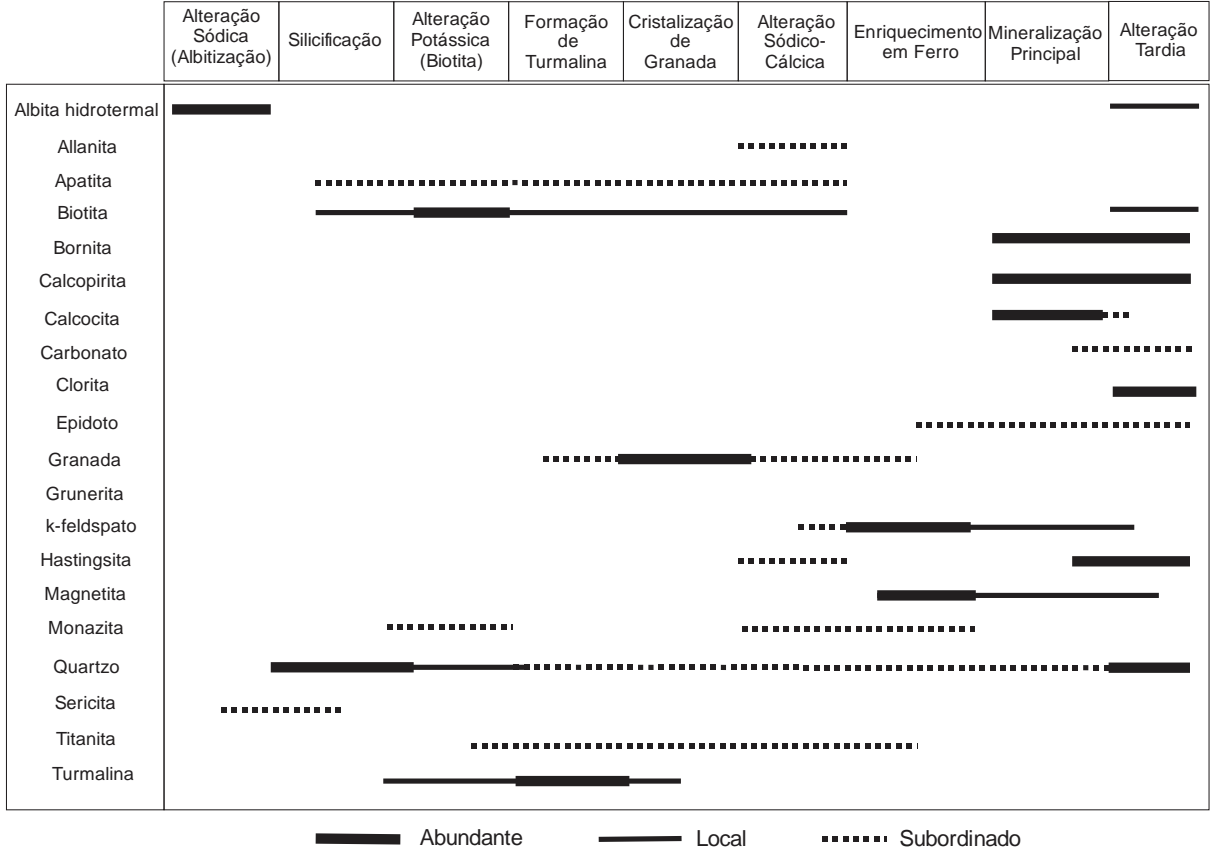
O enriquecimento em ferro também é presente na formação de porfiroblastos de magnetita, associada aos cristais de grunerita, com cristais euédricos a subeuédricos, dispersos na matriz ou dispostos ao longo da foliação, compondo quase que totalmente certas porções, configurando magnetititos localizados proximais ao envelope da mineralização.

h) Cloritização

A cloritização foi o estágio mais tardio observado e está relacionada a estruturas rúpteis. Mesmo pouco expressiva no setor SE, a cloritização ocorre em *fronts* associados à grunerita ou como alteração pervasiva da matriz (Figura 20-H), principalmente substituindo cristais de biotita, anfibólios de estágios hidrotermais mais antigos e fissuras e bordas de aglomerados de granada (Figura 21-I).

A clorita ocorre como lamelas de coloração verde clara ou como ripas associadas principalmente a sulfetos, como a calcopirita, caracterizada como uma clorita rica em ferro.

Tabela 1. Relação entre as fases de alteração hidrotermal e a paragênese mineral característica (Jesus, 2016 modificada).



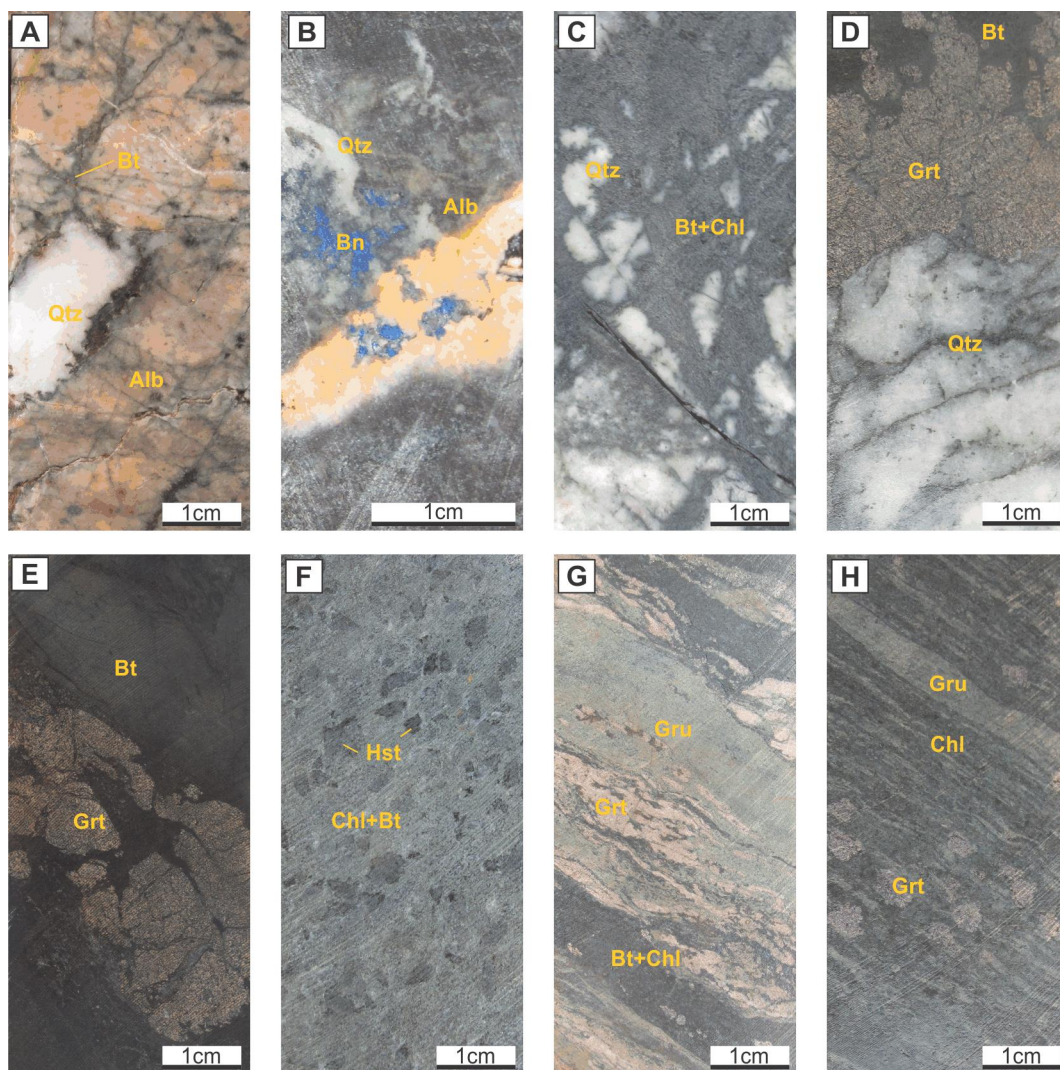
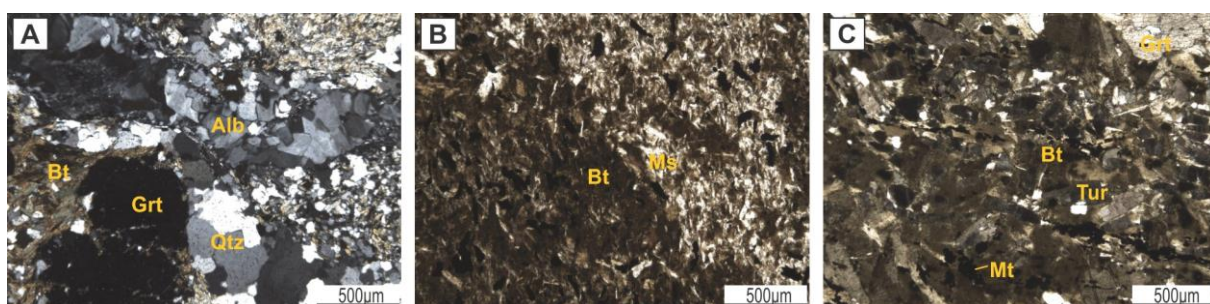


Figura 20. Aspectos macroscópicos das alterações hidrotermais do setor SE. (A) Intensa albitização do Granito Furnas cortada por vênulas de biotita e veio de quartzo leitoso tardio. (B) Vênula de albita com bornita associada, discordante a matriz. (C) Silicificação cortada por *infiils* de biotita. (D) Cristalização de granada associada a formação de biotita e silicificação pervasiva da matriz. (E) Cristalização de granada envolta por *fronts* de biotita. (F) Porfiroblastos de hastingsita em meio a uma matriz de clorita e biotita. (G) *Fronts* de grunerita associada a *fronts* de biotita e granada estirada ao longo da foliação milonítica. (H) Intercalação entre lentes de grunerita e clorita e domínios com cristalização de granada. Abreviações: Qtz = quartzo, Chl = clorita, Alb = albita, Bt = biotita, Gru = grunerita, Hst = hastingsita, Bn = bornita, Grt = granada.



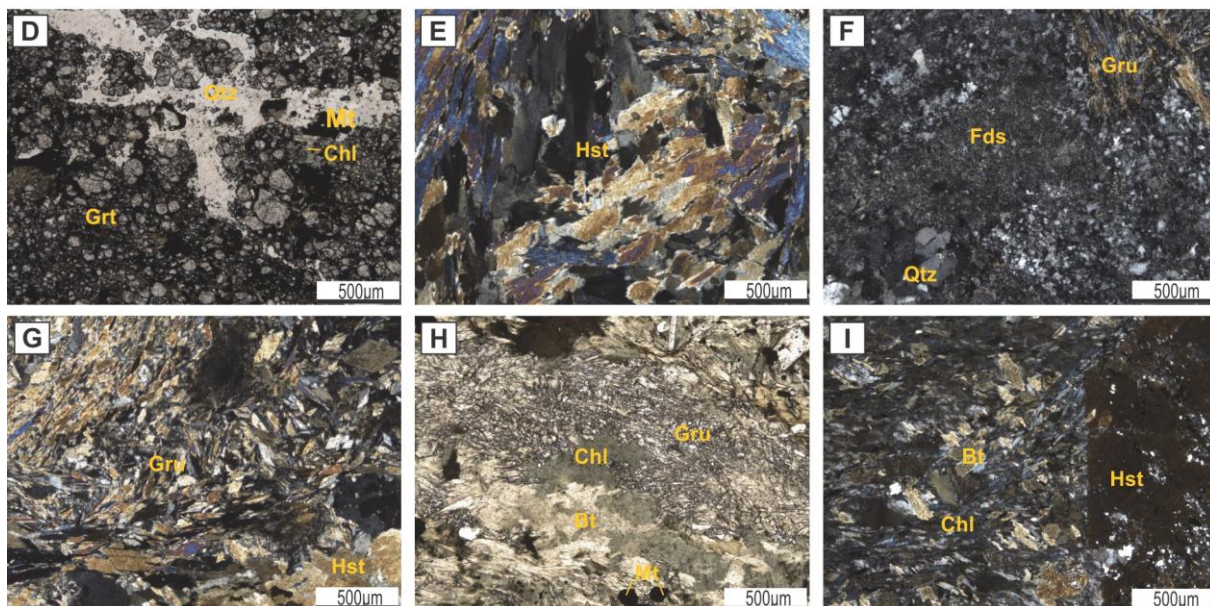


Figura 21. Aspectos microscópicos das alterações hidrotermais do setor SE em luz polarizada transmitida. (A) Vênula de albита hidrotermal com textura de preenchimento e bolsão de quartzo deformado (PC). (B) *Front* de biotita castanha alterando a matriz composta por muscovita no Granito Furnas (PD). (C) Cristais de turmalina verde azulada orientadas segundo a foliação (PD). (D) Aglomerados de granada envoltos por clorita e associados a silicificação e cristalização de magnetita (PD). (E) Cristais de hastingsita prismáticos dispostos de forma decussada na matriz compondo hastingsito (PC). (F) Matriz do Granito Furnas com albита sericitizada e feições de milonitização, com quartzo e feldspato cominuído, além de *front* de grunerita. (G) *Front* de grunerita substituindo a matriz do hastingsito (PC). (H) Intercalação entre domínios compostos por grunerita e domínios de biotita cloritizada (PD). (I) *Front* de biotita cloritizada substituindo domínios ricos em hastingsita. Abreviações: Qtz = quartzo, Chl = clorita, Alb = albита, Bt = biotita, Gru = grunerita, Hst = hastingsita, Mt = magnetita, Fds = feldspato, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.

