

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DOS XISTOS ALUMINOSOS
HOSPEDEIROS DO DEPÓSITO CUPRO-AURÍFERO FURNAS, PROVÍNCIA
MINERAL DE CARAJÁS: IMPLICAÇÕES PARA A EVOLUÇÃO DO SISTEMA
MINERAL**

Jeannine Morcos

Orientadora: Profa.Dra. Lena Virgínia Soares Monteiro
Co-orientadora: Silvandira dos Santos Góes Pereira de Jesus

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2016 / 22)**

SÃO PAULO
2016

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DOS XISTOS ALUMINOSOS
HOSPEDEIROS DO DEPÓSITO CUPRO-AURÍFERO FURNAS, PROVÍNCIA
MINERAL DE CARAJÁS: IMPLICAÇÕES PARA A EVOLUÇÃO DO SISTEMA
MINERAL**



Jeannine Morcos

Orientadora: Profa.Dra. Lena Virgínia Soares Monteiro

Co-orientadora: Silvandira dos Santos Góes Pereira de Jesus

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

(TF-2016 / 22)

SÃO PAULO

2016

IGc-Instituto de Geociências



Caracterização petrográfica dos xistos aluminosos
hospedeiros do depósito cupro-aurífero Furnas
M27136

AGRADECIMENTOS

À minha avó Ilva que, desde que eu era criança, acreditou nos meus sonhos e fez de tudo para tentar torná-los realidade. O céu esteve em festa no dia 30 de Junho de 2016.

Aos meus pais Márcia e João por terem tornado possível toda essa jornada até agora e por terem me incentivado a levantar após cada queda, ainda mais forte.

Às minhas irmãs Alexandra e Michelle por serem grandes aliadas, verdadeiras amigas e conselheiras, que sempre se mostraram presentes e que me ajudaram, mesmo à distância, a superar momentos difíceis.

À Si, que foi uma das minhas três mães e que nos ajudou a vida toda e, muitas vezes, abdicou dos seus afazeres pessoais para nos ajudar dentro e fora de casa e esteve ao nosso lado, firme e forte, para o que desse e viesse. Obrigada!

Aos meus grandes amigos Preto (Pringles), Rafa, Samba, Pillow e Rabão por terem me deixado fazer parte desse momento tão importante de suas vidas e por terem me proporcionado momentos maravilhosos e me ajudado em situações difíceis.

Aos ótimos amigos que me ajudaram na “escola da vida” Tetê, Mari, Jão, José, Lucas, Mega, Lili, Erik, Virgínia e a pequena-grande Maria Flor, obrigada por terem me aberto os olhos de forma que muitos nunca nem tentaram, porque é, simplesmente, mais fácil olhar para o outro lado e ignorar a escuridão do mundo.

Às minhas amigas de infância Dori, Mafê e Lígia, que provaram que o tempo não apagou momentos nem diminuiu nossos sentimentos.

Aos meus amigos do Krav Magá e também ao meu instrutor Duda. Obrigada a todos por me mostrarem um outro jeito de olhar para o mundo e para dentro de nós mesmos.

Ao meu namorado Leandro que teve muita paciência comigo ao longo dos últimos anos e segurou minha mão em momentos magníficos e em momentos devastadores.

Aos que me ajudaram na parte do Laboratório Jordana e Gabriel, obrigada pela paciência! E também agradeço a minha co-orientadora Dira, por ser uma pessoa tão forte, cheia de vida e esforçada que fez um trabalho excelente, possibilitando que ele fosse uma confiável e sólida fonte para levantamentos bibliográficos.

À minha orientadora Lena por mostrar-se sempre presente para sanar minhas dúvidas e também por sua paciência e dedicação ao me ajudar a elaborar o Trabalho de Formatura.

“A ciência é o resultado de um processo de descoberta que se baseia na observação e na experimentação. Ela nos permite entender como o mundo funciona e nos ajuda a prever e controlar os fenômenos naturais. A ciência é uma forma de conhecimento que busca a verdade através da razão e do método científico. Ela é fundamental para o desenvolvimento da sociedade e para a melhoria da qualidade de vida das pessoas. A ciência é uma ferramenta poderosa que nos ajuda a compreender o universo e a nos conectar com ele de maneira mais profunda. Ela é uma fonte de inspiração e de esperança para o futuro. A ciência é uma parte essencial da cultura humana e deve ser valorizada e promovida.”

Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância.
John F. Kennedy

RESUMO

O depósito de cobre-ouro Furnas (500 Mt @ 0,7% Cu), localizado na porção norte da Província Carajás no Pará, ocorre ao longo de um *trend* mineralizado de 9 km de extensão e direção preferencial WNW-ESE, na Zona de Falha Transcorrente do Cinzento.

As rochas hospedeiras desse depósito são representadas, na zona de *hanging wall*, por xistos anfibolíticos e relíquias do Granito Furnas; já a zona de *footwall* é representada por xistos aluminosos.

Os xistos aluminosos, de posicionamento estratigráfico ainda incerto, revelam parte de uma complexa história metamórfica-metassomática, que foi alvo desse estudo. Essas rochas foram classificadas em seis litotipos: Biotita xisto; Granada-grunerita xisto; Clorita-(muscovita) xisto silicificado; (Andalusita)-biotita-granada xisto; (Andalusita)-quartzo-xisto e Andalusita-muscovita-(biotita)-quartzo xisto.

Associações metamórficas dos xistos aluminosos, prévias ao cisalhamento, incluem andalusita-(estaurolita)-almandina-biotita-muscovita-quartzo, que indicam condições compatíveis com as de fácies anfibolito em baixa pressão a partir de protólitos pelíticos. Essa paragênese metamórfica pode ser decorrente de efeitos de metamorfismo termal, possivelmente relacionados à colocação do Granito Furnas e/ou reflexo do metamorfismo regional.

Nota-se intensidade dos processos de alteração hidrotermal (silicificação, alteração potássica, cristalização de granada, grunerita, magnetita, clorita e mineralização cupro-aurífera), revelada através das associações minerais presentes nos litotipos, na área do depósito Furnas.

A presença de vênulas de estilpnometano, carbonato, adulária-albita-titanita e muscovita-apatita-escapolita-titanita, sin- a tardí-cisalhamento marca a transição para condições rúpteis-dúcteis que controlaram parte da mineralização cupro-aurífera do depósito Furnas.

ABSTRACT

The Furnas copper-gold deposit (500 Mt @ 0,7% Cu), located at the northern part of Carajás Province, represents a mineralized trend with 9 km of extension and preferential direction NWN-ESE, within the Cinzento Transcurrent Fault Zone.

The host rocks of the Furnas deposit are represented by amphibole schist and relicts of the Furnas granite, at the hangingwall zone. The footwall zone comprises by aluminous schists.

The aluminous schists, with yet unknown stratigraphic position, reveal the complexity of the metamorphic and metasomatic history of the Furnas deposit and is the subject of this study. They were classified into six different groups: Biotite schist, Garnet-grunerite schist, Silicified chlorite-(muscovite) schist, (Andalusite)-biotite-garnet schist, Andalusite-quartz schist and Andalusite-muscovite-(biotite)-quartz schist.

All these lithotypes show metamorphic foliation (Sn), locally crenulated due to the development of the Sn+1 foliation, and transposed by the mylonitic foliation (Sm) associated with the development or reactivation of the Cinzento Transcurrent Fault Zone.

The metamorphic association of the aluminous schist, previous from the shearing, includes andalusite-(stauroite)-almandina-biotite-muscovite-quartz, which indicates conditions compatible with the amphibolite facies under low pressure from protoliths. The metamorphic paragenesis can be consequence of thermal metamorphism, probably related with the emplacement of the Furnas Granite and/or reflex from the regional metamorphism.

It is possible to notice the intensity of the hydrothermal alteration (silicification, potassic alteration, garnet, grunerite, magnetite, chlorite crystallization and copper-gold mineralization) due to mineral associations in all these lithotypes of the Furnas Deposit.

The presence of stilpnomelane, carbonate, adularia-albite-titanite and muscovite-apatite-scapolite-titanite in sin- to tardi-Sm veinlets, mark the transition to ductile-brITTLE conditions that controlled part of the copper-gold mineralization in the Furnas Deposit.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	3
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
4.1. Contexto Geológico Regional	4
4.2. Província Mineral Carajás	4
4.3. Depósito Cupro-aurífero Furnas.....	9
5. RESULTADOS OBTIDOS	11
5.1. Caracterização petrográfica dos xistos aluminosos.....	11
5.1.1. (Andalusita)-muscovita-quartzo xisto	13
5.1.2. Andalusita-muscovita-(biotita)-quartzo xisto	16
5.1.3. (Andalusita)-biotita-granada-xisto	20
5.1.5. Clorita-(muscovita) xisto silicificado.....	26
5.1.6. Granada-grunerita xisto	30
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	33
7. CONCLUSÕES	34
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

1. INTRODUÇÃO

Após a descoberta do depósito de cobre-urânio-ouro de Olympic Dam na Austrália, em 1975, e de seus notáveis recursos (10,1 bilhões de toneladas com teores de 0,78% Cu, 0,25 kg/t U₃O₃, 0,30 g/t Au e 1 g/t Ag; Ehrig, 2015), diversos estudos foram iniciados visando a compreensão de sua gênese e tipologia, desconhecida até então. Quase duas décadas depois, Hitzman *et al.* (1992) consideraram *Olympic Dam* como o depósito-tipo de uma nova classe, denominada *Iron Oxide-Copper-Gold* (ou IOCG). Essa nova classe foi amplamente aceita por diversos autores (e.g. Williams *et al.*, 2005; Groves *et al.*, 2010), apesar de ser considerada, até há pouco tempo na literatura internacional, como uma das mais enigmáticas classes de depósitos minerais.

Com grande importância metalogenética e econômica, a Província Mineral de Carajás, possui os únicos exemplares de depósitos cupro-auríferos atribuídos à classe IOCG de idade arqueana reconhecidos do mundo e também conta com uma das maiores concentrações de depósitos IOCG de alta tonelagem existentes (Monteiro *et al.* 2008a). Nesta província, destacam-se os depósitos Salobo (1.112 Mt @ 0,69% Cu e 0,43 g/t Au e 0,55 g/t Ag; VALE, 2012), Igarapé Bahia-Alemão (219 Mt @ 1,4% Cu e 0,86 g/t Au; Tallarico *et al.*, 2005), Sossego (355 Mt @ 1,5 % Cu e 0,28 g/t Au; Lancaster *et al.*, 2000), Alvo 118 (170 Mt @ 1,0% Cu e 0,3 g/t Au; Rigon *et al.*, 2000) e Cristalino (482 Mt @ 0,65% Cu e 0,06 g/t Au; NCL Brasil, 2005).