5.3.2. Setor NW

As zonas de alteração hidrotermal identificadas no setor NW são claramente distintas das observadas no setor SE. Apesar de também serem controladas pela foliação milonítica, muito marcada e presente em quase todas as rochas observadas, a alteração neste setor apresenta um controle mais expressivo por estruturas rúpteis e tardias. São expressivas as estruturas rúpteis, como falhas, brechas, veios e vênulas indeformados e discordantes da foliação, assim como expressiva cloritização associada com epidotização e formação de albита e feldspato potássico hidrotermais. A sequência de alteração hidrotermal foi definida iniciando-se com a silicificação e alteração sódica, seguida pela alteração hidrolítica, formação de granada, alteração sódico-cálcica, formação de turmalina, alteração potássica, formação de apatita e enriquecimento em ferro em estágios dúcteis, pré, sin e tardi-(Sn+1), além de estágios tardios de regime rúptil como a alteração carbonática, cloritização e epidotização.

a) Silicificação

Silicificação ocorre inicialmente pré-(Sn+1) com a cristalização de quartzo na matriz e como *infills* deformados compondo lentes e bolsões isolados na matriz (Figura 22-A). Na

fase inicial de silicificação o quartzo ocorre xenomórfico, com bordas lobadas, migração de borda de grão, formação de subgrão e forte extinção ondulante.

Tardiamente, a silicificação foi expressiva em zonas rasas do depósito, no pacote de quartzo milonitos, associado a brechas hidrotermais e drusas preenchidas por quartzo piramidal e espacialmente relacionadas a falhas. Em zonas proximais a falhas, a silicificação ocorreu de forma pervasiva substituindo quase que totalmente a rocha encaixante (Figura 22-A), enquanto que em veios ocorre predominantemente como quartzo leitoso, com epidotização, formação de albita e feldspato potássico e sulfetos associados.

b) Alteração Sódica (Albitização)

A albitização é observada em um estágio precoce em quase todas as rochas, com mais expressão no Granito Furnas. No geral, a albita precoce é subidioblástica a xenoblástica, com bordas arredondadas e geminação polissintética apagada, deformados e apresentando recristalização dinâmica e em grande parte sericitizada.

O estágio mais tardio de albitização está associado a deformação rúptil e ocorre em veios e vênulas tardios e como alteração pervasiva da matriz (Figura 22-B), com cristais prismáticos a xenoblásticos límpidos em comparação com a albita formada no primeiro estágio, e muitas vezes preenchendo fraturas resultando em texturas de preenchimento, com cristais menores nas bordas de veios, gradando para cristais mais grossos no centro (Figura 23-B). A formação de albita tardia está associada a zonas com intensa silicificação, epidotização e carbonatização.

c) Alteração Hidrolítica

A alteração hidrolítica é caracterizada pela formação de muscovita e sericita observada no Granito Furnas e nos biotita-muscovita-epidoto xistos (Figura 22-C). A formação de muscovita ocorre como alteração pervasiva do feldspato presente na matriz, compondo cristais placóides subidioblásticos, sin a pós-(S_{n+1}), que definem a foliação principal da rocha (Figura 23-C). Ocorre em porções miloníticas, definindo pares S/C, e foi anterior à alteração potássica, sendo substituída e obliterada por *fronts* de biotita, principalmente nas porções do Granito Furnas.

Sericitização ocorre de forma pervasiva, como aglomerados submilimétricos que substituem cristais de albita e feldspato potássico presentes na matriz das rochas calciossilicática e biotita-muscovita-epidoto xistos, além da substituírem totalmente porfioblastos tabulares não identificados, presentes nos clorita-biotita-(granada) xistos.

d) *Cristalização de Granada*

Observada tanto na zona de *hangingwall* quanto no *footwall*, a cristalização de granada é observada no pacote dos clorita-biotita-(granada) xistos, como aglomerados de cristais submilimétricos e como porfiroblastos xenoblásticos intensamente fraturados e alongados segundo a foliação (Figura 22-D). Quando muita intensa, a cristalização de granada resulta em rochas compostas predominantemente por granada (granaditos; Figura 23-D).

A formação de granada está associada a um estágio pré a sin-(S_{n+1}), anterior à formação de biotita. Grande parte dos cristais de granada são envoltos por biotita e apressam fraturas preenchidas por esse mineral, posteriormente cloritizado. Ao contrário do observado no setor SE, as inclusões nos porfiroblastos de granada são praticamente ausentes, não preservando a foliação pretérita S_n , e obliterando as feições da foliação principal, S_{n+1} .

e) *Alteração Sódico-Cálcica*

A alteração sódico-cálcica é observada na zona de *hangingwall* associada às rochas calciossilicáticas e no *footwall*, logo abaixo da zona mineralizada, nos biotita-anfibólio xistos.

Quando ocorre no pacote de rochas calciossilicáticas, a alteração sódico-cálcica se manifesta com a cristalização de anfibólios cálcicos da série tremolita-actinolita. Os cristais são subidioblásticos prismáticos a xenoblásticos, com zoneamento composicional apresentando centro composto por actinolita, com composição mais rica em Fe, apresentando leve pleocroísmo em tons de verde pálido, e bordas compostas por tremolita incolor, caracterizando uma composição mais magnesiânica. Este zoneamento composicional é observado somente em alguns cristais. Grande parte destes anfibólios apresentam bordas de reação e substituição por carbonatos posteriores associados com a alteração carbonática.

Já no pacote dos biotita-anfibólio xistos, a alteração sódico-cálcica ocorre com a formação de anfibólios sódicos, de coloração verde azulada e forte pelocroísmo, definidos como hastingsita.

A hastingsita é formada em um estágio tardio de deformação dúctil e ocorre dispersa na matriz, em formações ferríferas bandadas com cristais xenomórficos, substituídos por clorita; ou em *fronts* observados nos biotita-anfibólio xistos (Figura 23-E), com cristais subidioblásticos a xenoblásticos e substituindo cristais de grunerita nas bordas e ao longo de clivagens. Grande parte dos cristais de hastingsita associados a *fronts* de alteração pervasiva encontram-se substituídos por biotita, posteriormente cloritizada.

f) Formação de Turmalina

A formação de porfiroblastos de turmalina é observada na zona de *footwall*, associada espacialmente ao clorita-biotita xistos e ao Granito Furnas. A formação dos porfiroblastos foi sin-(S_{n+1}), com cristais prismáticos de coloração verde escura orientados segundo a foliação, com até 3mm (Figura 22-B). Microscopicamente a turmalina apresenta coloração esverdeada com pleocroísmo gradando de rosa pálido a verde acastanhado. Seus cristais são subidiomórficos, estirados ao longo da foliação (Figura 23-E), e apresentam feições de dissolução e alteração das bordas e fraturas devido à cloritização.

g) Alteração Potássica

A alteração potássica é identificada com a formação de feldspato potássico associados a zonas de silicificação e como *fronts* de biotita identificados principalmente nos clorita-biotita-(granada) xistos e nas porções do Granito Furnas.

A formação de biotita é identificada em mais de um estágio de geração, sendo o primeiro caracterizado por cristais lamelares finos, de coloração esverdeada, orientados e definindo a foliação milonítica (S_{n+1}), presentes nos clorita-biotita-(granada) xistos (Figura 23-G), principalmente preenchendo fraturas e envolvendo cristais de granada. A segunda geração ocorre em *fronts* e como alteração pervasiva seletiva da matriz. Essa geração apresenta cristais subidioblásticos mais grossos, em relação à geração anterior, com coloração marrom acastanhada e bordas retilíneas, e ocorre substituindo cristais de muscovita orientados segundo a foliação principal (S_{n+1}) no Granito Furnas e substituindo cristais de hastingsita nos biotita-anfibólio xistos. A última geração é caracterizada por cristais mais grossos, idioblásticos, de coloração marrom acastanhada, discordantes da foliação, também presente no Granito Furnas.

A formação de feldspato potássico ocorre tardiamente, na forma de veios, vênulas e alterando a matriz como uma massa de coloração rósea avermelhada (Figura 22-E). Tem origem em um estágio rúptil tardio, associado a zonas de silicificação, epidotização e a veios de hematita, magnetita e sulfetos. Apresenta cristais xenoblásticos, com ausência de geminação ou forte extinção ondulante.

h) Formação de Apatita

A formação de apatita foi observada em quase todas as rochas descritas, em um estágio sin-(S_{n+1}), anterior à alteração potássica e concomitante à formação de turmalina. Ocorre como cristais subidiomórficos arredondados dispersos na matriz, como agregados cristalizados preferencialmente ao longo dos planos da foliação principal (Figura 23-F) ou como porfiroblastos de até 2cm (Figura 22-G).

i) *Enriquecimento em Ferro*

O enriquecimento em ferro foi muito expressivo no setor NW, principalmente na zona do envelope da mineralização. Ocorre de forma pervasiva, em *fronts* de grunerita, indentificado nos biotita-anfibólio xistos; e com a precipitação de hematita e magnetita ao longo dos planos da foliação principal ou substituindo quase que totalmente a matriz dos protólitos (Figura 22-H).

A formação de grunerita, ocorre em *fronts* com cristais aciculares e incolores, dispostos de forma decussada microscopicamente a orientados definindo uma foliação S_{n+1} (Figura 23-J), em partes dobrada, quando observado macroscopicamente. Este estágio de enriquecimento em ferro ocorre, em grande parte, sobreposto por uma alteração sódico-cálcica e potássica posterior, apresentando grande parte dos cristais de grunerita substituídos por hastingsita e biotita, posteriormente cloritizados.

A formação de magnetita e hematita caracteriza o estágio mais representativo do enriquecimento em ferro observado no setor NW. Ocorre de forma pervasiva, substituindo parcial a totalmente a rocha encaixante. Este processo é observado na zona do envelope da mineralização, e resulta em rochas maciças e compostas estritamente por hematita e magnetita.

Um estágio tardio relativo ao enriquecimento em ferro com a formação de hematita e magnetita também ocorre controlado por estruturas rúpteis, observado na forma de veios e vênulas de especularita e magnetita. Em análises por microscopia em luz refletida foi possível identificar que grande parte dos cristais de hematita apresentam hábito placóide (especularita), e são gerados posteriormente à formação de magnetita. Muitas estruturas de substituição são observadas, como pseudomorfos de magnetita cúbica substituídos totalmente por hematita, além de feições de crescimento de hematita placóide ao longo dos planos de clivagem de cristais de magnetita, configurando uma típica textura de substituição (martitização) (Figura 23-I).

j) *Alteração Carbonática*

A alteração carbonática é bastante representativa na zona de *hangingwall*, associada espacialmente a zonas de falha. A carbonatização ocorre de forma pervasiva e em *fronts* (Figura 23-K) obliterando e substituindo quase que totalmente o protólito. É caracterizada pela formação de calcita pós- (S_{n+1}) , com cristais subidioblásticos a xenoblásticos, com bordas arredondas, levemente deformados, que ocorrem substituindo as bordas de cristais de tremolita sin- (S_{n+1}) .

Além da alteração pervasiva da matriz, a presença de carbonatos é identificada tardiamente na forma de veios e vênulas discordantes a foliação, associadas a porfiroblastos de magnetita e sulfetos (Figura 22-I).

k) Cloritização

A cloritização é caracterizada como uma fase de alteração tardia e está associada a deformação rúptil, posterior a formação da foliação Sn+1. Ocorre em *fronts* alteração pervasiva que substituem cristais de biotita, hastingsita, granada e turmalina.