Acredita-se que os depósitos IOCG da Província Mineral Carajás possuam natureza híbrida (Chiarradia *et al.*, 2006; Dreher *et al.* 2008; Monteiro *et al.*, 2008a, b; Xavier *et al.*, 2012), ou seja, que o sistema hidrotermal responsável pela gênese dos depósitos teve influência não só de componentes magmáticos como também não-magmáticos. A natureza híbrida das fontes de fluidos e metais exerce papel fundamental na complexidade desses sistemas hidrotermais, revelada pela variedade de atributos que cada um dos depósitos da Província apresenta.

O Depósito Furnas, também inserido na Província Mineral Carajás, destaca-se por seus recursos (500 Mt @ 0,7% Cu; Vale, 2010; Jesus, 2015) e contexto geológico peculiar.

Além de relatórios internos da VALE S/A, que é detentora dos direitos minerários do depósito Furnas, existem apenas dois estudos anteriores sobre esse depósito: o de Santos (2014) que usou dados geofísicos para auxiliar na prospecção dos corpos de minério no setor sudeste do depósito e o Trabalho de Formatura de Iguma (2015), que caracterizou as zonas de alteração hidrotermal a partir de estudos petrográficos. Adicionalmente, a Dissertação de Mestrado da co-orientadora desse estudo, Silvandira dos Santos Góes Pereira de Jesus, objetiva a reconstituição da história evolutiva do depósito IOCG de

Furnas, com ênfase em estudos de química mineral, enquanto o Trabalho de Formatura de Maíra Antunes Nunes, também desenvolvido em 2016, visa à caracterização das tipologias de minério de cobre e suas assinaturas de isótopos de enxofre.

Nesse estudo será apresentada a caracterização petrográfica de uma das unidades hospedeiras do depósito, representada por xistos aluminosos (Vale, 2010). Essa unidade possui posicionamento estratigráfico incerto, tendo sido atribuída por Santos (2014) à Formação Águas Claras (Nogueira *et al.*, 1995), que representa uma unidade metassedimentar, possivelmente paleoproterozoica, ou ao Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988). Sua associação mineral, que inclui andalusita, muscovita, estaurolita e sillimanita, contudo, não foi reportada previamente em nenhuma das unidades geológicas reconhecidas regionalmente na Província Carajás. Em especial, tanto a Formação Águas Claras como o Supergrupo Itacaiúnas registram condições metamórficas das fácies sub xisto verde a xisto verde, não condizentes com a associação típica dos xistos aluminosos do depósito Furnas.

Este Trabalho de Formatura, portanto, pretende não só apresentar a caracterização das paragêneses dos xistos aluminosos como também adicionar informações sobre a sua história metamórfica, a partir das relações entre blastese mineral e as microestruturas. A relação do conjunto de litotipos com os processos metamórficos (regional, termal ou dinâmico) do Depósito Furnas precisa ser melhor compreendida, bem como sua relação com a colocação dos granitos Furnas, de idade incerta, e Cigano, paleoproterozoico, que estão espacialmente próximos ao depósito.

Dessa forma, esse estudo poderá preencher importantes lacunas na compreensão da gênese das mineralizações cupro-auríferas do depósito Furnas, a partir de avanços no entendimento da evolução geológica do sistema mineral responsável pela metalogênese de cobre na Província Carajás.

2. OBJETIVOS

O presente Trabalho de Formatura objetiva a caracterização petrográfica dos xistos aluminosos do depósito cupro-aurífero Furnas, localizado na Província Mineral de Carajás, visando:

- Caracterização das paragêneses metamórficas e hidrotermais registradas nos xistos aluminosos;
- Reconhecimento das relações de blastese mineral e microestruturas;
- Identificação do tipo de metamorfismo (regional, dinâmico, termal) associado às paragêneses minerais dos xistos aluminosos;

- Caracterização do papel do metamorfismo na história evolutiva do depósito cupro-aurífero Furnas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos empregados nesse trabalho foram:

(a) **Revisão Bibliográfica:** foram consultadas teses, dissertações, artigos em periódicos nacionais e internacionais, trabalhos em anais de eventos e trabalhos finais de graduação que contém informações sobre o Cráton Amazônico, sobre a Província Mineral Carajás e os depósitos cupro-auríferos.

(b) **Descrição de amostras:** foram descritos, com auxílio de lupa binocular, testemunhos de sondagem representativos da unidade metassedimentar (xistos aluminosos) hospedeira da mineralização do Depósito Furnas.

(c) **Estudos petrográficos:** incluiu a análise de 20 lâminas delgadas. Dentre essas, doze lâminas referentes às amostras representativas dos xistos aluminosos do Depósito Furnas foram confeccionadas no período entre o Relatório Inicial e o Relatório de Progresso e descritas e registradas no Laboratório de Petrografia Sedimentar do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP), utilizando-se o microscópio de marca Leica, modelo DM750P, com câmera digital Leica, modelo MC 170HD e software de analisador de imagens *Leica Application Suite* (LAS). Oito novas lâminas, também foram analisadas e registradas com os mesmos materiais e incluídas no presente trabalho.

(d) **Separação de zircão e monazita dos xistos aluminosos:** visando acrescentar informações sobre a proveniência e idade máxima de sedimentação do protólito dos xistos aluminosos, assim como uma possível idade de metamorfismo e hidrotermalismo, esse estudo incluiu a separação e concentração de zircão e monazita, respectivamente. As amostras provenientes dos testemunhos de sondagem foram preparadas no Centro e Pesquisas Geocronológicas (CPGEO), do IGc-USP, no período de 8 de junho a 27 de julho de 2016.

As etapas de preparação incluíram britagem, moagem, peneiramento, separação dos minerais magnéticos com ímã de mão, separação magnética com uso de Frantz, variando-se a inclinação e a intensidade do campo eletromagnético, e uso de líquidos densos. Contudo, após as etapas de separação não foi possível a obtenção de concentrados minerais passíveis de datação pelo método U-Pb em zircão ou monazita.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foram consultados trabalhos prévios sobre o Depósito Carajás e o Depósito Furnas, possibilitando a construção de um arcabouço sólido e confiável para a elaboração do presente trabalho.

4.1. Contexto Geológico Regional

O Cráton Amazônico situa-se na porção norte da América do Sul e constitui uma das principais unidades tectônicas da Plataforma Sul-Americana, compreendendo o escudo das Guianas e o Brasil Central, que são separados por uma grande faixa sedimentar representada pelas bacias do Amazonas e Solimões (Vasquez *et al.*, 2008).

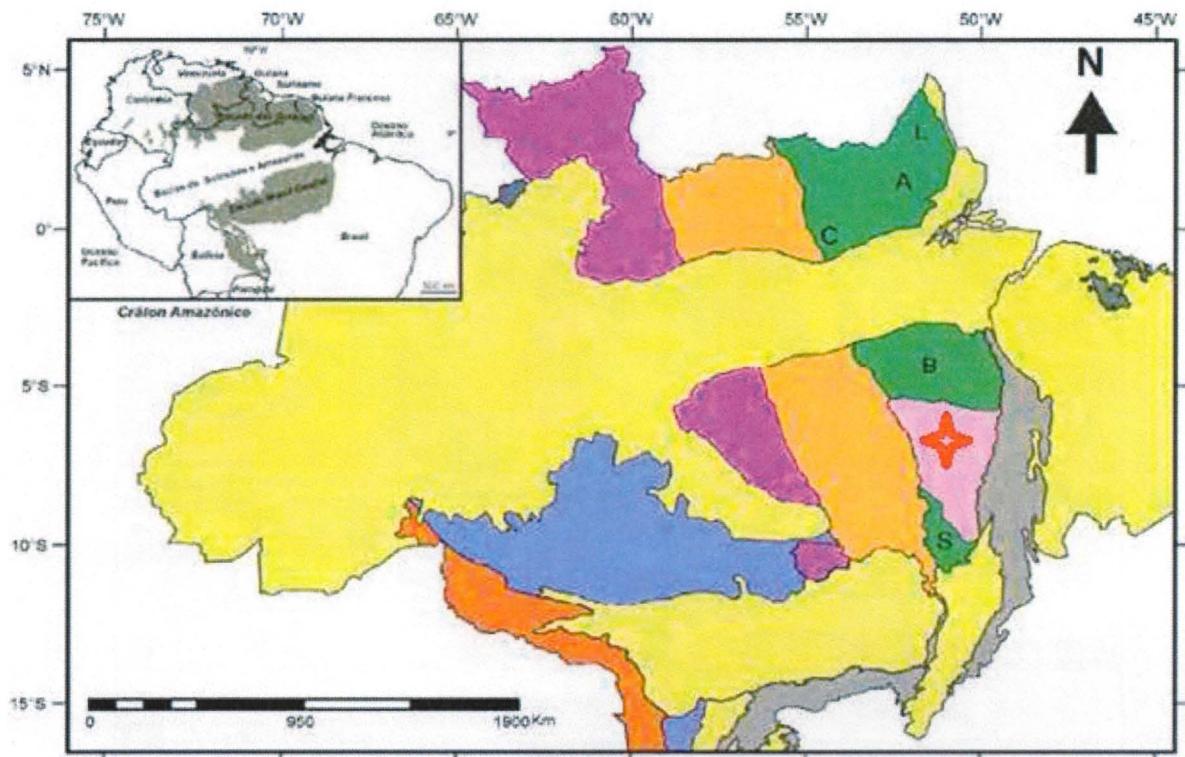
Santos (2003; Vasquez *et al.*, 2008) propuseram a compartimentação tectônica mais recente do Cráton Amazônico em sete grandes províncias: Sunsás, Rio Negro, Rondônia-Juruena, Amazônia Central, Tapajós-Parima, Transamazonas e Carajás (Fig. 1).

Localizada ao sudeste do Cráton Amazônico, a Província Carajás representa o núcleo crustal mais antigo deste cráton, formado e estabilizado durante o arqueano (Teixeira *et al.*, 1989; Tassinari, 1996; Tassinari & Macambira, 1999; 2004), e constitui uma das províncias minerais mais importantes do mundo. A Província Mineral Carajás é limitada a leste pelos rios Araguaia-Tocantins, a oeste pelo Rio Xingu, a norte pela Serra do Bacajá e, a sul, pela Serra dos Gradaús (DOCEGEO, 1988), abrangendo área menor que a da província tectônica homônima.