A clorita ocorre com hábito lamelar, com coloração verde clara, leve pleocroísmo e birrefringência em tons de cinza arroxeados a cinza acastanhados, classificada como uma clorita rica em ferro definida como clinocloro. Associados à cloritização é comum a formação de epidoto, titanita e allanita, localizados principalmente no centro dos *fronts* (Figura 23-L).

l) Epidotização

A epidotização ocorre pós-(Sn+1), associada espacialmente à cloritização. Varia conforme a sua ocorrência, formando aglomerados de leucoxênio; como cristais euédricos de clinozoisita e como cristais de allanita com bordas de epidoto. Ocorre em quase todas as rochas descritas, na forma de vênulas tardias discordantes na matriz (Figura 22-J), disseminados na matriz e associados aos *fronts* de clorita (Figura 23-L).

Tabela 2. Relação entre as fases de alteração hidrotermal e a paragenese mineral característica do Setor NW.

	Alteração Sódica (Albitização)	Silicificação	Alteração Hidrolítica	Alteração Potássica (Biotita)	Formação de Turmalina	Formação de Apatita	Cristalização de Granada	Alteração Sódico-Cálcica	Enriquecimento em Ferro	Alteração Carbonática	Mineralização Principal	Alteração Tardia
Albita hidrotermal	Abundante											Subordinado
Allanita												Subordinado
Apatita						Local						
Biotita			Abundante	Abundante								
Calcopirita											Abundante	
Carbonato										Abundante	Abundante	
Clorita												Local
Epidoto												Local
Granada							Local					
Grunerita									Local			
k-feldspato				Local								Subordinado
Hastingsita								Subordinado				Subordinado
Hematita									Abundante			Abundante
Magnetita									Abundante			Abundante
Muscovita	Local	Local	Abundante									Local
Quartzo		Abundante										
Sericita	Subordinado	Subordinado										
Titanita												Subordinado
Tremolita												
Turmalina					Local							

Abundante
 Local
 Subordinado

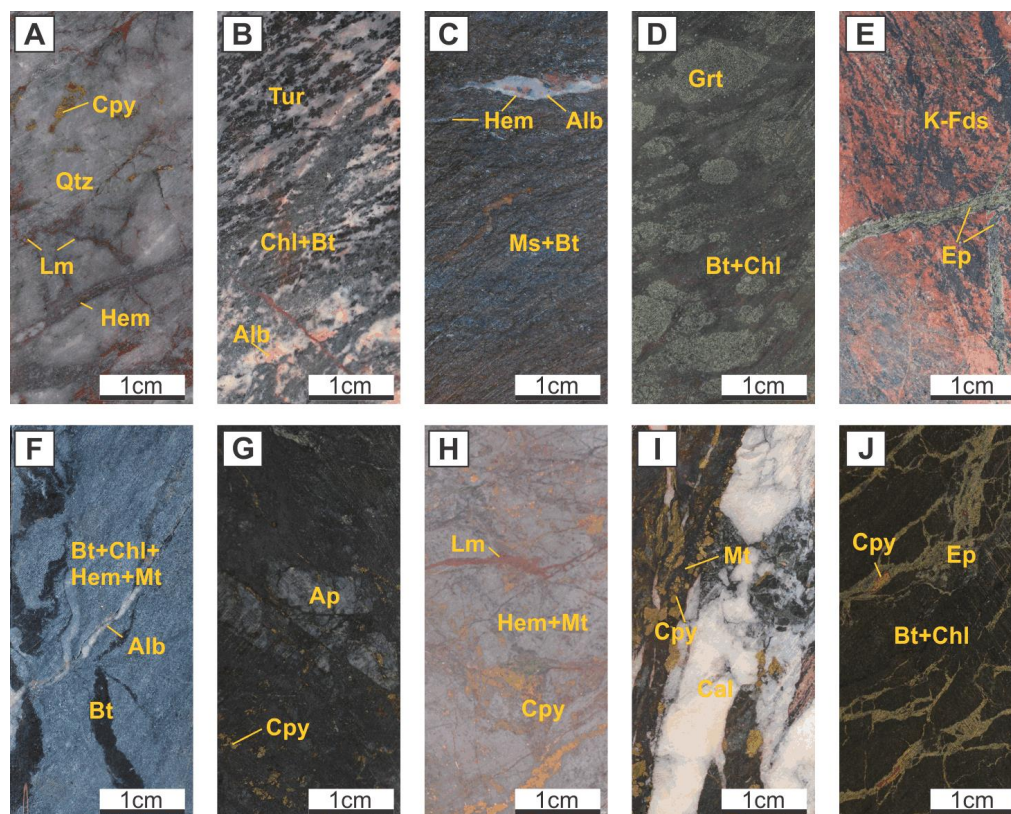
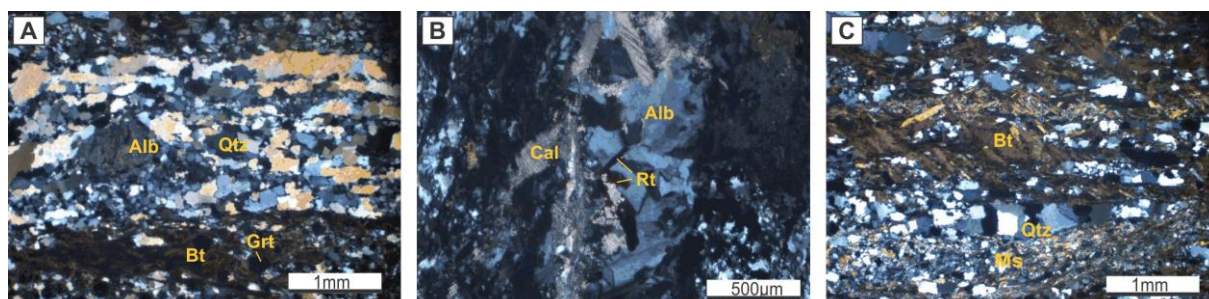


Figura 22. Aspectos macroscópicos das alterações hidrotermais do setor NW. (A) Zona silicificada com fraturas preenchidas por limonita, calcopirita e hematita. (B) Porfiroblastos de turmalina orientados segundo a foliação em uma matriz quartzo-feldspática com intensa albitização, cloritização e alteração potássica. (C) Foliação milonítica definida por biotita e muscovita no biotita-muscovita-epidoto xisto e vênula de albita com hematita associada. (D) Cristalização de granada nos clorita-biotita-(granada) xistos. (E) Intensa alteração potássica com formação de feldspato potássico com vênulas discordantes de epidoto. (F) Vênulas de biotita cortando zonas com intenso enriquecimento em ferro e remobilização de hematita e magnetita. (G) Porfiroblastos de apatita em meio ao clorita-biotita-(granada) xisto com calcopirita disseminada. (H) Enriquecimento em ferro com formação de hematita e magnetita na matriz e com vênulas de calcopirita e limonita associadas. (I) Veio de calcita com porfiroblastos de magnetita e calcopirita associados. (J) Matriz do clorita-biotita xisto cortada por vênulas discordantes de epidoto com calcopirita associada. Abreviações: Lm = limonita, Qtz = quartzo, Chl = clorita, Alb = albita, Bt = biotita, Ms = muscovita, Cpy = calcopirita, Hem = hematita, Mt = magnetita, Grt = granada, Ep = epidoto, Ap = apatita, Tur = turmalina, K-fds = feldspato potássico.



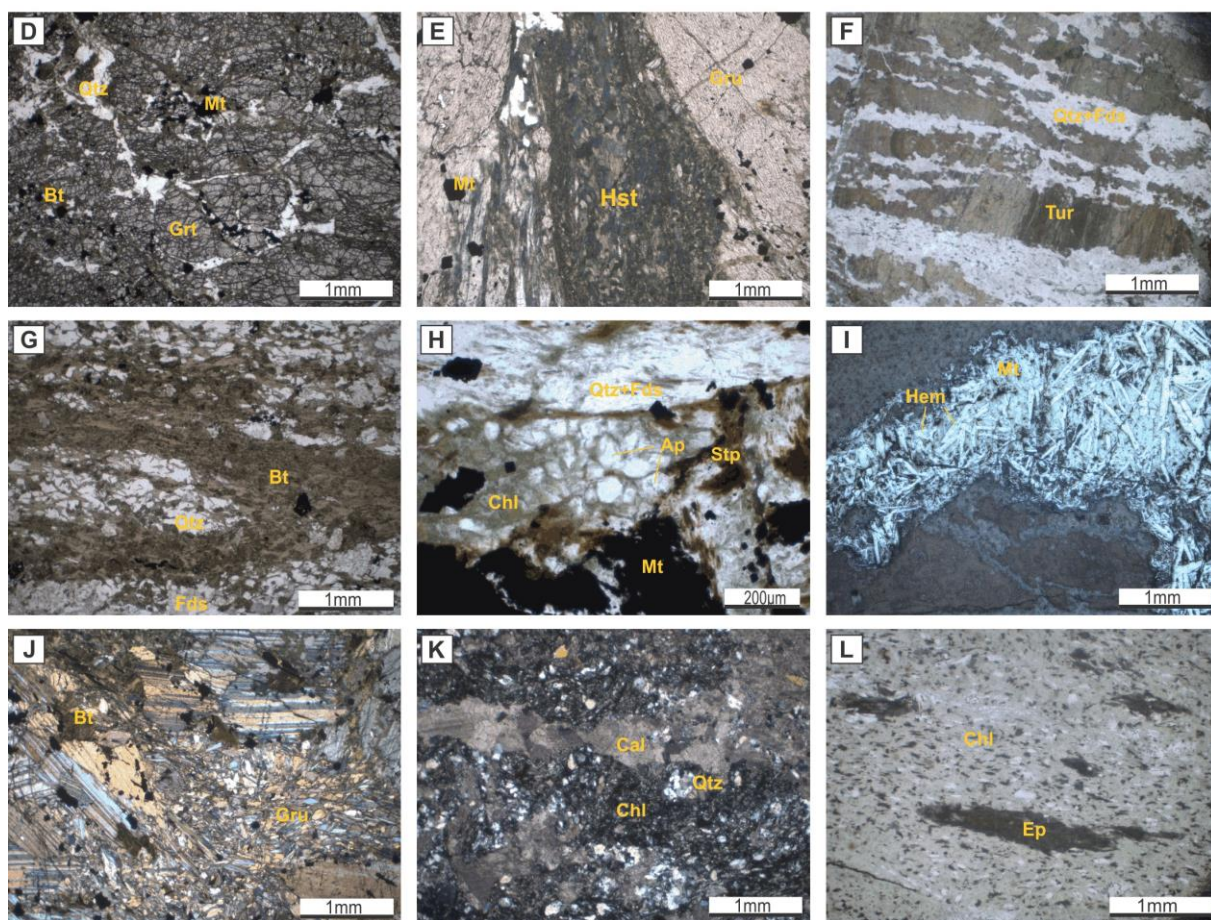


Figura 23. Aspectos microscópicos das alterações hidrotermais do setor NW. (A) Vênula de quartzo recristalizada com albita hidrotermal sericitizada, concordante a foliação e limitada por um domínio composto por granada e biotita (LT) (PC). (B) Vênula de albita com textura de preenchimento e cristais de calcita e rutilo associado (LT) (PC). (C) Foliação milonítica com lentes sigmoidais de quartzo recristalizado e *fronts* de biotita e muscovita (LT) (PC). (D) Aglomerados de cristais de granada compondo predominantemente a matriz e associados a silicificação e cristalização de magnetita (LT) (PD). (E) *Front* de hastingsita substituindo cristais de grunerita com magnetita associada (LT) (PD). (F) Porfiroblastos de turmalina estirados ao longo da foliação em matriz quartzofeldspática (LT) (PD). (G) *Front* de biotita definindo a foliação milonítica e isolando bolsões de quartzo e feldspato (LT) (PD). (H) Aglomerados de cristais granulares de apatita envoltos por clorita e associação com vênulas tardias e discordantes de estipnomelano (LT) (PD). (I) Veio de magnetita substituída por hematita placoide configurando uma textura de substituição, martitização (LR). (J) Enriquecimento em ferro com formação de grunerita prismática decussada (LT) (PC). (K) *Front* de clorita cortando o domínio com intensa alteração carbonática e formação de calcita nas rochas calciossilicáticas (LT) (PC). (L) Epidoto associado a *fronts* de clorita (LT) (PD). Abreviações: Qtz = quartzo, Chl = clorita, Alb = albita, Bt = biotita, Gru = grunerita, Hst = hastingsita, Hem = hematita, Mt = magnetita, Grt = granada, Stp = estipnomelano, Rt = rutilo Ep = epidoto, Tur = turmalina, Cal = calcita, Fds = feldspato, Bt = biotita, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados, LT = luz transmitida, LR = luz refletida.

5.4. Mineralização de cobre e ouro

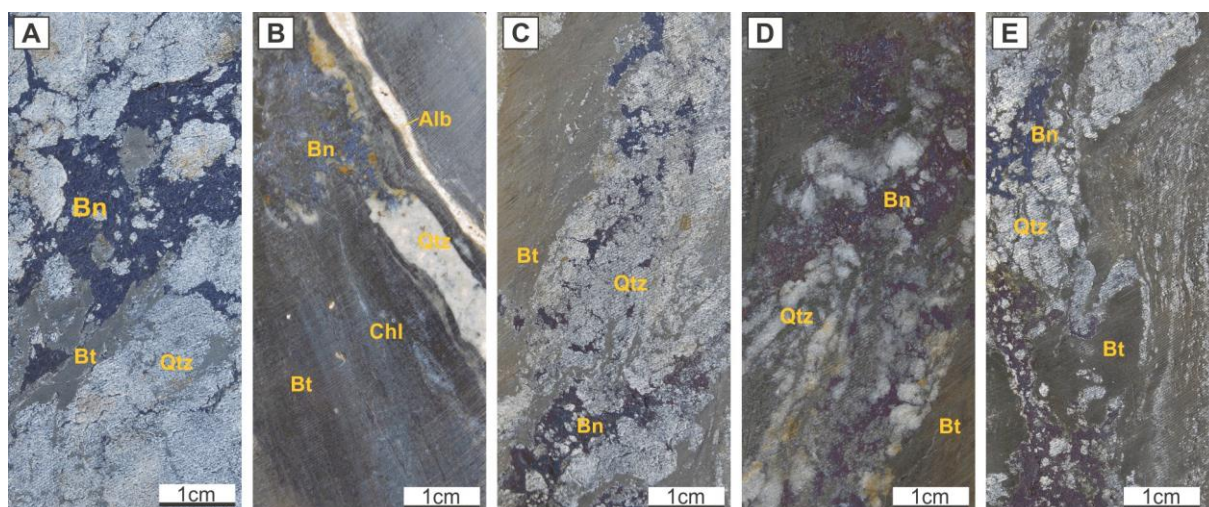
A mineralização de cobre e ouro presente no depósito Furnas, no geral, é caracterizada pela presença de sulfetos, tais como calcopirita, calcocita, bornita, pirrotita,

covelina e pirita, além de grande quantidade de óxidos de ferro, como magnetita e hematita. No entanto, de um setor para o outro são observadas mudanças expressivas em relação aos litotipos e alterações hidrotermais que acompanham a mineralização identificada.

O setor SE do depósito Furnas é caracterizado pela presença de uma grande variedade de sulfetos, sendo eles, calcopirita, pirita, calcocita, bornita, pirrotita e covelina, além de óxidos, como hematita, magnetita e minerais portadores de ETR. Alves (2016) definiu as diferentes tipologias de minério e conclui que a mineralização ocorre em veios, vênulas, bolsões e disseminados na matriz, compostos predominantemente por bornita e calcopirita com calcocita e pirrotita subordinadas. Estes sulfetos encontram-se espacialmente relacionados a minerais hidrotermais, tais como quartzo e magnetita e, subordinadamente, grunerita, albita e clorita. Associados às fases de sulfetos também foram identificados minerais com elementos menores, como V (rutilo); Os Ir, Th, Y, Ce, Te, Nd, Gd e U (thorogumita e/ou soddyita); Nd, La, Ce (bastnasita); Ce e La (monazita e bastinasita), Pd e Se (galena); Sr, Nb e W (ferberita/wolframita) e Ag e Te (hessita).

Jesus (2016) e Iguma (2015) também haviam interpretado que a mineralização ocorreu em dois estágios. O primeiro estágio seria caracterizado por calcopirita, bornita, calcocita, ouro, molibdenita e Ce-monazita, principalmente controlados pela foliação principal, ou em veios e brechas configurando padrões tipo *stockwork*, associados espacialmente aos magnetita-granada-grunerita xistos e a domínios silicificados (Figuras 24-A a E).

O segundo estágio é caracterizado por calcopirita associada a bornita, hastingsita, actinolita e clorita, que ocorrem em veios e como preenchimento de espaços abertos. A esse estágio de mineralização estão associadas a fases com elementos traços e ETR presentes em ferberita, wittcherita, cassiterita, galena, hesita, Ce-monazita e carbonatos de ETR.



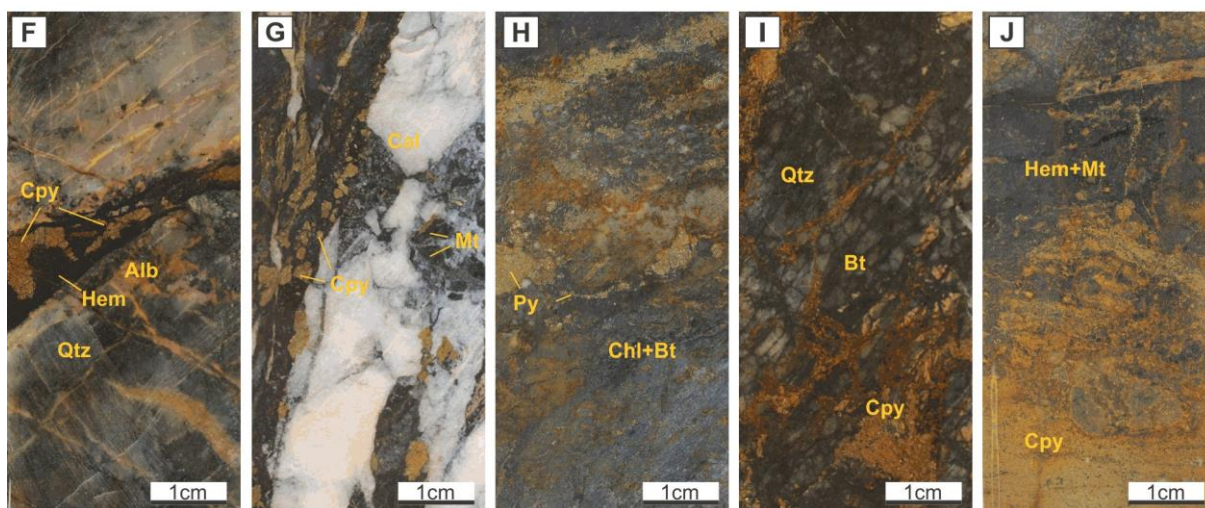


Figura 24. Aspectos macroscópicos das da mineralização no setor SE (A a E) e no setor NW (F a J). (A) Zona silicificada com *infills* de biotita e vênulas discordantes de bornita configurando um padrão *stockwork*. (B) Mineralização com bornita disseminada e concentrada na matriz associada a vênula de albita. (C) Bornita associada à zona de silicificação. (D) Bornita associada a veios de quartzo dobrado em matriz com intensa formação de biotita. (E) Bornita associada a veios de quartzo sin-deformacionais. (F) Calcopirita formada no interior de vênulas de hematita associadas a um sistema rúptil. (G) Calcopirita associada a megacristais de magnetita em veio de calcita. (H) Pirita disseminada ao longo da foliação dos clorita-biotita xistos. (I) Vênulas discordantes de calcopirita cortando a matriz. (J) Veio de calcopirita maciça discordante e cortando uma zona om intenso enriquecimento em ferro. Abreviações: Qtz = quartzo, Chl = clorita, Alb = albita, Bt = biotita, Cpy = calcopirita, Hem = hematita, Mt = magnetita, Bn = bornita, Cal = calcita.

O setor NW apresenta uma mineralização um tanto distinta da observada no setor SE. A mineralização é caracterizada pela ocorrência de pirita e calcopirita associada a hematita e magnetita (Figura 24-F e G). Ocorre tanto disseminada na matriz, orientada e controlada pela foliação (Figura 24-H), associada a cristais de clorita placoide; como veios e vênulas tardias, discordantes da foliação, constituindo brechas e padrões tipo *stockwork* (Figura 24-I), principalmente associadas a zonas com enriquecimento pervasivo em ferro e em veios maciços (Figura 24-J)

É muito comum observar a presença de sulfetos associada a veios discordantes à foliação, preenchidos por hematita, magnetita e calcita (Figura 25-A a C). Os veios de hematita e magnetita, apresentam comum associação com a formação de albita e feldspato nas bordas dos veios, assim como a formação de cristais de apatita.

A análise por microscopia indica que a geração de calcopirita e pirita ocorreu simultaneamente, com a presença de porfiroblastos de pirita euédrica envolta em bolsões de calcopirita (Figura 25-A), assim como inclusões de calcopirita em cristais de pirita.

Foram feitas análises por microscopia eletrônica de varredura, quantitativa, com uso de detectores de elétrons secundários e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), a fim

de localizar inclusões de minerais com possível conteúdo de elementos traço, possíveis zoneamentos composicionais nos sulfetos, além de traços de ouro em veios de hematita e magnetita. Os resultados mostram que os bolsões de calcopirita são homogêneos, assim como os cristais de pirita, apresentando somente traços de Pt na calcopirita (Figura 25-D e E), possivelmente relativo a finas inclusões minerais. As análises não identificaram possíveis traços de ouro, principalmente analisados ao longo de vênulas de hematita.

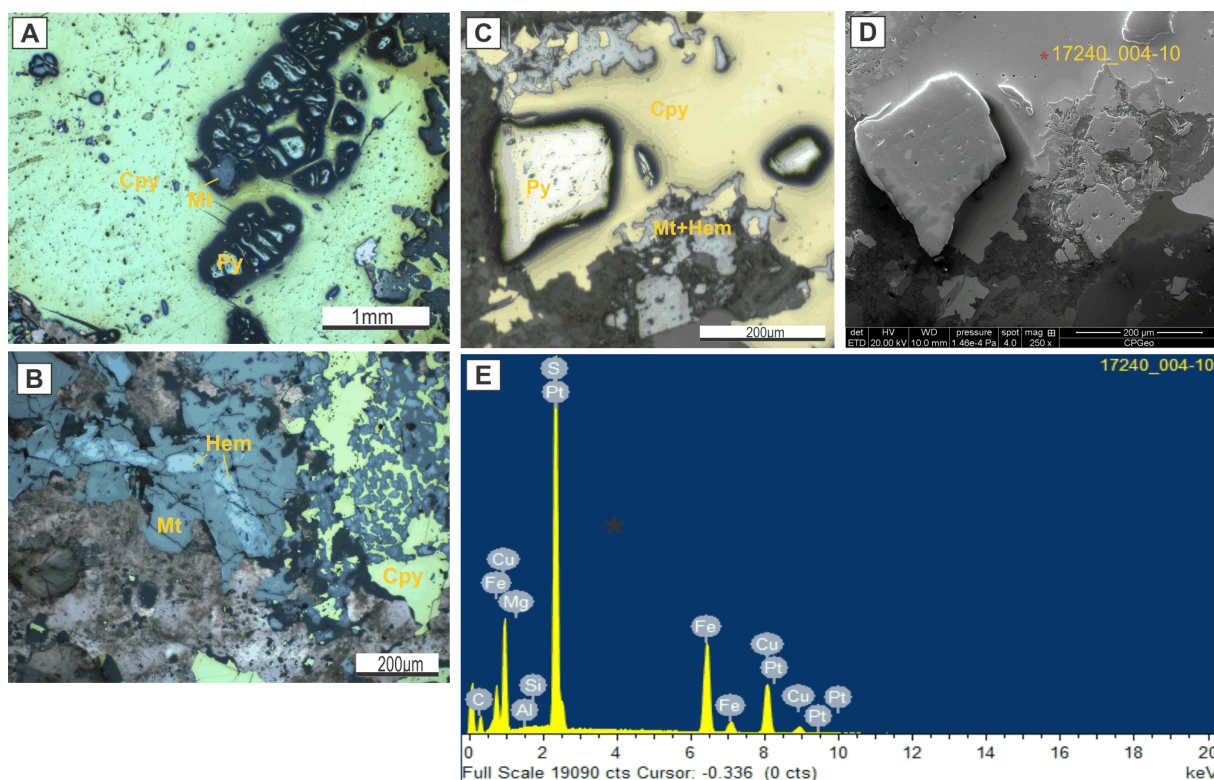


Figura 25. Aspectos microscópicos da mineralização do setor NW em luz polarizada refletida. (A) Porfiroblastos de pirita envoltos por uma massa de calcopirita com cristais de magnetita associada. (B) Relação espacial entre a calcopirita e óxidos de ferro. Relação de substituição de cristais de magnetita por hematita placóide (martitização). (C) Área mapeada por MEV com a associação de calcopirita, pirita, magnetita e hematita. (D) Imagem por elétrons refletidos obtidas por EDS, mostrando ausência de zoneamento mineral na calcopirita e pirita. (E) Spot (em vermelho) realizado no centro na calcopirita mostrando pico de Platina. Abreviações: Cpy = calcopirita, Hem = hematita, Mt = magnetita.