4.2. Província Mineral Carajás

A Província Carajás é subdividida em dois domínios tectônicos: Carajás, ao norte, e Rio Maria, ao sul (Santos, 2003; Vasquez *et al.*, 2008). As diferentes associações litológicas e potencial metalogenético sugerem evolução geológica distinta para os dois domínios (Monteiro *et al.*, 2014). Os depósitos cupro-auríferos da província foram reconhecidos apenas no Domínio Carajás, cuja área corresponde aproximadamente à da Província Mineral de Carajás.

O Domínio Carajás (Fig. 2) inclui embasamento mesoarqueano e unidades supracrustais, cortadas por intrusões máfico-ultramáficas e por granitos arqueanos e paleoproterozoicos (Dall'Agnol *et. al.*, 2006; Feio, 2011).



Cratón Amazônico

- Sunsás (1450 - 1000 Ma)
- Rio Negro (1820 - 1520 Ma)
- Rondônia - Juruena (1850 - 1540 Ma)
- Amazônia Central (1900 - 1860 Ma)
- Tapajós - Parima (2030 - 1880 Ma)
- Transamazonas (2260 - 1990 Ma)
- Carajás (3000 - 2500 Ma)

Bacias e coberturas fanerozóicas

Outras Províncias Tectônicas

- Tocantins (Cinturões Araquaia e Paraquaia)
- Parnaíba (Fragmento Cratônico São Luís e Cinturão Gurupi)
- L: Lourenço, A: Amapá, C: Careuru
B: Bacajá, S: Santana do Araguaia

Figura 1. Subdivisão do Cratón Amazônico em províncias tectônicas-geocronológicas (adaptado de Vasquez et al., 2008a a partir de Almeida et al. 1977 e Santos, 2003). Província Carajás destacada com uma estrela em vermelho.

O embasamento é constituído pelo Complexo Pium, formado por ortogranulitos charnokíticos, enderbíticos e máficos (Pidgeon et. al., 2000) e pelo Complexo Xingu composto por gnaisses bandados de composição tonalítica a granítica, trondhjemito e migmatitos (Machado et al., 1991). Estudos recentes vêm possibilitando a individualização de distintas unidades mesoarqueanas (por exemplo, suítes TTG, sanukitoides, leucogranitos etc.) nas áreas antes atribuídas a tais complexos, apontando para a necessidade de abandono dessas designações (Feio, 2011).

As unidades supracrustais do Domínio Carajás correspondem às sequências metavulcanossedimentares do Grupo Rio Novo (Hirata et. al., 1982) e do Supergrupo Itacaiúnas (Wirth et. al., 1986; DOCEGEO, 1988) e às rochas metassedimentares da Formação Águas Claras (Nogueira et. al., 1995).

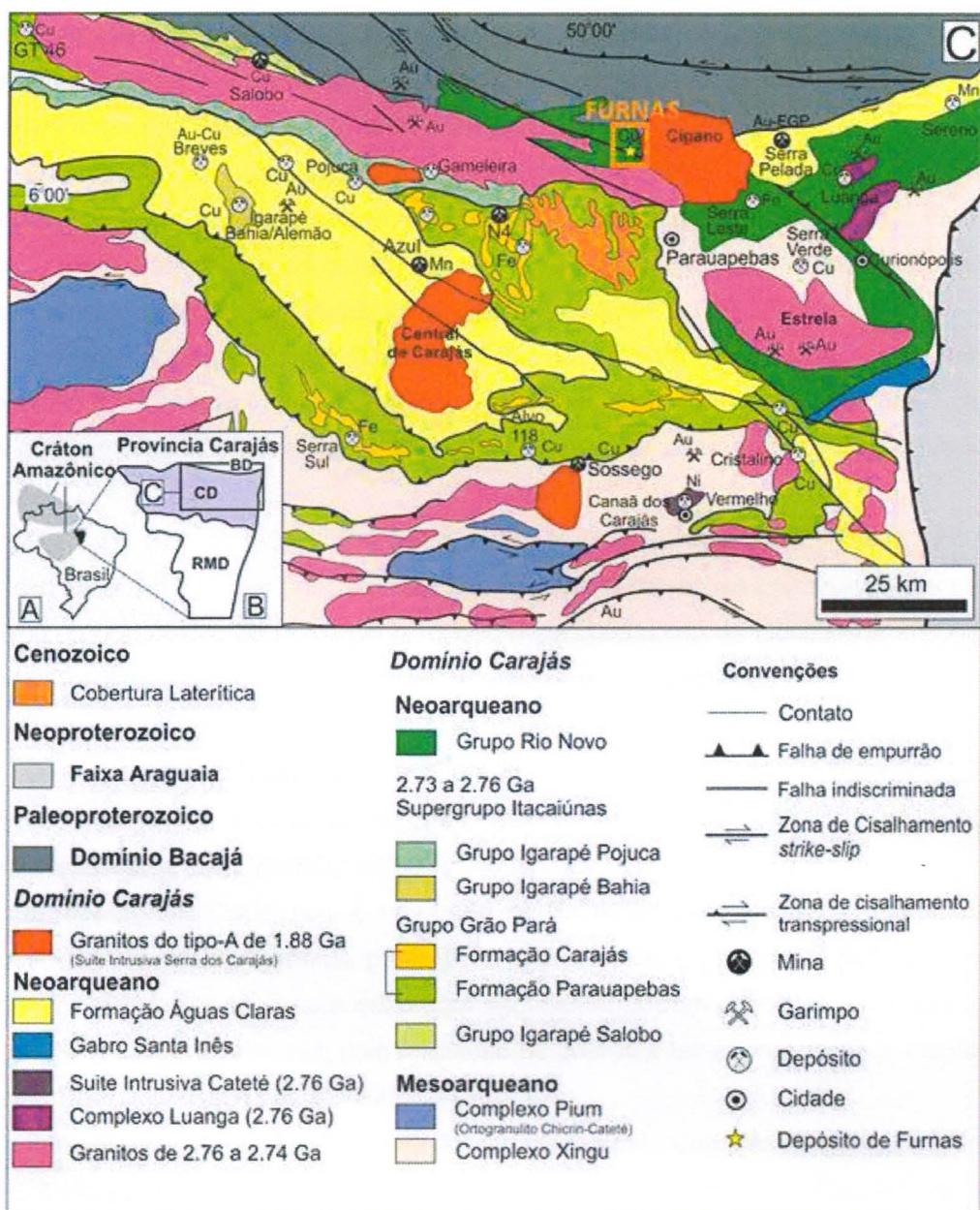


Figura 2. (A) Localização da Província Carajás no Cráton Amazônico; (B) Divisão da Província Carajás nos domínios Rio Maria (DRM) e Carajás (DC), limitado a norte pelo Domínio Bacajá (DB); (C) Mapa geológico do Domínio Carajás da Província Carajás e áreas adjacentes (modificado de Vasquez *et al.* 2008) com a localização do depósito Furnas (destacado em cor laranja).

O Grupo Rio Novo, neoarqueano, localiza-se na porção leste do Domínio Carajás (Vasquez *et al.*, 2008) e é composto por rochas metamáficas, metaultramáficas, quartzitos, formações ferríferas e filitos sericíticos (Hirata *et al.*, 1982). O Grupo Rio Novo foi metamorfizado em fácies xisto verde, com associações minerais de temperatura mais elevada próximo ao Granito Estrela, refletindo metamorfismo de contato.

O Supergrupo Itacaiúnas, neoarqueano, é representado por sequências metavulcanossedimentares que se distinguem das sequências *greenstone belts* conhecidas

do Domínio Rio Maria (DOCEGEO, 1988), quanto à idade, associação litológica e grau metamórfico. É composto pelos grupos Igarapé Salobo (Wirth *et. al.*, 1986), Igarapé Pojuca, Grão-Pará e Igarapé Bahia (DOCEGEO, 1988).

O Grupo Igarapé Salobo (Wirth *et. al.*, 1986; DOCEGEO, 1988) é constituído pelas unidades Gnaisse Cascata (anfibolitos e rochas metapelíticas subordinadas), Formação Três Alfa (metagrauvacas e anfibolitos intensamente hidrotermalizadas do depósito Salobo) e Formação Cinzento com quartzitos e metagrauvacas (DOCEGEO, 1988).

O Grupo Igarapé Pojuca (2.732 ± 3 Ma U-Pb zircão, Machado *et. al.*, 1991) é composto por rochas metavulcânicas máficas e intermediárias, com rochas metassedimentares clásticas e químicas intercaladas, tais como metapelitos e formações ferríferas (DOCEGEO, 1988).

O Grupo Grão Pará (2.759 ± 2 Ma, U-Pb zircão, Machado *et. al.*, 1991; 2.760 ± 11 Ma, U-Pb zircão) é formado por uma espessa sequência de rochas metavulcânicas máficas e félsicas subordinadas intercaladas a rochas metassedimentares clásticas e a corpos de formação ferrífera (DOCEGEO, 1988), responsáveis por hospedar os depósitos de ferro de Carajás.

O Grupo Igarapé Bahia (2.747 ± 1 Ma Pb-Pb zircão; Galarza & Macambira, 2002) é constituído por rochas metassedimentares, metavulcânicas máficas, metapiroclásticas e formações ferríferas (DOCEGEO, 1988).

O Supergrupo Itacaiúnas é recoberto parcialmente pela Formação Águas Claras (Nogueira *et. al.*, 1995), formada por siltitos, arenitos, conglomerados, pelitos, mármore dolomítico e filito carbonoso com estruturas sedimentares bem preservadas. Estas rochas ocorrem deformadas localmente, com formação de dobras e falhas, nas regiões proximais à Falha de Carajás (Vasquez *et. al.*, 2008).

Intrusões máfico-ultramáficas são representadas pelo Complexo Luanga de idade ca. 2.763 ± 6 Ma (U-Pb zircão; Machado *et. al.*, 1991) e pela Suíte Intrusiva Cateté (Macambira & Vale, 1997).

O magmatismo granítico neoarqueano (ca. 2,76 a 2,74 Ga) é restrito ao Domínio Carajás e representado pelas suítes Plaquê, 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). As rochas dessas suítes são representadas por monzogranitos, tonalitos, granodioritos, sienogranitos, feldspato-álcali granitos e granitos. São rochas pouco deformadas, mas podem apresentar estruturas miloníticas a ultramiloníticas e porções gnaissificadas. Em sua maior parte, essas rochas apresentam assinatura alcalina, metaluminosa a peraluminosa, apresentando características de granito "tipo A". Entretanto, as rochas das suítes Plaquê e Igarapé Gelado possuem assinatura cálcio-alcalina a alcalina (Vasquez *et. al.*, 2008). Adicionalmente, granitogênese de ca. 2,57

Ga, representada pelos granitos *Old Salobo* e *Itacaiúnas* (Machado *et al.*, 1991; Souza *et al.*, 1996), é observada apenas na porção norte do Domínio Carajás, nas proximidades da Falha Transcorrente do Cinzento (Lindenmayer *et al.*, 1994a).

O efeito dessa extensiva granitogênese neoarqueana nas sequências supracrustais foi pouco documentado na literatura sobre a Província Carajás. Contudo, rochas com quartzo e sillimanita foram consideradas evidências de metamorfismo termal de rochas do Grupo Rio Novo resultante da colocação do Granito Estrela (Araújo & Maia, 1991; Oliveira *et al.*, 1994). Adicionalmente, Barros *et al.* (2000) interpretaram a presença de porfiroblastos sin-tectônicos de granada em xistos maficos do Grupo Rio Novo como também formados na auréola de contato do Granito Estrela, sin-tectônico e neoarqueano (ca. 2.74 Ga; Barros *et al.*, 2004), como resultado de efeitos termais e mecânicos resultantes da colocação deste plúton granítico.

O magmatismo paleoproterozoico (ca. 1,88 Ga) é representado por granitos alcalinos a subalcalinos do tipo A, introduzidos tanto nas sequências metavulcanossedimentares, metassedimentares, quanto nas rochas do embasamento. São rochas de composição essencialmente monzogranítica e sienogranítica (Vasquez *et al.*, 2008), com natureza metaluminosa a peraluminosa (Dall'Agnol *et al.*, 2005). Fazem parte dessa suíte intrusiva intracontinental os granitos Central de Carajás, *Young Salobo*, Cigano, Pojuca, Breves e Rio Branco (Machado *et al.*, 1991; Dall'Agnol *et al.*, 1994; Tallarico, 2003).

A colocação das rochas dessa Suíte Intrusiva também foi responsável pelo metamorfismo de contato registrado em diversas áreas do Domínio Carajás. Metamorfismo de baixa temperatura foi caracterizado por Beisiegel *et al.* (1973), a partir da observação da recristalização de muscovita nas rochas encaixantes da Formação Águas Claras situadas a norte do Granito Central de Carajás. Barros *et al.* (1995) enfatizaram a existência de metamorfismo de contato evidenciado pela associação de cordierita-granada também nas rochas da Formação Águas Claras, posicionadas a oeste desse mesmo granito.

Auréolas de contato marcadas pela presença de cordierita e antofilita, desenvolvidas nos anfibolitos e nas rochas maficas do Grupo Igarapé Pojuca, foram associadas à colocação do Granito Pojuca (Villas, 1999). Essa paragênese mineral (cordierita-antofilita), atípica em rochas maficas, foi considerada como resultante do metamorfismo termal de rochas previamente hidrotermalizadas em sistemas vulcanogênicos, responsáveis por mineralizações de Zn-Cu singenética do tipo VMS (*Volcanogenic Massive Sulphide*) por Villas (1989).

Adicionalmente, a influência do efeito termal do Granito Cigano, paleoproterozoico (ca. 1.883 Ma; U-Pb zircão; Machado *et al.*, 1991), também foi observada nas rochas maficas que constituem o Grupo Rio Novo. Essas rochas registrariam metamorfismo de contato em condições de baixa pressão e elevadas temperaturas com a formação de

paragêneses constituída por biotita + anfibólio + cordierita e espinélio + biotita + cordierita + piroxênio (Gonçalez *et al.*, 1988). Tais paragêneses indicam, segundo os autores, condições metamórficas que alcançaram a fácie granulito *hornfels*.

4.3. Depósito Cupro-aurífero Furnas

O depósito de cobre-ouro Furnas localiza-se na porção norte da Província Carajás, no denominado Cinturão Norte do Cobre, ao longo da Falha Transcorrente do Cinzento de direção preferencial WNW-ESE (Jesus, 2015). Recoberto por uma camada de laterita de, aproximadamente, sessenta metros de espessura (Santos, 2014), é hospedado, principalmente, por unidades metavulcanossedimentares. De acordo com Santos (2014), o depósito possui relação espacial com corpos graníticos: a extremo leste, o depósito é cortado pelo granito Cigano, de idade paleoproterozoica (ca. 1,88 Ga, Machado *et al.*, 1991), e, a oeste do depósito aflora o Granito Furnas, que é interceptado pelas sondagens na área do depósito. O Granito Furnas, de idade incerta, foi associado por Santos (2014) ao stock Geladinho da Suite Igarapé Gelado (ca. 2,74 Ga), que representa o expressivo magmatismo granítico neoarqueano ao longo da Falha Transcorrente Cinzento.

O depósito Furnas apresenta uma zona de *footwall* (lapa), representada por xistos aluminosos (andalusita-muscovita-biotita xisto com estaurolita), que podem ser observados no mapa geológico da figura 3, e uma zona de *hanging wall* (capa), caracterizada por xistos anfibolíticos (clorita-granada-anfibólio-biotita xisto), separadas por uma falha de empurrão com a qual se associa a zona de mais intensa alteração hidrotermal (Jesus, 2016).

Essa porção central do depósito representa a zona do envelope da mineralização, constituída por rochas ricas em grunerita e magnetita, tais como grunerita-granada-biotita xisto e (anfibólio)-granada-grunerita-magnetita xisto, além de quartzo milonito. As três zonas mencionadas podem ser visualizadas na seção geológica-tipo da figura 4. Relíquias do Granito Furnas são reconhecidas entre as rochas intensamente hidrotermalizadas (Jesus, 2016).

Os eventos deformacionais registrados nos litotipos do depósito originaram rochas multideformadas. Zonas de cisalhamento permitiram a circulação de fluidos hidrotermais e sua interação com as rochas hospedeiras, desenvolvendo o sistema hidrotermal responsável pelas mineralizações cupro-auríferas. A intensidade da alteração hidrotermal dificulta o reconhecimento da natureza e dos possíveis protólito e posicionamento das rochas hospedeiras do depósito, pois obliterou suas feições primárias (Jesus, 2016).

Em termos de mineralização do depósito Furnas, o primeiro estágio foi associado à fase de deformação dúctil das rochas do depósito. O minério é composto essencialmente de

calcopirita e bornita, que ocorrem associadas à grunerita e granada nas rochas ricas em magnetita (Iguma, 2015; Jesus, 2016).

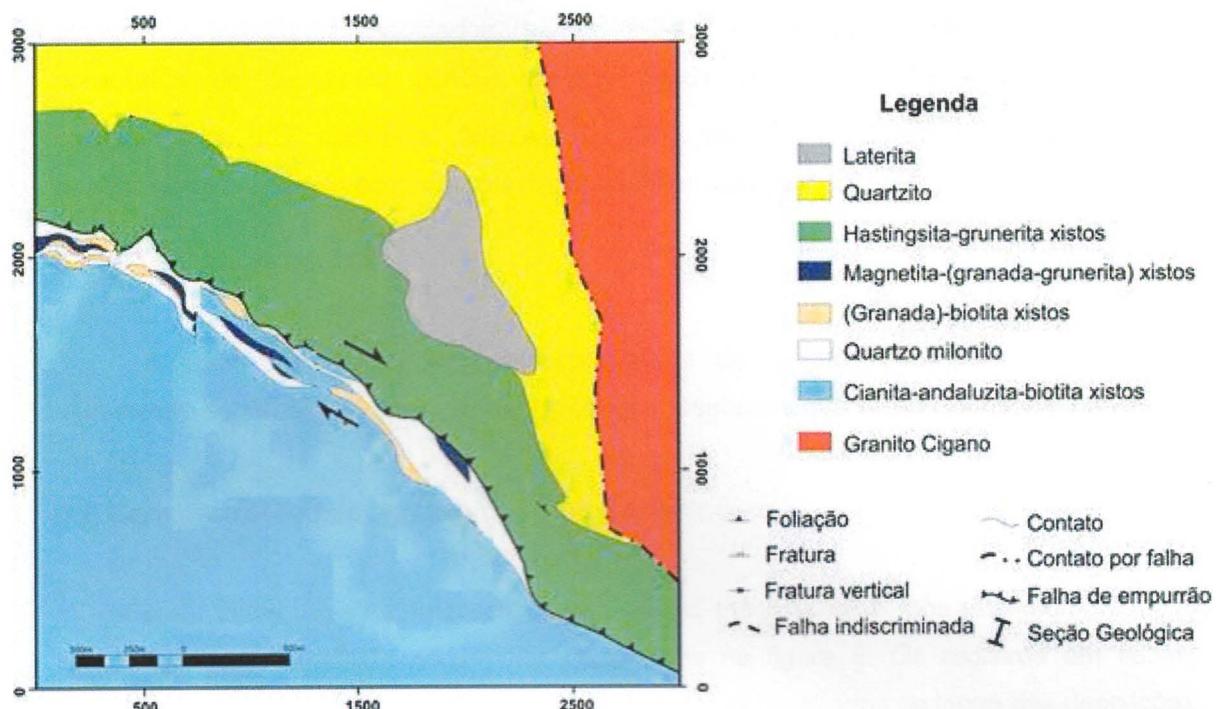


Figura 3. Mapa Geológico e das zonas hidrotermalizadas da porção sudeste do depósito Furnas (modificado de Santos, 2014).