5.5. Aspectos estruturais

As rochas analisadas do depósito Furnas encontram-se intensamente hidrotermalizadas e deformadas. Os minerais formadores das rochas observadas são quase que totalmente de origem hidrotermal, com poucos representantes dos protólitos. Em relação à deformação, as rochas do depósito Furnas passaram por estágios de deformações dúcteis, dúcteis-rúpteis e rúpteis tardios.

Referente ao estágio dúctil foi possível identificar e definir três foliações distintas, concordante com o que foi proposto por Jesus (2016) e Iguma (2015), principalmente para o setor SE. A foliação mais antiga, caracterizada como S_n , ocorre preservada no interior de porfiroblastos de granada e andaluzita, muitas vezes rotacionados, sin a pós-cinemáticos em relação a S_{n+1} , definida por inclusões de biotita, clorita e opacos (Figura 27-A). A preservação e identificação da foliação S_n só foi possível no setor SE, onde a formação dos porfiroblastos de granada são pré a sin- (S_{n+1}) , o que não é identificado no setor NW, sugerindo que a granada tenha crescido e obliterado a foliação S_n .

Presente em ambos os setores, a foliação principal, em grande parte milonítica, é caracterizada como S_{n+1} oblíqua a S_n , com deformação associada à Zona de Cisalhamento de Cinzento, composta e definida por minerais exclusivamente hidrotermais (Figura 26-A, B e F). Esta foliação ocorre, em grande parte, plano paralela, com porções anastomosadas, amoldada a porfiroblastos pré a sin-cinemáticos, localmente crenulada (Figura 27-B, C, D, E e I) a dobrada (Figura 26-G). São comuns feições miloníticas, como a presença de *ribbons* de quartzo (Figura 27-I), minerais sigmoidais e estirados (Figura 27-H e J), pares S/C (Figura 27-K) e cristais de albita com recristalização dinâmica. Esta foliação é definida pela orientação da biotita, clorita e grunerita nos xistos anfíbolíticos e pela orientação de porfiroblastos de andaluzita e cristais de muscovita na matriz.

Subordinadamente, a foliação S_{n+2} ocorre crenulada, resultando em uma S_{n+2} caracterizada pela clivagem de crenulação observada, que é muito intensa no pacote de xistos aluminosos observados no setor SE (Figura 27-F) e incipiente a ausente no setor NW. Quando presente, a clivagem de crenulação é marcada e bem definida pelo crescimento de biotita e muscovita ao longo do plano axial destas crenulações.

Referente à fase dúctil-rúptil foram observados, em ambos os setores, muitos veios e vênulas que cortam a foliação principal (S_{n+1}) que encontram-se deformados e dobrados (Figura 26-C, D e H). Estas estruturas foram preenchidas por clorita, hastingsita, albita, feldspato potássico, epidoto e biotita.

Já a fase mais tardia, rúptil, ocorre na forma de fraturas e falhas com deslocamento sinistral (Jesus, 2016), no caso do setor SE, principalmente associadas à silicificação tardia e formação da segunda geração de sulfetos (Figura 26-E). No Setor NW as estruturas rúpteis são muito abundantes, delimitando contato entre diferentes litotipos, na forma de falhas resultando em brechas (Figura 26-J), além de fraturas, em geral, discordantes da foliação e preenchidas por quartzo, clorita, epidoto, albita, feldspato potássico, além de hematita e magnetita associados a sulfetos como pirita, calcopirita (Figura 26-I).

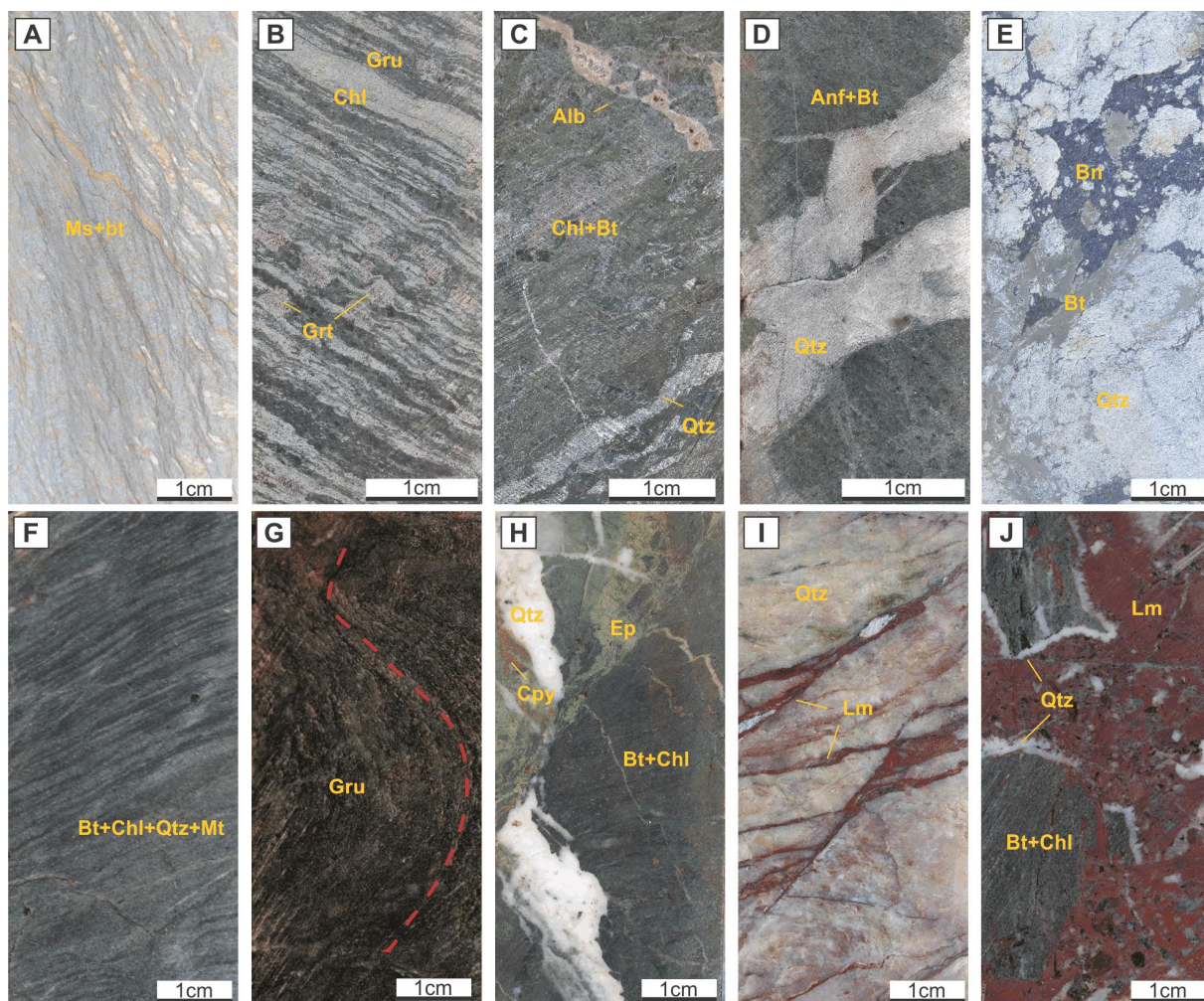


Figura 26. Aspectos macroscópicos dos aspectos estruturais do setor SE (A a E) e do setor NW (F a J). (A) Foliação milonítica crenulada dos xistos aluminosos. (B) Bandamento composicional e foliação milonítica marcada do granada-grunerita xisto. (C) Vênulas sin a tardi Sn+1 dobradas e deformadas. (D) Vênula de quartzo deformada. (E) Mineralização de bornita em vênulas e brechas. (F) Foliação milonítica Sn+1 marcada nos clorita-biotita-(granada) xistos. (G) Foliação milonítica Sn+1 dobrada (em vermelho) no biotita-anfibólio xisto. (H) Vênula de quartzo leitoso deformada e cortada por vênulas de epidoto discordantes. (I) Zona silicificada e fraturada com preenchimento de limonita. (J) Brecha hidrotermal com fragmentos do clorita-biotita-(granada) xisto com bordas de quartzo prismático e cimentados por limonita e Abreviações: Bn = bornita, Ms = muscovita, Bt = biotita, Gru = granada, Chl = clorita, Gru = grunerita, Alb = albita, Qtz = quartzo, Anf = anfibólio, Mt = magnetita, Lm = limonita, Cpy = calcopirita, Ep = epidoto.