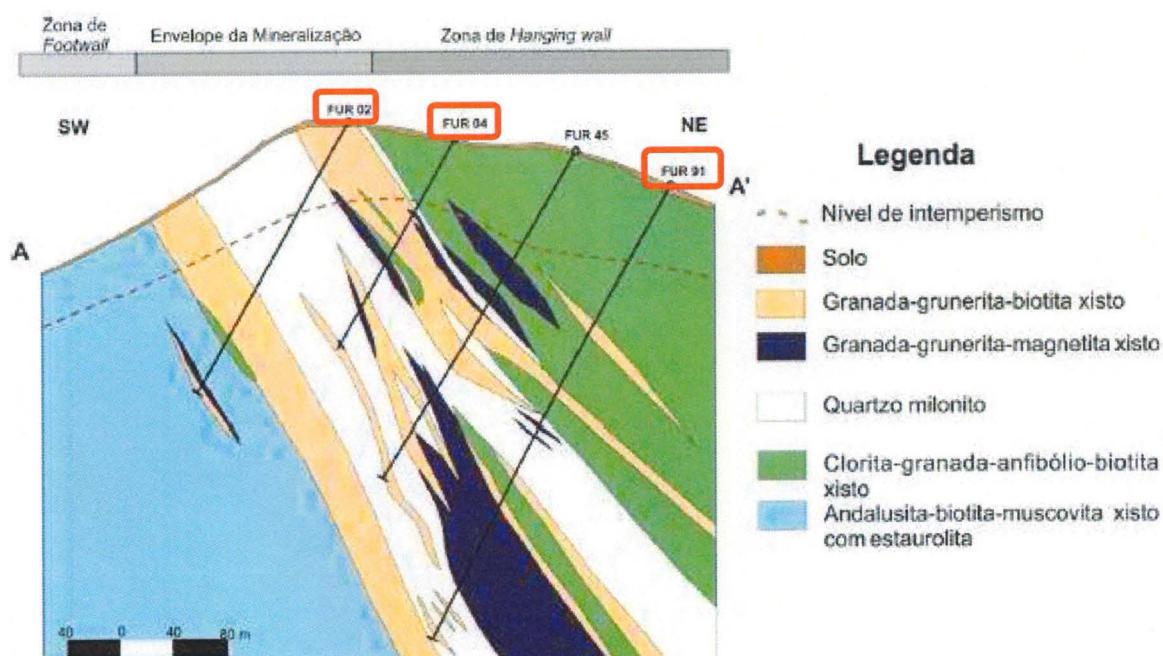


Figura 4. Seção geológica-tipo do Depósito Furnas, mostrando a distribuição das zonas de alteração hidrotermal (Vale, 2010; Jesus, 2015; Iguma, 2015). Foram estudadas algumas das amostras dos furos destacados em vermelho (FUR02, FUR04 e FUR91) e também dos furos FUR21 e FUR39.

O segundo estágio de mineralização se associa a estruturas dúcteis-rúptis, caracterizadas pela formação de veios de calcopirita + quartzo, com clorita, hastingsita, adulária e carbonatos associados (Iguma, 2015). A mineralogia acessória presente é constituída de cassiterita (SnO_2), galena (PbS), hessita (Ag_2Te)/stutzita ($\text{Ag}_{5-x}\text{Te}_3$), carbonatos de ETR com flúor, ferberita (FeWO_4), wittchenita (Cu_3BiS_3) e ouro (Au), que também está associado ao primeiro estágio de mineralização.

5. RESULTADOS OBTIDOS

A partir das descrições macroscópicas e de estudos petrográficos dos xistos aluminosos do depósito Furnas, foram os obtidos resultados que serão discutidos a seguir.

5.1. Caracterização petrográfica dos xistos aluminosos

Foram feitos registros fotográficos, em escala macroscópica, dos testemunhos, e os tipos mais representativos podem ser observados na figura 5. Os registros em escala microscópica das lâminas também foram realizados e serão citados ao longo das descrições de seus respectivos litotipos.

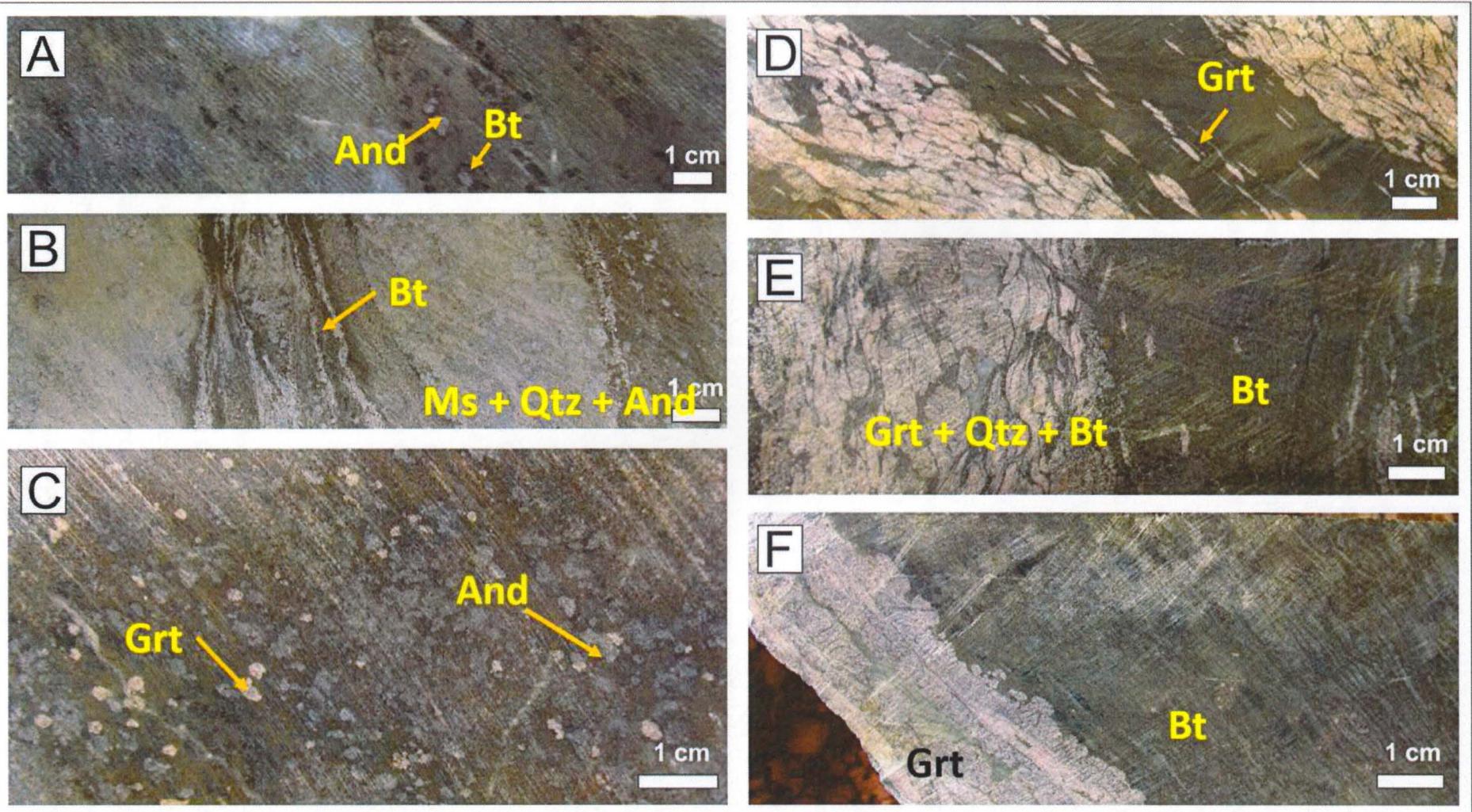


Figura 5. Feições características dos xistos aluminosos do Depósito de Cobre-Ouro Furnas. (a) xisto aluminoso com porfiroblastos de andalusita parcialmente substituídos por biotita, no lado direito da foto, e silicificação intensa na parte central-esquerda da foto, que oblitera os porfiroblastos preexistentes; (b) xisto aluminoso constituído por muscovita, quartzo e andalusita cortado por faixas ricas em biotita, que constitui fronts de substituição da rocha resultantes de alteração potássica; (c) xisto aluminoso rico em biotita, com porfiroblastos de andalusita (cinza claro) e de granada (rósea); (d) xisto aluminoso rico em biotita com cristais coalescentes de granada, rósea, orientada e stirada segundo a foliação milonítica da rocha; (e) xisto aluminoso rico em biotita com front de substituição por granada e quartzo; (f) xisto aluminoso rico em biotita com porfiroblastos de andalusita já fortemente substituídos por biotita, com front de substituição por granada.

Os xistos aluminosos do depósito Furnas foram subdivididos em seis litotipos: Andalusita-muscovita-quartzo xisto, Andalusita-muscovita-(biotita)-quartzo xisto, (Andalusita)-biotita-granada xisto, (Andalusita)-biotita xisto, Clorita-(muscovita) xisto silicificado e Granada-grunerita xisto. É importante frisar que o critério principal utilizado para agrupa-las desta forma foi o mineral com a maior porcentagem em volume presente em cada uma das amostras e a ordem na qual os litotipos serão discutidos reflete um aumento da importância de processos hidrotermais.

5.1.1. *(Andalusita)-muscovita-quartzo xisto*

Este litotipo, por vezes com significativa quantidade de andalusita, é representado pelas amostras FD02/248,60; FD02/250,37; FD02/264,62 e FD02/276,60. A primeira é composta, em porcentagem de volume, por quartzo (31%), sericita (26%), andalusita (15%), muscovita (10%), Biotita (5%), Opacos (5%), Clorita (5%), escapolita (3%), fibrolita (<1%), estaurolita (<1%) e monazita (<1%). A amostra FD02/250,37, por sua vez, contém sericita (35%), quartzo (24%) muscovita (16%), clorita (12%), adulária (6%), opacos (4%), epidoto (2%), turmalina (1%), titanita (<1%) e zircão (<1%). No caso da amostra FD02/264,62 há quartzo (36%), sericita (15%), opacos (Cpy) (10%), Biotita (9%), andalusita (7%), adularia (5%), muscovita (4%), escapolita (4%), clorita (4%), albita (2%), epidoto (2%), stilpnometano (2%), turmalina (<1%) apatita (<1%) monazita (<1%) e carbonato (<1%). Por fim, a amostra de testemunho FD02/276,60 possui quartzo (54%), biotita (28%), andalusita (7%), muscovita (6%), opacos (5%), fibrolita (<1%) e zircão (<1%).

Compreende rochas de cor cinza, localmente com tons marrons devido à concentração de biotita, e também partes de cor branca, consequência da presença de bandas de quartzo. Possuem granulação muito fina a média com grãos de tamanho variando entre 0,01 e 0,4mm.

A foliação metamórfica (Sn) é bem desenvolvida e, na maioria das amostras, encontra-se muito crenulada (Fig. 6a). Nos domínios nos quais a foliação Sn foi preservada, a textura observada é granolepidoblástica, mas são comuns também relíquias de textura porfiroblástica, dada pela presença de andalusita em cristais de até 1,5 cm. A foliação Sn foi transposta por foliação milonítica (Sm) definida pela orientação de bandas de quartzo associadas à biotita, muscovita ou clorita e por intenso estiramento mineral. Em porções mais localizadas, representadas pela amostra FD02/259,38, a estrutura milonítica é definida pela orientação de biotita, quartzo e minerais opacos estirados.

A andalusita está alterada e fraturada com suas fraturas perpendiculares à foliação milonítica (Sm) (Fig. 6b). Na amostra FD02/276,60 foi possível observar porfiroblastos de andalusita deformados, com extinção ondulante, bandas de deformação bem definidas e formação de novos grãos. Nesse caso, porfiroblastos de andalusita originam mosaico de grãos menores de andalusita com contatos retilíneos, em resposta à recristalização. Outra feição notada resultando

do estiramento dos porfiroblastos de andalusita foram *boudin necks*, na amostra FD02/248,60, com preenchimento de biotita.

O intenso processo de deformação dos porfiroblastos de andalusita indica forte milonitização em algumas amostras, como observado FD02/250,37.

É possível reconhecer, em vários cristais de andalusita, sua substituição por escapolita inicial, seguida por biotita (Fig. 6c). Nestes casos, a escapolita, incolor, apresenta cor de interferência de primeira a segunda ordem, indicativa de composição intermediária da série marialita-meionita. Os porfiroblastos de andalusita foram também substituídos gradativamente por biotita a partir de suas bordas até que, em alguns casos, são observados apenas pseudomorfos de andalusita.

A muscovita e a biotita (I) fina, geralmente, representam os principais minerais que formam a matriz dessas rochas e também definem a orientação preferencial da foliação Sn. A muscovita contorna porfiroblastos de andalusita, mas, em alguns casos também pode ser encontrada truncando a foliação da rocha, em cristais dispersos com distribuição aleatória.

Por sua vez, a foliação milonítica (Sm) associa-se à intensa silicificação, resultando em *fronts* de substituição da rocha por quartzo, e formação de clorita que se orienta segundo a Sm.

A escapolita, hidrotermal é substituída por muscovita e sericita. Na amostra FD02/250,37, houve intensa cloritização da biotita e também a substituição de andalusita por clorita, concomitante à milonitização.

Nas amostras FD02/250,37 e FD02/264,62, turmalina representa uma fase mineral importante, sendo que na primeira, apresentava coloração incomum amarelada. Em geral, a turmalina é zonada e apresenta-se fortemente fraturada e envolvida por sulfetos nas zonas mineralizadas.

Cloritoide foi reconhecido apenas raramente. O epidoto encontrado nas amostras FD02/250,37; FD02/264,62 substituiu quase completamente o cloritoide, constituindo pseudomorfos (Fig. 6d).

Vênulas de adulária foram comumente observadas na amostra FD250,37. Tais vênulas apresentam algum controle estrutural, uma vez que algumas dessas orientam-se paralelamente à foliação milonítica. Nesta mesma amostra a monazita ocorre em vênulas de adularia com titanita e clorita associadas.

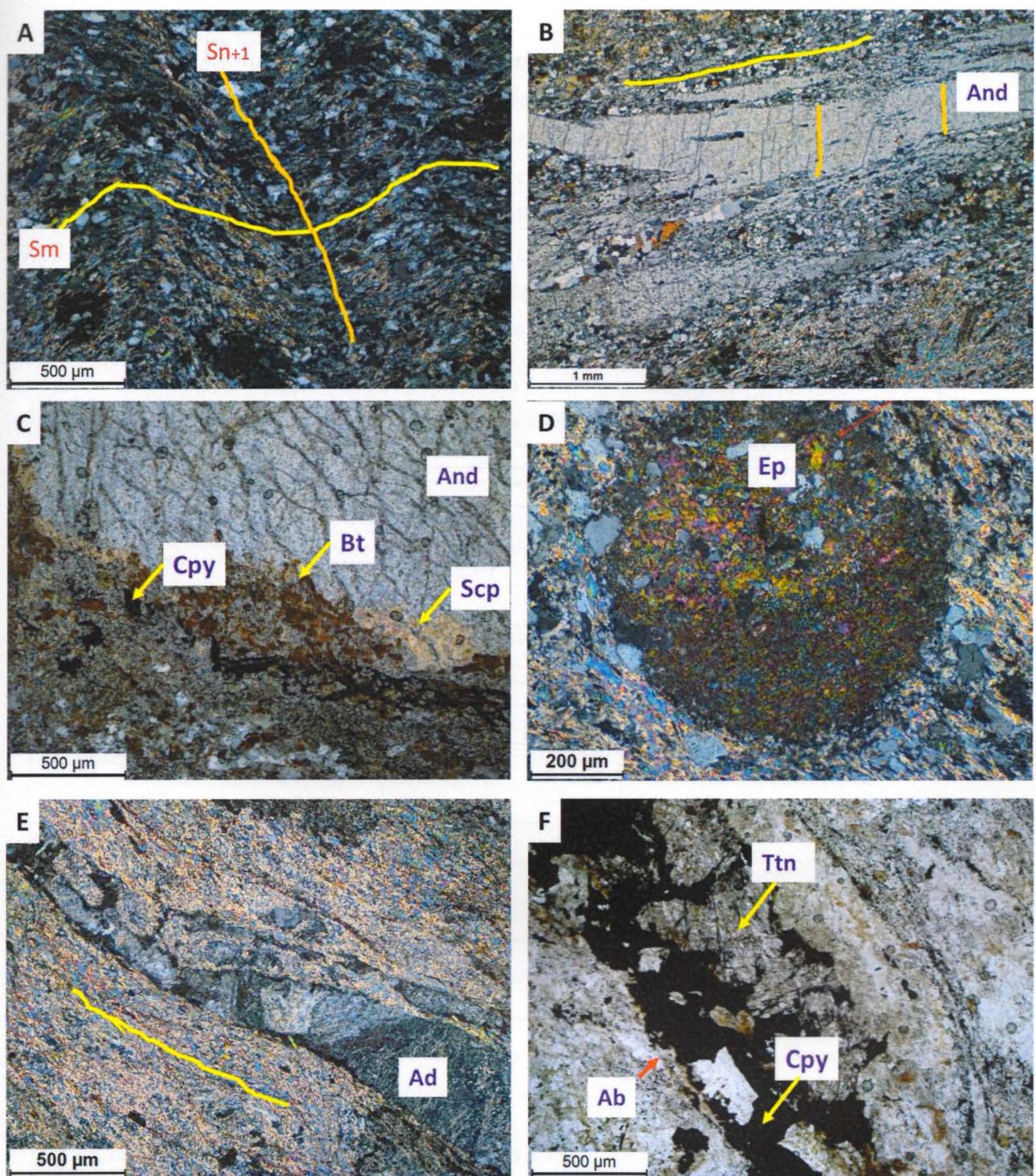


Figura 6. Fotomicrografias do andalusita-muscovita-quartzo xisto. (a) (amostra FD02/248,60): quartzo recristalizado formando finos ribbons intercalados com camadas de muscovita. Tal foliação encontra-se fortemente crenulada (LT; PC); (b) (amostra FD02/248,60): Andalusita extremamente estirada com fraturas perpendiculares à direção de crenulação da amostra indicada pela linha amarela (LT; PC), (c) (amostra FD02/264,62); (d) (amostra FD02/250,37): pseudomorfo de clorítóide que foi completamente substituído por epidoto (LT; PC). (e) (amostra FD02/250,37): vênula de adulária hidrotermal sericitizada e estirada ao longo da foliação milonítica (Sm) (indicada pela linha amarela) (LT; PC). (f) (amostra FD02/264,62): vênula de calcopirita com albita nas bordas e titanita fortemente fraturada e associada a vênula (LT; PD). Abreviações: Ad = adularia, And = andalusita, Bt = biotita, Cpy = calcopirita, Ep = epidoto, Scp = escapolita, Ttn = titanita. LT = luz transmitida; PD = polarizadores desruzados; PC = polarizadores cruzados.

A sericitização da adulária também é comumente observada (FD02/264,62) e as vênulas de adularia possuem certo controle estrutural (Fig. 6e) assim como a presença de titanita hidrotermal associada (Fig 6f) com grãos bem fraturados, amarronzados e com relevo muito alto positivo.

A biotita (II), posterior à andalusita, ocorre comumente em cristais grossos com distribuição aleatória na rocha, não controlada pela foliação milonítica.

Unicamente na amostra FD02/264,62 foi possível observar estilpnómelano, ao longo da foliação milonítica e, mais comumente, em vênulas e veios tardios, associado à clorita.

As relações entre blastese e microestruturas desse litotipo estão sintetizadas no Quadro 1.

Quadro 1. Relações entre blastese mineral e microestruturas no (andalusita)-muscovita-quartzo xisto.

Mineral	Sn		Sm	
Quartzo	—		—	—
Muscovita	—	—	—	—
Biotita(I)	—			
Andalusita	—			
Biotita(II)			—	—
Clorita			—	—
Escapolita		—	—	—
Sulfetos	—		—	—
Monazita			----	
Sericita			—	—
Albita			—	—
Adulária			—	—
Fibrolita	—			
Stilpnómelano			—	—
Turmalina			—	—
Epidoto				—
Clorítóide			—	—

5.1.2. Andalusita-muscovita-(biotita)-quartzo xisto

As amostras de testemunho desse litotipo possuem como principal mineral em sua composição o quartzo. São elas FD02/259,38, FD02/271,02, FD39/189,90 e FD02/235,95. A primeira delas é composta minerais em porcentagem de volume igual a: quartzo (40%), sericita (24%), opacos (Cpy) (19%), muscovita (5%), albita (4%), adulária (3%), clorita (2%), biotita (2%), escapolita (1%), zircão (<1%), monazita (<1 %) e turmalina (<1%). A FD39/189,00, por sua vez, apresenta quartzo (40%), muscovita (30%), biotita (23%), andalusita (4%) e opacos (3%). Por fim,

a amostra FD02/235,95 é composta por quartzo (31%), muscovita (28%), biotita (17%), granada (15%), andalusita (5%), clorita (2%), opacos (2%) e monazita (<1%).