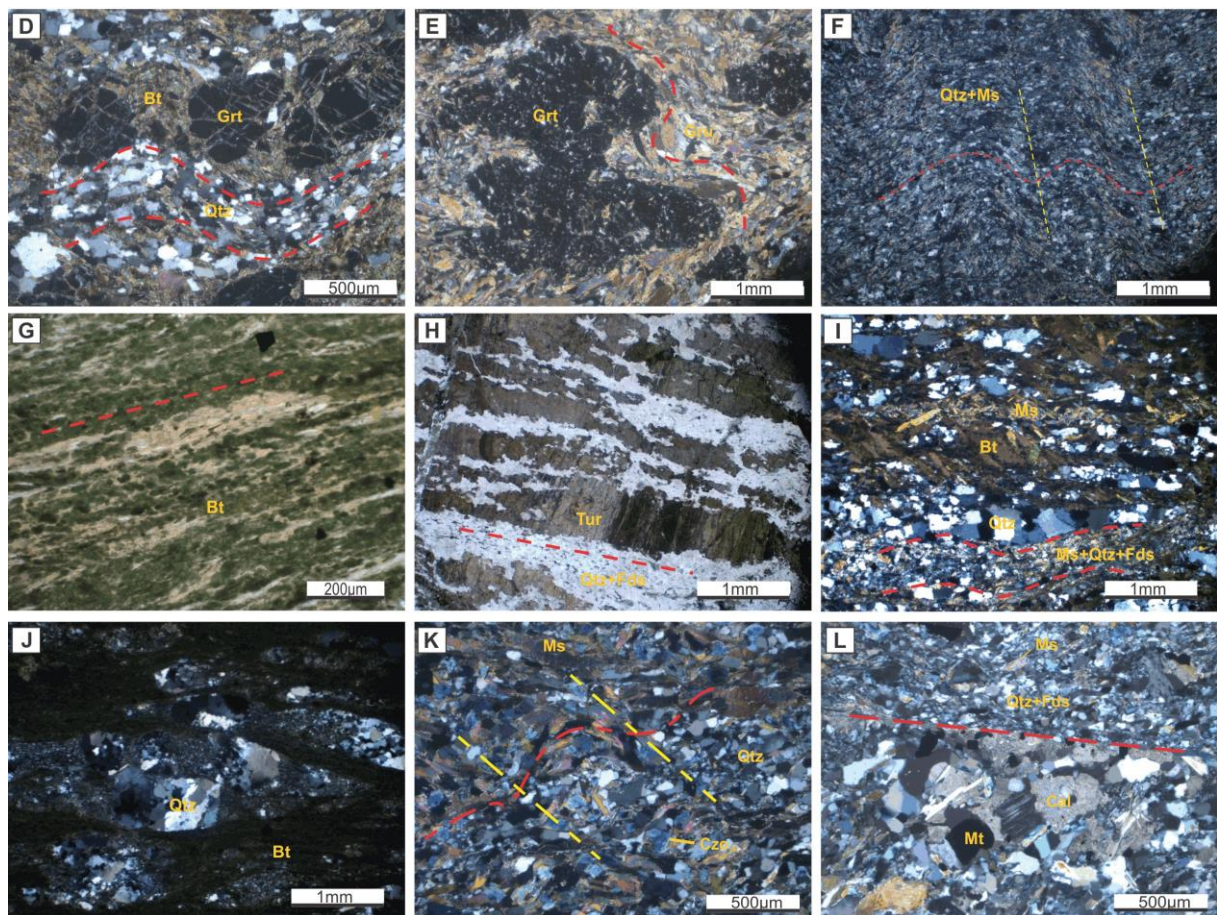


Figura 27. Aspectos microscópicos dos aspectos estruturais do setor SE (A a F) e do setor NW (G a L) em luz polarizada transmitida. (A) Foliação pretérita Sn preservada no interior do porfiroblasto de granada (PD). (B) Ribbon de quartzo recristalizado e dobrado ao longo da foliação principal Sn+1 (PC). (C) Foliação Sn+1 crenulada definida pela orientação de cristais de biotita (PD). (D) Ribbons de quartzo e porfiroblasto de granada deformados ao longo da foliação Sn+1 crenulada (PC). (E) Foliação Sn+1 crenulada e amoldada a porfiroblasto de granada também deformado (PC). (F) Foliação Sn+1 crenulada com formação de clivagem de crenulação presente nos xistos aluminosos (PC). (G) Foliação milonítica Sn+1 definida pela orientação de biotita (PD). (H) Porfiroblastos de turmalina orientados ao longo da foliação Sn+1 (PD). (I) Foliação milonítica crenulada com deformação de ribbons de quartzo (PC). (J) Foliação milonítica Sn+1 com sigmoides de quartzo recristalizado, com bordas lobadas, migração de borda de grão e recristalização dinâmica (PC). (K) Foliação milonítica com formação de pares S/C no muscovita-epidoto xisto (PC). (L) Limite cisalhado com cominuição de grãos seprando cristais tardios de calcita do domínio quartzoso (PC). Foliação Sn em linhas pontilhadas azuis, Sn+1 em vermelho e clivagem de crenulação em amarelo. Abreviações: Ms = muscovita, Bt = biotita, Grt = granada, Chl = clorita, Czo = clinozoisita, Qtz = quartzo, Fds = feldspato, Mt = magnetita, Cal = calcita, PD = polarizadores descruzados, PC = polarizadores cruzados.

Tabela 3. Tabela paragenética em relação às distintas estruturas do setor SE do depósito Furnas (Jesus, 2016 modificada).

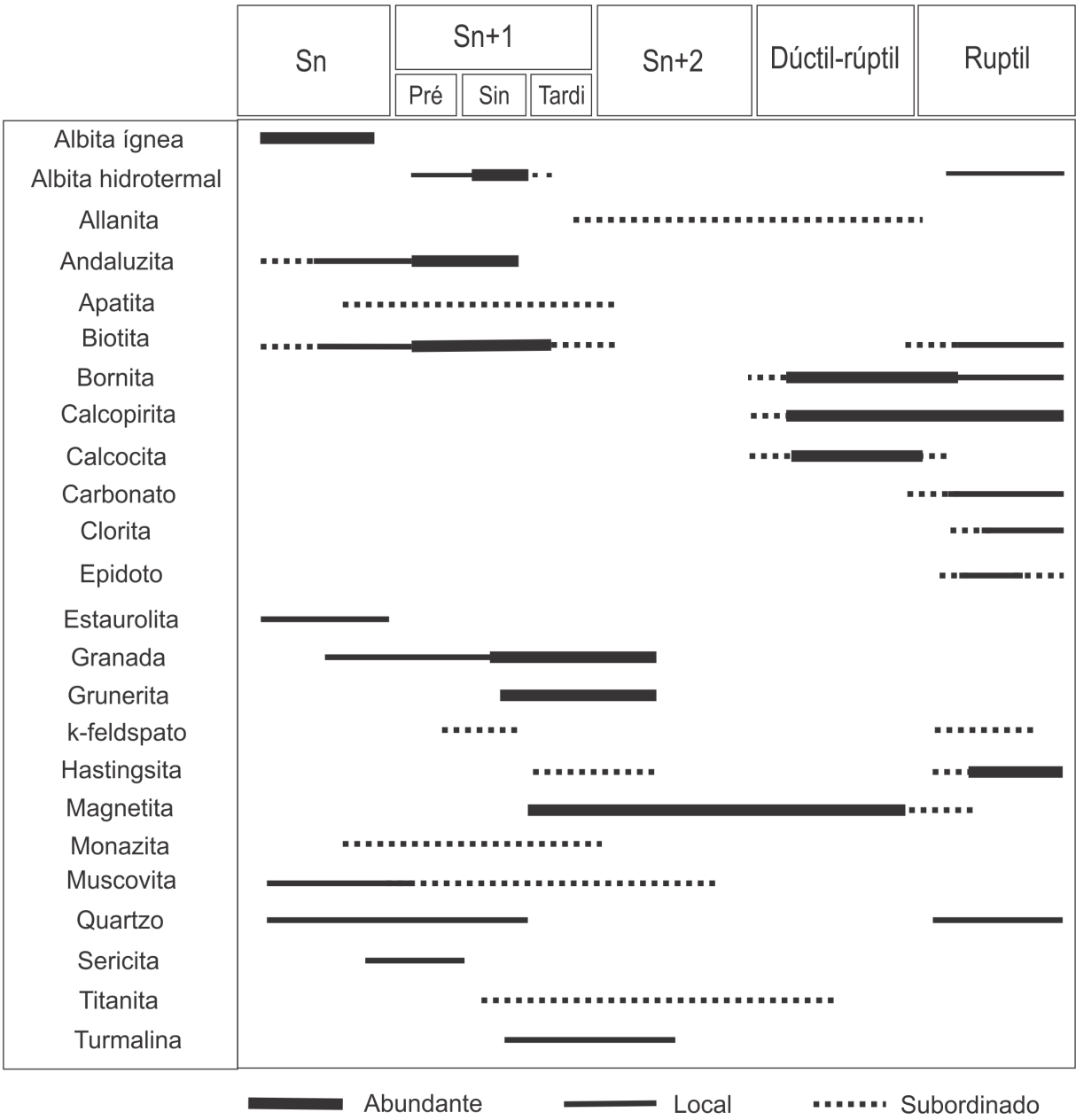
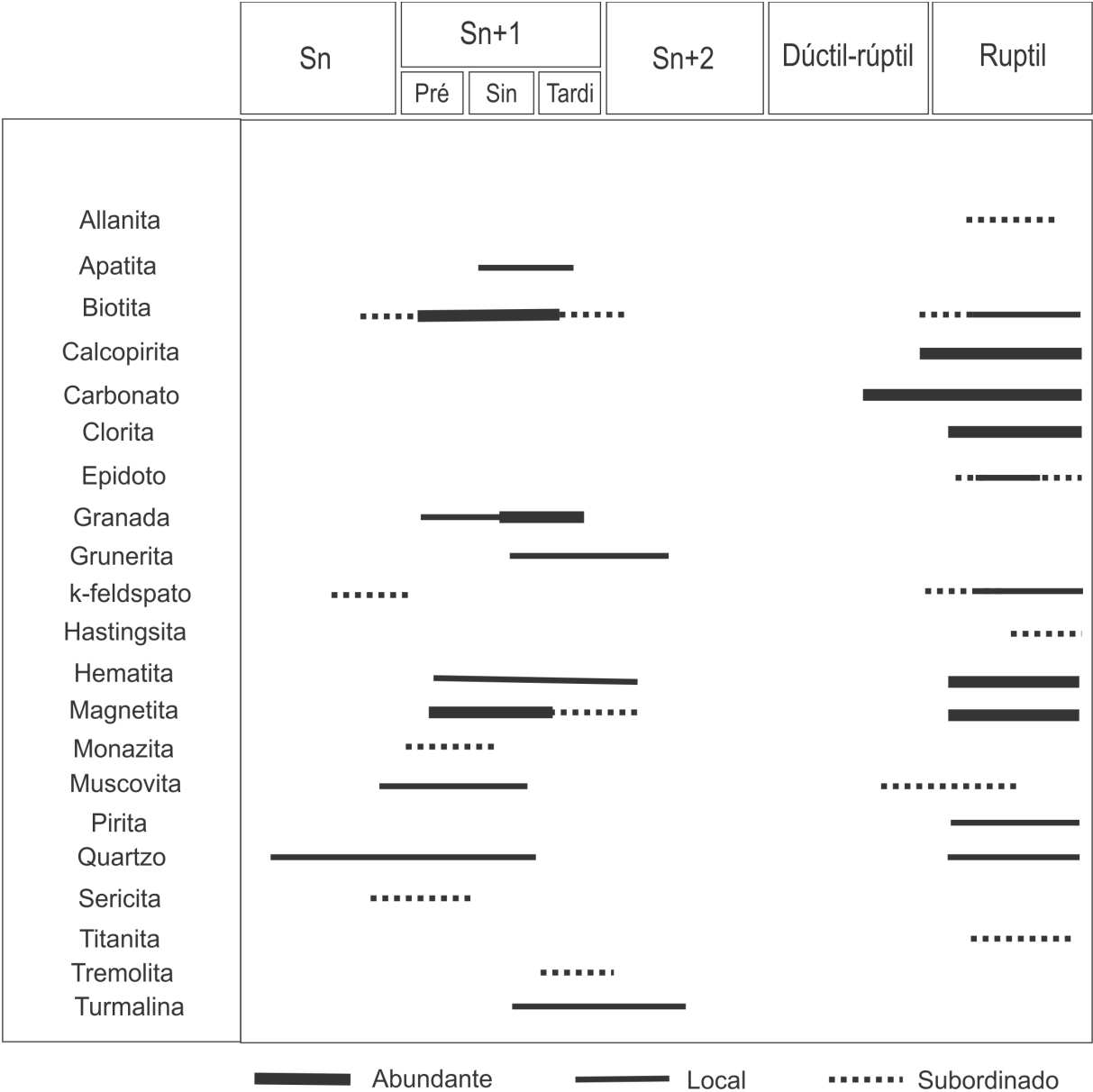


Tabela 4. Tabela paragenética em relação às distintas estruturas do setor NW do depósito Furnas.



5.6. Relação espacial entre litotipos e alterações hidrotermais

Como resultado da caracterização dos litotipos e alterações hidrotermais observados no setor NW do depósito Furnas, foi confeccionado um perfil apresentado na Figura 28. Os perfis propostos referem-se aos furos de sondagem estudados, FUR-FD 120 e FUR-FD 128, dispostos lateralmente ao perfil dos furos de sondagem mais representativos do setor SE propostos por Jesus (2016).