A foliação metamórfica (Sn) é bem desenvolvida e encontra-se fortemente crenulada (Fig. 7a). Matriz normalmente composta por quartzo + biotita + muscovita com grãos de granulação muito fina a fina (0,01-0,1mm) e porfiroblastos de andalusita de até 1,5cm e de granada de até 0,8cm.

Nos domínios nos quais a foliação Sn foi preservada, a textura observada é granolepidoblástica com orientação definida por quartzo recristalizado em ribbons associados a biotita e muscovita. São comuns também relíquias de textura porfiroblástica, dada pela presença de andalusita em cristais de até 1,5 cm. A amostra FD02/235,95 apresenta também porfiroblastos de granada deformados, fraturados e com biotita em seus interstícios e, predominantemente, na faixa definida por duas vênulas de biotita mais grossa.

A foliação Sn foi transposta por foliação milonítica (Sm), definida pela orientação de bandas de quartzo associadas à biotita, muscovita ou clorita e por intenso estiramento mineral. Em porções mais localizadas, representadas pela amostra FD02/259,38, a estrutura milonítica é definida pela orientação de biotita, quartzo e minerais opacos estirados.

O porfiroblasto de andalusita está alterado e fraturado com suas fraturas perpendiculares à foliação milonítica (Sm). Foi observado um cristal de andalusita crenulado ou com feições semelhantes à *kink bands* na amostra FD02/271,02 (Fig. 7b), indicando intensa deformação da rocha. Na amostra FD02/271,02, foi possível observar porfiroblastos de andalusita deformados, com extinção ondulante, bandas de deformação bem definidas e formação de novos grãos (Fig. 7c). Nesse caso, porfiroblastos de andalusita originam mosaico de grãos menores de andalusita com contatos retilíneos, em resposta à recristalização. Possuem inclusão de muscovita.

É possível reconhecer, em vários cristais de andalusita, a sua substituição por escapolita inicial, seguida por biotita. Nestes casos, a escapolita incolor apresenta cor de interferência de primeira a segunda ordem, indicativa de composição intermediária da série marialita-meionita. Os porfiroblastos de andalusita foram também substituídos gradativamente por biotita a partir de suas bordas até que, em alguns casos, são observados apenas pseudomorfos de andalusita.

A escapolita, hidrotermal, por sua vez, é substituída por muscovita e sericita. A escapolita está intercrescida ao quartzo/calcopirita-pirrotita e o substitui em muscovita-sericita.

Na amostra FD02/259,38, a turmalina representa uma fase mineral importante, com coloração incomum amarelada. Em geral, a turmalina é zonada e apresenta-se fortemente fraturada e envolvida por sulfetos nas zonas mineralizadas.

Os sulfetos nesse litotipo são representados por calcopirita e pirrotita. É possível observar sua forte associação com vênulas de feldspato potássico, fortemente sericitizado. Nessas vênulas, a albite envolve os sulfetos e é mais comum nas partes centrais de veios e vênulas (Fig. 7d).

Contudo, comumente, tais vênulas truncam a foliação milonítica, o que pode indicar que são sin- a tardí-Sm. Sericitização da adulária também é comumente observada (FD02/259,38).

A biotita, posterior à andalusita, ocorre comumente em cristais grossos com distribuição aleatória na rocha, não controlada pela foliação milonítica.

A albita reage com a borda dos sulfetos nas vênulas.

O quartzo está recristalizado e pode ocorrer recristalizado na forma de *ribbon* associados à clorita e à muscovita. Seus contatos são, predominantemente, irregulares, apresentam grãos xenoblásticos, alguns com extinção ondulante. Na amostra FD39/189,90 alguns *ribbons* descontínuos de quartzo mais grossos (~0,1mm) cortam os quartzos mais finos (~0,04mm) na mesma direção. Possui inclusões de muscovita.

A monazita encontra-se associada à biotita. As relações entre blastese e microestruturas desse litotipo estão sintetizadas no Quadro 2.

Quadro 2. Relações entre blastese e microestruturas do andalusita-muscovita-(biotita)-quartzo xisto.

Mineral	Sn	Sm	
Quartzo	—	—	
Muscovita	—	—	
Sericita		—	
Clorita		—	
Adulária			—
Albita			—
Biotita	---		—
Granada	—		
Opacos(Cpy)		—	
Andalusita	—		
Fibrolita	—		
Escapolita	—		
Monazita		—	
Turmalina			—

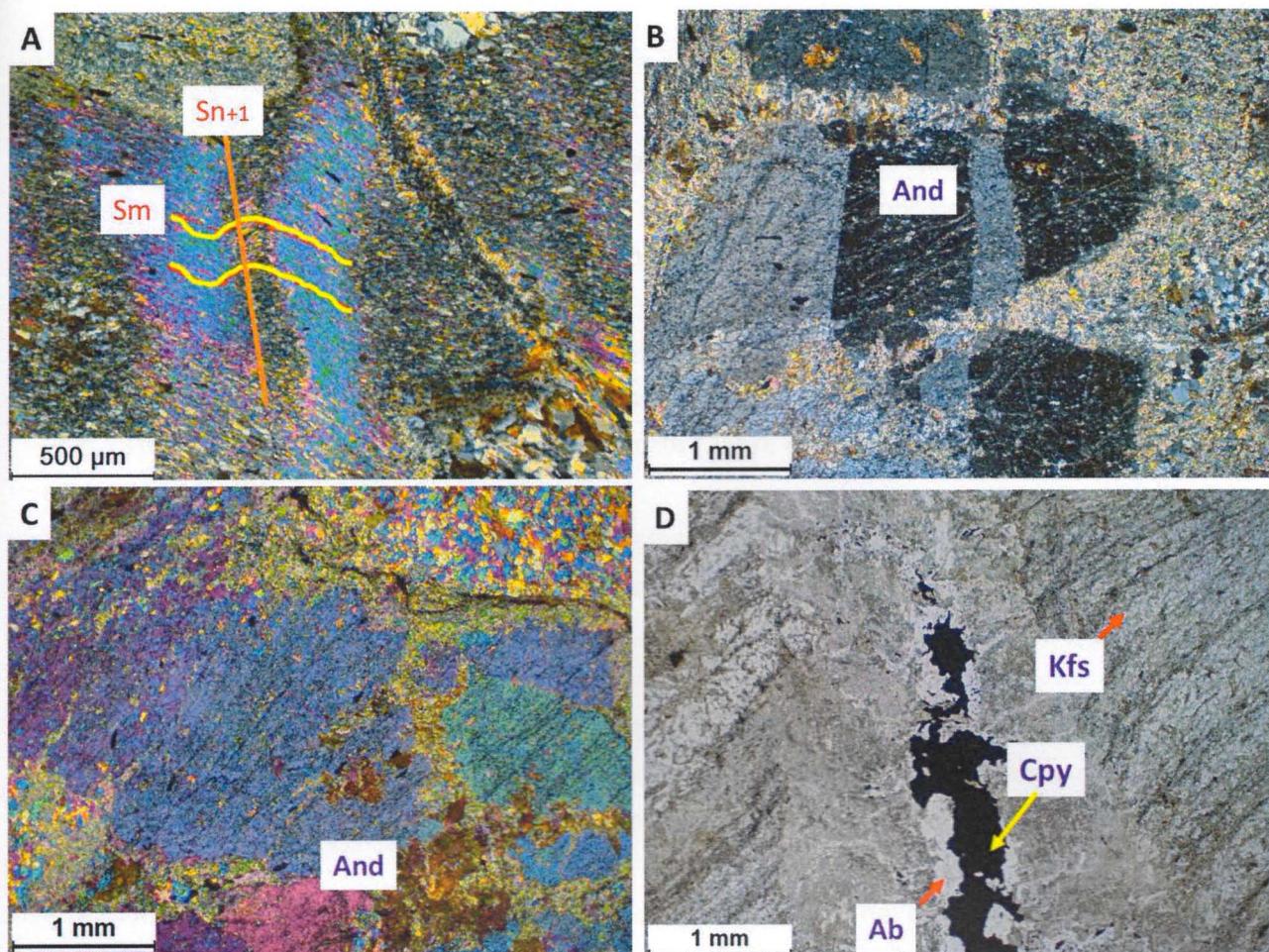


Figura 7. Fotomicrografias do Andalusita-muscovita-(biotita)-quartzo xisto. (a) (amostra FD39/189,90): Foliação definida pela orientação de muscovita com Sm fortemente crenulada (indicado pelos traços amarelos) (LT;PC); (b) (amostra FD02/271,02): porfiroblasto de andalusita crenulado (LT; PC); (c) (amostra FD02/271,02): porfiroblasto deformado de andalusita com formação de novos grãos (LT; PC e com placa de gipso); (d) (amostra FD02/259,38): sulfeto (calcopirita) com albita em suas bordas e, contornando-a, feldspato potássico sericitizado (LT; PD). Abreviações: Ab = albita, And = andalusita, Cpy = calcopirita, Kfs = feldspato potássico, Scp = escapolita LT = luz transmitida. PD = polarizadores descruzados; PC = polarizadores cruzados.

5.1.3. (*Andalusita*)-biotita-granada-xisto

Esse litotipo é representado por amostras com consideráveis quantidades de granada e biotita, sendo elas a FD02/277,82, FD91/438,83 e FD02/210,75. As porcentagens em volume dos minerais que as compõe são, respectivamente: para amostra FD02/277,82, granada (42%), biotita (30%), quartzo (13%), clorita (10%), opacos (5%), monazita (<1%), zircão (<1%); para a FD91/438,83, granada (31%), andalusita (26%), biotita (22%), muscovita (6%), opacos (5%), quartzo (3%), adulária (3%), clorita (2%), fibrolita (2%), turmalina (<1%) e, por fim, para o FD02/210,75, quartzo (40%), granada (30%), biotita (25%), opacos (3%) clorita (2%) e turmalina (<1%).

São rochas acinzentadas com porfiroblastos de granada de cor rosa-pálido. Apresentam foliação milonítica (Sm) e textura lepidoblástica definida pela orientação de biotita \pm clorita \pm opacos com porfiroblastos de granada que se concentram em bandas submilimétricas a milimétricas paralelas à foliação da rocha.

A amostra FD02/210,75 possui duas porções bem distintas, uma de textura granoblástica com porfiroblastos extremamente estirados de granada de até 1mm que definem a orientação da foliação; e outra parte granolepidoblástica com biotita definindo a orientação juntamente com quartzo associado.