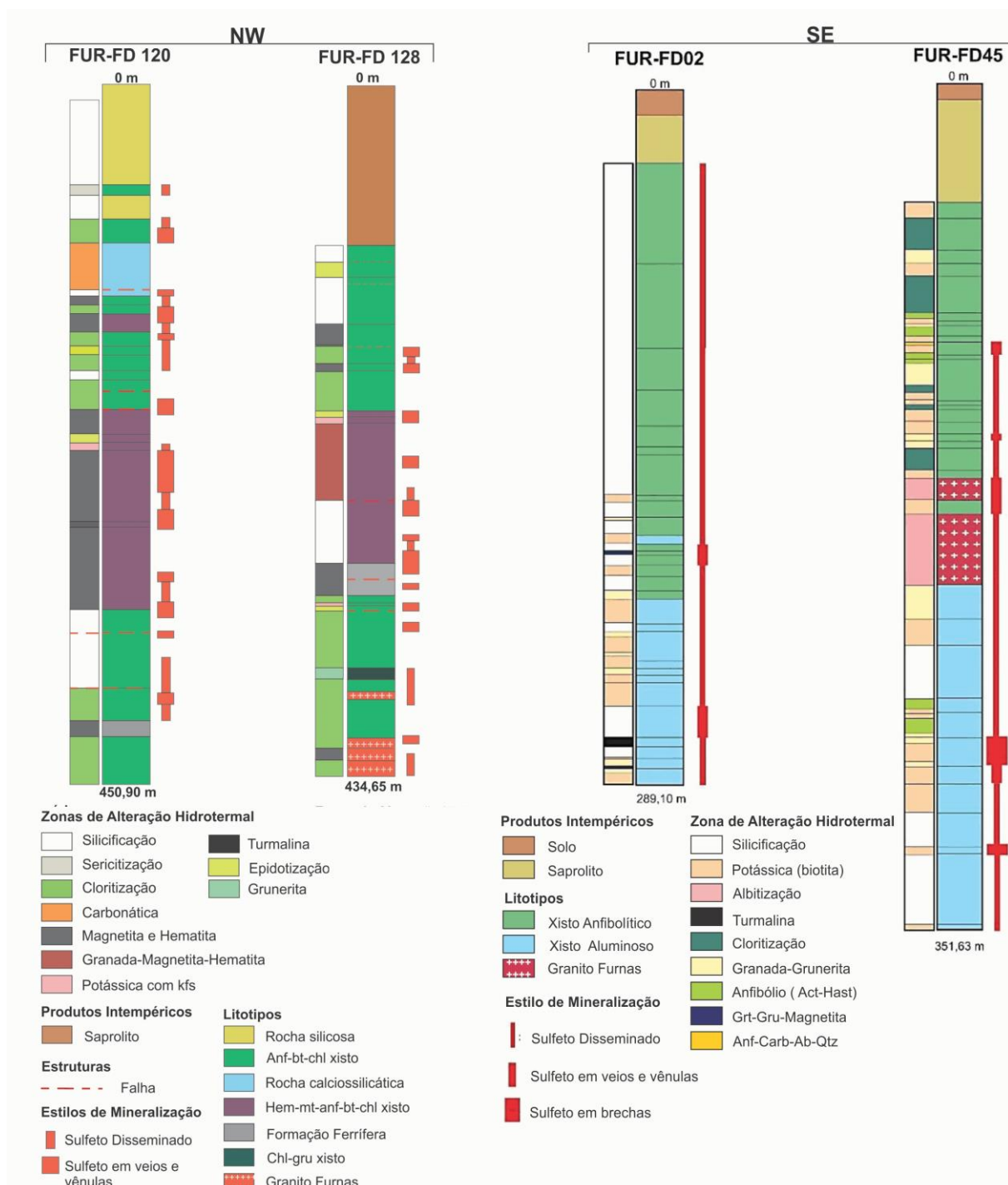


Figura 28. Distribuição de litotipos em concordância com a descrição macroscópica dos testemunhos de sondagem FUR FD120 e FUR FD 128 do setor NW do depósito cupro-aurífero Furnas a esquerda. Perfis propostos por Jesus (2016) referentes aos testemunhos de sondagem FUR FD02 e FUR FD45 a direita. Abreviações: Hem = hematita, Mt = magnetita, Chl = clorita, Anf = anfibólio, Bt = biotita, Gru =grunerita, Kfs = feldspato potássico, Carb = carbonato, Hast = hastingsita, Act = actinolita.

A análise e comparação entre os perfis dos dois setores evidencia a diferença já esperada entre os litotipos presentes, as alterações hidrotermais atuantes e consequentemente o tipo de mineralização de cobre.

O setor SE apresenta uma marcada variação entre os litotipos caracterizados, apresentado uma zona de *hangingwall* composta estritamente por xistos anfibolíticos, como clorita-(granada)-anfibólio-biotita xisto, hastingsito, clorita-grunerita xisto, granada-biotita xisto e granada-grunerita xisto e uma zona de *footwall* composta estritamente por xistos aluminosos, caracterizados como andalusita-biotita-muscovita xistos. Ambas as zonas, de *hangingwall* e *footwall* apresentam interceptos do Granito Furnas, extremamente hidrotermalizado, com obliteração quase que total das feições do protólito. Enquanto que o setor NW apresenta uma variação litológica muito mais expressiva, apresentando pacotes de quartzo milonitos, rochas calciossilicáticas e clorita-biotita xistos na zona de *hangingwall*, formações ferríferas bandadas, clorita-biotita xistos, biotita-anfibólio xistos e remanescentes do Granito Furnas na zona de *footwall*.

Analisando a relação espacial entre as alterações hidrotermais identificadas é evidente o papel da composição dos protólitos na determinação da assembleia mineral característica de cada alteração, assim como a relação dos litotipos para a determinação da precipitação de minérios. No setor SE, a mineralização composta por calcopirita, pirita, bornita e calcocita ocorre predominantemente disseminados na matriz (perfis a direita) e associados espacialmente aos xistos anfibolíticos com alteração hidrotermal caracterizada pelo enriquecimento em ferro, ricos em grunerita e magnetita. No setor NW, a mineralização composta por pirita e calcopirita, ocorre predominantemente em veios e vênulas associada espacialmente ao pacote de clorita-biotita xistos e formações ferríferas bandadas, com intenso enriquecimento em ferro com a remobilização de hematita e magnetita.

6. DISCUSSÕES

6.1. Natureza dos protólitos

As rochas descritas em ambos os setores do depósito Furnas encontram-se intensamente hidrotermalizadas e deformadas, no entanto, as características descritas utilizadas para diferenciar cada litotipo, inferem que os processos de alteração hidrotermal ou a composição de distintos protólitos foram determinantes para tal distinção.

Para o setor SE, como já proposto por Iguma (2015), os diferentes litotipos caracterizados são interpretados como resultado da alteração de ao menos três protólitos distintos. Referente aos xistos anfibolíticos presentes com maior expressão na zona de *hangingwall*, infere-se um protólito rico em anfibólios, resultante do metassomatismo da sequência metavulcanosedimentar referente ao Grupo Rio Novo (Hirata et al., 1982). Assim como para os xistos aluminosos infere-se uma contribuição de rochas aluminosas ricas em andalusita e estauroлита, também pertencentes ao Grupo Rio Novo. Esta hipótese pode ser reafirmada pela presença de rochas aluminosas ricas em andalusita e estauroлита, pouco

deformadas e hidrotermalizadas observadas em zonas distais à mineralização do depósito Furnas.

Enquanto que o terceiro protólito é inferido como referente a um monzogranito definido como Granito Furnas, observado intercalado e em porções restritas dos furos de sondagem descritos. Esse granito seria associado à suíte Granítica Igarapé Gelado, que é reconhecido regionalmente na área da Zona de Cisalhamento do Cinzento. Neste setor, o Granito Furnas ocorre intensamente hidrotermalizado e cisalhado, com intensa albitização seguida por uma alteração potássica pervasiva, sendo possível identificá-lo somente por suas feições reliquias.

Para o setor NW, são inferidos ao menos quatro protólitos distintos. O primeiro refere-se a um possível arenito quartzoso, que teria dado origem ao quartzo milonito, observado na zona mais rasa do depósito. A presença de grande quantidade de quartzo recristalizado, uma possível estratificação preservada e paralela à foliação milonítica, observada em campo, e a expressiva extensão do pacote, associada à sequência metavulcanossedimentar da Bacia de Carajás, representam fatores suficientes para a classificação do protólito do quartzo milonito como uma rocha de origem sedimentar clástica, descartando a possibilidade de se tratar de uma zona de intensa silicificação.

O segundo possível protólito teria uma natureza vulcânica ácida, com grande quantidade de quartzo e feldspato recristalizado, preservado em lentes e bolsões, envoltos por *fronts* de clorita, de muscovita resultante de alteração hidrolítica e calcita associada à alteração carbonática, observados na lente de anfibólio-biotita-sericita xisto e no pacote de rochas calciossilicáticas, localizados na zona de *hangingwall*.

O terceiro litotipo é caracterizado como uma formação ferrífera bandada, facilmente identificada devido a preservação do seu bandamento e a sua grande quantidade de óxidos de ferro. A definição dessas rochas como formações ferríferas bandadas é reiterada por descrições da Vale S.A. de rochas pouco alteradas, distais ao depósito Furnas, também caracterizadas como BIF.

O último protólito, identificado na zona de *footwall*, é caracterizado como um monzogranito referente ao Granito Furnas. Ao contrário do setor SE, é observado com grande expressão na base dos furos de sondagem descritos, sendo possível identificar a gradação de rochas pouco alteradas, para zonas intensamente hidrotermalizadas, passando a apresentar feições do clorita-biotita xisto (ou milonito).

6.2. Alteração hidrotermal

O zoneamento da alteração hidrotermal observado em cada setor do depósito Furnas apresenta características distintas de um setor para o outro. Apesar de ambos apresentarem um zoneamento e sequência de eventos semelhantes, com alteração hidrolítica, carbonática, clorítica e epidotização em zonas distais, alteração sódica e sódico-cálcicas em zonas intermediárias e enriquecimento em ferro e alteração potássica em zonas proximais ao envelope da mineralização, característicos de depósitos da classe IOCG, como proposto por Hitzman (1992), a distinção quanto à expressão, modo de ocorrência e assembleia mineralógica de cada tipo de alteração é relativamente marcante.

O setor SE apresenta uma sequência de alteração hidrotermal predominantemente controlada por estruturas dúcteis e dúcteis-rúpteis, como a foliação milonítica e veios sin-deformacionais. Iniciada pela albitização, restrita a zonas de ocorrência do Granito Furnas e a vênulas tardias, foi seguida pela alteração sódico-cálcica, bastante expressiva com a formação de hastingsita compondo rochas monominerálicas, além de zonas com intensa alteração potássica e formação de biotita, atuante em todas as rochas observadas. Esses estágios de alteração foram seguidos por enriquecimento em ferro resultando em rochas bandadas com alternância de grunerita e clorita, e formação de cristais de magnetita associados. A cloritização foi o evento mais tardio e restrito, sobrepondo-se à alteração potássica, e substituindo parcialmente os cristais de biotita. Alterações tardias como formação de feldspato potássico, epidotização e veios de carbonato são pouco expressivos e ocorrem de forma restrita.

No setor NW, a alteração hidrotermal foi controlada tanto por estruturas dúcteis, principalmente a foliação milonítica, quanto, com uma contribuição mais expressiva, por estruturas rúpteis, tais como falhas, fraturas, veios, vênulas e brechas hidrotermais muitas vezes configurando padrões do tipo *stockwork*. A sequência de alteração observada é muito distinta da observada no setor SE, com a presença de expressivas zonas de silicificação associadas com epidotização e alteração potássica com formação de feldspato potássico, zonas com intensa alteração carbonática; presença de alteração hidrolítica em rochas do *hangingwall* e no Granito Furnas; e enriquecimento em ferro com formação de grunerita mais restrito, além da formação de hematita e magnetita de forma pervasiva na matriz resultando em rochas maciças, muitas vezes compostas predominantemente por óxidos de ferro.

A comparação entre os setores SE e NW possibilita concluir que os dois setores apresentam um intenso controle estrutural e zoneamento da alteração hidrotermal característico de depósitos da classe IOCG. Apresentando distinção quanto a expressão e assembleia mineralógica característica de cada alteração. Pode-se inferir que tais variações

sejam resultado da alteração de protólitos de natureza distinta, além da sobreposição de múltiplos estágios de alteração hidrotermal com contribuição de diferentes fluidos, explicando, por exemplo, a presença de pacotes de rochas com expressiva alteração carbonática e extenso com enriquecimento em ferro associado espacialmente aos BIF, observados no setor NW e ausentes no setor SE.

6.3. Mineralização de Cobre e Ouro

A mineralização em cada setor ocorre de forma claramente distinta, tanto em relação a tipologia do minério, quanto em relação ao modo de ocorrência. No setor SE a mineralização foi caracterizada principalmente pela presença de bornita e calcocita com pirita e calcopirita subordinados, além de elementos traço e ETR associados a fases silicatadas. A mineralização ocorre associada a zonas silicificadas e a grunerita, clorita e magnetita, na forma de veios e vênulas sin-deformacionais a tardias, configurando vênulas deformadas e concordantes à foliação a vênulas discordantes configurando padrões tipo *stockwork*.

Já o setor NW apresenta uma mineralização caracterizada pela formação de calcopirita e pirita associados a hematita, magnetita e a minerais hidrotermais tardios, tais como epidoto, albita, calcita e clorita associados a zonas silicificadas. Distinta do setor SE, a mineralização do setor NW é quase que totalmente controlada por estruturas rúpteis, observadas em veios e vênulas concordantes a discordantes e brechas em padrão *stockwork*, com pouca contribuição de estruturas dúcteis-rúpteis compondo vênulas deformadas e dobradas. Sugere-se para próximos estudos a análise dos sulfetos e veios de hematita e magnetita a partir de microscopia eletrônica de varredura com o uso de elétrons retroespalhados, com o objetivo de encontrar ouro e elementos traço, assim como a análise de porfiroblastos de apatita e monazita procurando identificar ETR.

Portanto, comparando-se os setores SE e NW, a principal distinção entre os dois é relativa a tipologia do minério e ao seu controle estrutural. Infere-se que a distinção da tipologia de minério observada possa ser explicada pela possível contribuição de diferentes fontes de fluidos mineralizantes atuante em cada setor. Para o setor SE, Jesus (2016) inferiu a possível contribuição tardia de fluidos exsolvidos durante a cristalização do Granito Cigano, localizado a leste do depósito Furnas durante os estágios essencialmente rúpteis registrados nesse setor do depósito (e.g. cloritização, epidotização e veios de quartzo com calcopirita-bornita do segundo estágio de mineralização). Já para o setor NW pode-se inferir uma contribuição mais expressiva de tais fluidos, associados a um controle mais significativo de estruturas rúpteis na evolução dessa porção do depósito, resultando em cloritização e epidotização, associadas a feldspato potássico, hematita e limonita, ainda mais expressiva.

7. CONCLUSÕES

Ao final do trabalho realizado é possível concluir que existem diferenças marcantes entre os setores SE e NW do depósito Furnas, referentes aos litotipos presentes, ao zoneamento da alteração hidrotermal, à tipologia de minério e ao tipo de controle estrutural da alteração hidrotermal e da mineralização.

O setor SE apresenta uma nítida variação litológica caracterizada por xistos anfibolíticos, incluindo clorita-(granada)-anfíbólio-biotita xisto, hastingsito, clorita-grunerita xisto, granada-biotita xisto e granada-grunerita xisto, localizados na zona de *hangingwall*, e xistos aluminosos, caracterizados como andalusita-biotita-muscovita xistos na zona de *footwall*, ambos interceptados por apófises do Granito Furnas, intensamente hidrotermalizado.

A alteração hidrotermal é caracterizada por uma sequência de múltiplos estágios de alteração, iniciada pela intensa albitização, principalmente atuante no Granito Furnas, seguida pelos estágios de silicificação, alteração potássica com formação de biotita pervasiva e em *fronts*, formação de granada, alteração sódico-cálcica com a formação de anfibólios como a hastingsita, enriquecimento em ferro com a formação de *fronts* de grunerita e cristalização de magnetita na matriz, e estágios tardios caracterizados pela formação de *fronts* de clorita pervasiva e veios de hastingsita, associados a veios de biotita, quartzo e albita. A tipologia de minério é definida pela presença de sulfetos, incluindo pirita, calcopirita e, predominantemente, bornita a calcocita, associados espacialmente a grunerita, magnetita, zonas silicificadas e a albita hidrotermal, com associação de ouro e elementos menores, como V (rutilo); Os Ir, Th, Y, Ce, Te, Nd, Gd e U (thorogumita e/ou soddyita); Nd, La, Ce (bastnasita); Ce e La (monazita e bastinasita), Pd e Se (galena); Sr, Nb e W (ferberita/wolframita) e Ag e Te (hessita).

O setor NW também apresenta uma nítida distinção em relação a sequência de litotipos descritos apresentando pacotes de quartzo milonitos, rochas calciossilicáticas e clorita-biotita xistos na zona de *hangingwall*, formações ferríferas bandadas, clorita-biotita xistos, biotita-anfíbólio xistos e remanescentes do Granito Furnas na zona de *footwall*.

A sequência de alteração hidrotermal é caracterizada pela sobreposição de estágios de alteração iniciada com a silicificação e alteração sódica com formação de albita; seguida pela alteração hidrolítica pervasiva com formação de muscovita; formação de granada; alteração sódico-cálcica com formação de tremolita/actinolita nas rochas calciossilicáticas e *fronts* de hastingsita no biotita-anfíbólio xisto; formação de turmalina, alteração potássica com formação de biotita e formação de feldspato potássico pervasivo na matriz ou em vênulas; formação de apatita; e enriquecimento em ferro com formação de grunerita e

expressiva remobilização de hematita e magnetita, em estágios dúcteis, pré, sin e tardi- (Sn+1), além de estágios tardios de regime rúptil como a alteração carbonática, cloritização, epidotização. A mineralização é caracterizada pela presença de calcopirita e pirita, associada espacialmente a hematita e magnetita.

A distinção quanto aos litotipos descritos para cada setor pode estar relacionada à diferença na natureza dos protólitos, assim como a diferença nas alterações hidrotermais associadas, que refletem a natureza dos protólitos e a possível composição e origem dos fluidos mineralizantes. Infere-se que o setor NW tenha uma contribuição mais importante de fluidos exsolvidos durante a cristalização do Granito Cigano, durante o Paleoproterozoico, enquanto que para o setor SE uma contribuição maior possa ser referente a fluidos hidrotermais canalizados ao longo da Zona de Cisalhamento de Cinzento, que controlou os estágios de alteração hidrotermal sincrônicos ao seu desenvolvimento no Neoarqueano. O papel do Granito Furnas, como fonte de fluidos, metais ou energia para o estabelecimento do sistema hidrotermal, contudo, é incerto e deve ser melhor compreendido.

O papel do controle estrutural da alteração hidrotermal e da mineralização atuante em cada setor também é distinto. O setor SE apresenta a alteração hidrotermal e a mineralização estruturalmente controladas por estruturas dúcteis e rúpteis-ducteis, associadas à Zona de Cisalhamento do Cinzento, ao contrário do que se observa no setor NW, onde a alteração hidrotermal ocorre em múltiplos estágios, tanto controladas por estruturas dúcteis, quanto dúctil-rúpteis e rúpteis, embora a mineralização desse setor tenha sido totalmente controlada por estruturas rúpteis. Conclui-se então, a partir da comparação entre os dois setores, que o setor SE apresenta controle estrutural predominantemente dúctil, enquanto o setor NW apresenta predominante controle estrutural rúptil, evidenciando a história complexa de evolução tectônica do depósito Furnas, associada a deformação e cisalhamento atuante da Zona de Cisalhamento de Cinzento.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, J. A. C., Dall'Agnol, R., Leite, A. S. 2013. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 42, 103-126.
- Alves, M.A. 2016. *Tipologias de minério e assinatura isotópica de enxofre do depósito de cobre-ouro Furnas, Província Carajás*. Monografia (Trabalho de Formatura). São Paulo. Universidade de São Paulo.
- Araújo, O.J.B. and Maia, R.G.N., 1991 - Serra dos Carajás, folha SB.22-ZA, Estado do Pará. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil*. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 136 p.
- Avelar VG, Lafon JM, Correia FC Jr, Macambira BEM (1999) O magmatismo arqueano da região de Tucumã, Província Mineral de Carajás, Amazônia Oriental, Brasil: novos dados geocronológicos. *Rev Bras Geoc.*, 29:453–460.
- Barbosa J.P.O. 2004. *Geologia Estrutural, Geoquímica, Petrografia e Geocronologia de granitóides da região do Igarapé Gelado, norte da Província Mineral de Carajás*. Dissertação de Mestrado, UFPA, 96p.
- Barros, C.E.M., Barbey, P. 2000. Significance of garnet-bearing metamorphic rocks in the archean supracrustal series of the Carajás Mining Province, Northern Brazil. *Revista Brasileira de Geologia*, 30 (3): 367-370.
- Barros C.E.M., Sardinha A.S., Barbosa J.P.O., Macambira M.J.B. 2009. Structure, Petrology, Geochemistry and zircon U/Pb and Pb/Pb geochronology of the synkinematic Archean (2.7 Ga) A-type granites from the Carajás Metallogenic Province, northern Brazil. *Can. Miner.* 47: 1423 - 1440.
- Cordani, U.G., Sato, K., Teixeira, W., Tassinari, C.G., Basei, M. A. S. (2000). Crustal Evolution of the South American Platform. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A. (ed.). 31st IGC, Rio de Janeiro, Brazil, Spec. Publ. 19-40. [A summarization of the crustal evolution of the South American Platform.]
- Dall'Agnol, R., Rämö O.T., Magalhães M.S., Macambira M.J.B. 1999. Petrology of the anorogenic, oxidised Jamon and Musa granites, Amazonian craton: implications for the genesis of Proterozoic A-type granites. *Lithos* 46: 431–462.
- Dall'Agnol, R., Lafon, J.M., Macambira, M.J.B., 1994. Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian Province, Amazonian Craton: geochronological, petrological and geochemical aspects. *Miner. Petrol.* 50: 113-138.
- Dall'Agnol, R., Teixeira, N.P., Rämö, O.T., Moura, C.A.V., Macambira, M.J.B. and Oliveira, D.C., 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi, A-type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos*, 80: 101-129.

- Dall'Agnol, R., Oliveira, M.A., Almeida, J.A.C., Althoff, F.J., Leite, A.A.S., Oliveira, D.C., Barros, C.E.M. (2006) Archean and paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian craton. In: Symposium on magmatism, crustal evolution and metallogenesis of the Amazonian Craton, Belém, Excursion Guide. pp 99–150.
- Docegeo 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. In: Cong. Bras. Geol., 35, SBG, p. 11-54.
- Feio, GRL., Dall'Agnol, R., Dantas, E.L., Macambira, M.J.B., Gomes, A.S., Sardinha, D.C., 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2012.02.020>
- Hirata W.K., Rigon J.C., Kadekaru K., Cordeiro A.A.C., Meireles E.A. 1982. Geologia Regional da Província Mineral de Carajás. In: Simp. Geol. Amaz. 1, Belém, SBG/NO, p. 100 – 110.
- Hitzman, M.W. 2000 -Iron Oxide-Cu-Au Deposits: What, Where, When and Why; in Porter, T.M. (Ed.), *Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits: A Global Perspective*, Volume 1; PGC Publishing, Adelaide, pp 9-25.
- Hitzman, M.W., Oreskes, N., Einaudi, M.T. 1992, Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-LREE) deposits: *Precambrian Research*, v. 58, p. 241-287.
- Huhn S.B., Macambira M.J.B., Dall'Agnol R. 1999b. Geologia e geocronologia Pb-Pb do Granito Alcalino Planalto, Região da Serra do Rabo, Carajás-PA. In: SBG, Simp. Geol. Amaz., 6, Boletim de Resumos, p. 463-466.
- 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. Exame de 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. *Precamb. Res.* 49: 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.
- Nogueira, A.C.R., Truckenbrodt, W., Pinheiro, R.V.L. 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica. *Bol. Mus. Par. Em. Goeldi, Ciênc. da Terra*, **7**: 177 - 277.
- Oliveira, C.G., Santos, R.V., Lafon, J.M. 1994. Variação da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ durante a evolução da zona de cisalhamento aurífera de Diadema, Sudeste do Pará. In: 38 Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú. *Resumos Expandidos*. **2**: 415-416p.
- Santos, A. & Pena Filho, J.I.C. 2000. Xinguara: folha SB.22-Z-C. Estado do Pará, escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 1 CD-ROM. Programa Levantamentos Geológicos.
- 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, p. 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.
- Sardinha A.S., Barros C.E. de M., Krymsky M. 2006. Geology, geochemistry and U–Pb geochronology of the Archean (2.74Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Metalogenetic Province, northern Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* **20**: 327 – 339.
- Souza, S.R.B., Macambira M.J.B., Sheller T. 1996. Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaiúnas (Serra dos Carajás, PA), implicações estratigráficas. In: Simp. Geol. Amaz., 5, Belém, 380–383.
- Souza, Z.S.; Potrel A.; Lafon, J.M.; Althoff, F.J.; Pimentel, M.M.; Dall'Agnol R.; Oliveira, C.G. 2001. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the Archean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. *Precambrian Research*, **109**:293 – 315.
- Tallarico, F.H.B. 2003. O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil. Tese de Doutorado, UNICAMP, 229p
- Tassinari, C.C.G. 1996. O mapa geocronológico do Cráton Amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos. Tese de Livre Docência, IG-USP, 139p.
- Tassinari, C. C. G., Macambira, M. J. B. (2004). A evolução tectônica do Cráton Amazônico. 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.

- Teixeira, W., Tassinari, C.C.G., Cordani, U.G., Kawashita, K. 1989. A review of the geochronological of the Amazonian Craton: tectonic implications. *Precambrian Research*, 42: 213-227.
- Vale S.A. 2010. Projeto Furnas, Relatório Final de Pesquisa. DNPM.
- Vasquez, L.V., Rosa-Costa, L.R., Silva, C.G., Ricci, P.F., Barbosa, J.O., Klein, E.L., Lopes, E.S., Macambira, E.B., Chaves, C.L., Carvalho, J.M., Oliveira J.G., Anjos G.C., Silva H.R. 2008. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: Texto Explicativo dos Mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Organizadores: M.L Vasquez, L.T. Rosa-Costa. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.
- Williams, P. J., Barton, M. D., Johnson, D. A., Fontboté, I., Halter, A. D, Mark, G., Oliver, N.H.S., Marschik, R., 2005. Iron-oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin. *Society of Economic Geologists*, 100th Anniversary Volume 2005, pp. 371-405.
- 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.