A amostra FD91/438,83 possui, além de porfiroblastos de granada, porfiroblastos de andalusita que estão extremamente alterados, estirados e fraturados, com suas fraturas preenchidas por sillimanita fibrosa (fibrolita) (Fig. 8a). Em muitos porfiroblastos de andalusita há inúmeras inclusões de granada, biotita, opacos, clorita, turmalina e muscovita. Os grãos são xenoblásticos com tamanhos >1mm; a sua foliação interna é levemente anostomosada e definida pelos opacos que estão estirados e orientados segundo às faixas de granada (Fig. 8b). Também é possível notar formação de novos grãos na andalusita.

A granada está presente na forma de aglomerados de grãos coalescentes, normalmente, euédricos. Esses aglomerados estão muito estirados. Nos interstícios das granadas coalescentes pode haver quartzo e biotita. A foliação Sm contorna a maior parte dos grãos e aglomerados de granada, indicando que são anteriores à formação da foliação Sm. Na amostra FD02/277,82 foi possível observar alguns grãos de granada com formato sigmoidal e com seu padrão de fraturas discordante da orientação da foliação principal Sn da rocha.

A biotita corta grãos de granada coalescentes ou mesmo as contornam. Ela está localmente cloritzada (Fig. 8c). Na amostra FD91/438,83, a biotita ocorre nos interstícios entre as bandas de granada, porém também se formam em grãos mais grossos que não seguem a orientação das faixas de granada e cortam a andalusita (Fig. 8d). Esta foliação que corta a rocha toda, também corta a biotita. Na amostra FD02,210,75, na porção composta predominantemente

por biotita elas são, em média, quatro vezes mais grossas do que quando estão associadas ao quartzo na amostra.

O quartzo pode estar associado à biotita, orientado segundo a foliação da rocha, ocorrendo em aglomerados ou mesmo dispersos na amostra. Apresenta grãos xenoblásticos com contatos inequigranulares interlobados (Fig. 8e). Pode apresentar inclusões de micas e extinção ondulante. Na amostra FD91/438,83, o quartzo corta todos os outros minerais presentes na rocha.

A grunerita foi encontrada em uma vênula na amostra FD02/277,82 e a adulária foi reconhecida em uma vênula na amostra FD91/438,83.

A muscovita, na amostra FD91/438,83, encontra-se dispersa e sem orientação preferencial, inclusa em biotita e na andalusita. Essa mesma amostra apresenta grãos de turmalina, com hábito prismático e orientados segundo a foliação da rocha (Fig. 9f).

A monazita encontra-se associada à biotita e forma halos pleocróicos.

Em geral, os opacos estão dispersos na lâmina e sem orientação preferencial, porém na amostra FD02/210,75 eles estão estirados e orientados paralelamente às faixas de granada.

As relações entre blastese e microestruturas desse litotipo estão sintetizadas no Quadro 4.

Quadro 3. Relações entre blastese e microestruturas (Andalusita)-biotita-granada-xisto.

Mineral	Sn	Sm
Biotita		—
Granada	-----	-----
Quartzo		----
Clorita		---
Andalusita	-----	
Muscovita		---
Monazita		—
Zircão		---
Adularia		---
Fibrolita	—	
Turmalina		----
Estaurolita	---	
Opacos		—

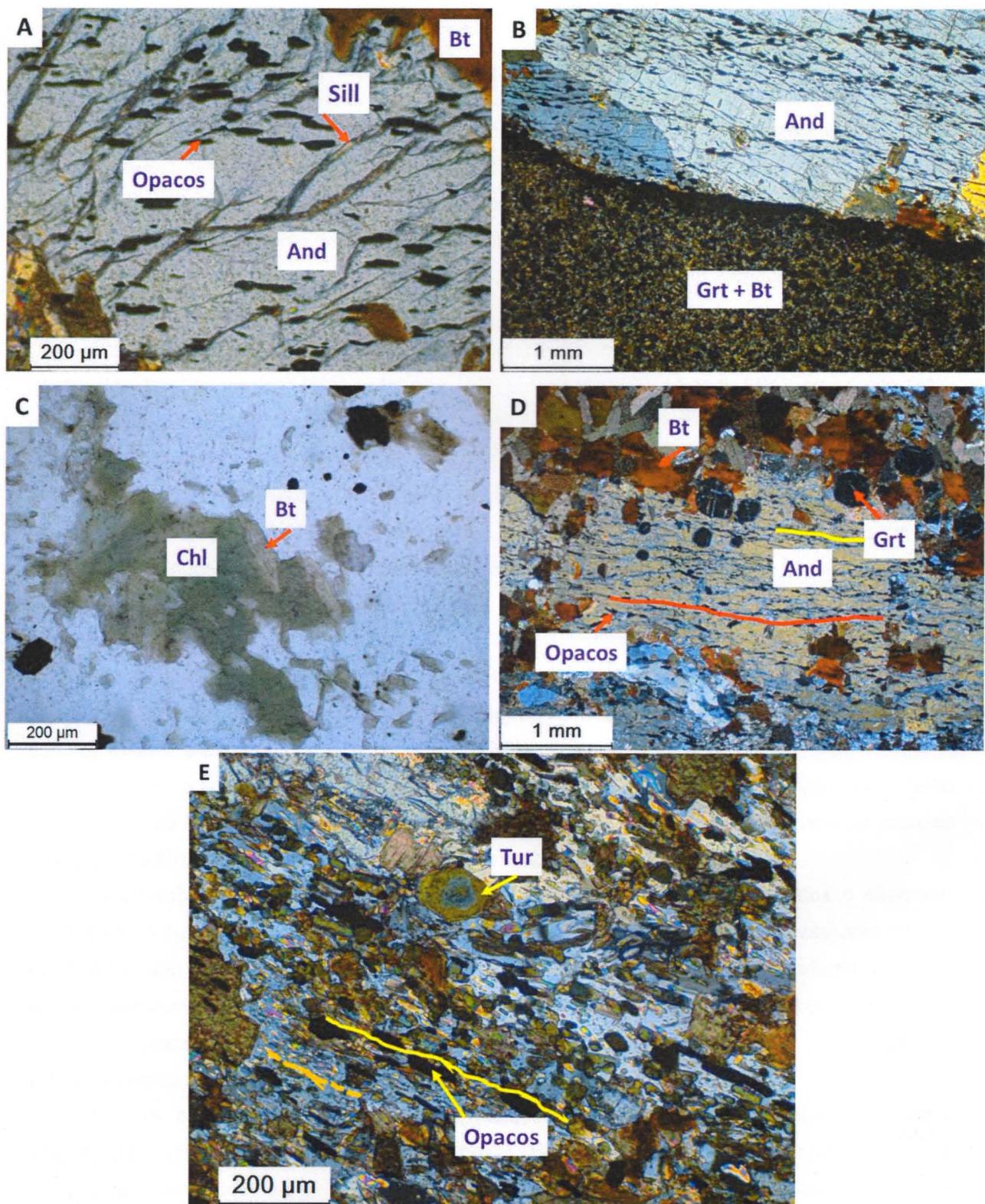


Figura 8. Fotomicrografias do (Andalusita)-biotita-granada-xisto. (a) (amostra FD91/438,83) andalusita com fraturas preenchidas por fibrolita e com opacos estirado e orientados (LT;PC); (b) (amostra FD91/438,83): fraturas internas da andalusita e a foliação definida pela orientação de opacos estirados estão orientados paralelamente a direção das faixas compostas, predominantemente, por granadas coalescentes (LT;PC); (c) (amostra FD02/277,82): biotita localmente cloritizada (LT; PD); (d) (amostra FD91/438,83): porfiroblasto de andalusita com granada e biotita grossa cortando-a. A foliação é definida pela orientação dos opacos estirados e está levemente crenulada (em vermelho) e, praticamente, paralela as fraturas internas da andalusita (em amarelo) (LT; PC); (e) (amostra FD91/438,83): turmalina zonada com hábito prismático orientada segundo a foliação da rocha (em laranja), marcada pela orientação de opacos estirados (traços em amarelo) (LT; PD). Abreviações: And = andalusita, Bt = biotita, Chl = clorita, Grt = granada, Qtz = quartzo, Sill = sillimanita, Tur = turmalina. LT = luz transmitida; PD = polarizadores descruzados; PC = polarizadores cruzados.

5.1.4 Biotita xisto

As amostras dos testemunhos estudados têm a andalusita pouco preservada e muita biotita incluída na Sm. São elas: FD02/268,40, FD02/277,61, FD21/201,50 e FD21/251,35. A principal característica que permite agrupar as rochas dessa unidade é a presença de biotita como principal mineral que as compõe. Esse grupo litológico, inclui, além de biotita xistos, andalusita-biotita xisto, andalusita-granada-biotita xisto e clorita-biotita xisto, que constituem variações com base na composição modal de cada amostra.

A amostra FD02/268,40 (andalusita-biotita xisto) é constituída em porcentagem de volume por biotita (39%), quartzo (35%), andalusita (11%), opacos (5%), adularia (4%), muscovita (3%), clorita (2%), epidoto (1%), monazita (<1%), ibrolita (<1%), zircão (<1%). A amostra FD02/277,61 (clorita-biotita xisto) possui biotita (38%), clorita (32%), quartzo (25%), adulária (5%) e monazita (<1%). A amostra FD21/201,50 (biotita xisto) é constituída por biotita (77%), opacos (5%), adulária (5%), clorita (5%), sericita (4%), muscovita (4%), monazita (<1%) e turmalina (<1%) e a amostra FD21/251,35 (andalusita-granada-biotita xisto) é composta por biotita (48%), granada (18%), andalusita (13%), quartzo (7%), muscovita (5%), opacos (5%), clorita (2%), sericita (2%) e zircão (<1%).

Este grupo é composto por rocha de cor cinza, com granulação muito fina a média com grãos com tamanho variando entre 0,01 e 0,4mm. Apresentam agregados de minerais mais escuros (biotita) e bandas de quartzo.

A foliação predominante da rocha é milonítica (Sm) e a textura granolepidoblástica é definida pela orientação de clorita ± muscovita ± biotita. Na amostra FD21/251,35 as faixas de granada associadas à biotita e ao quartzo são orientadas segundo à Sm.

Os porfiroblastos de andalusita, quando presentes, se apresentam estirados e alterados, intensamente substituídos por biotita. As fraturas internas da andalusita, por vezes preenchidas por fibrolita, são tanto paralelas à foliação milonítica da rocha, quanto perpendiculares a ela. Foi também possível observar porfiroblastos de andalusita deformados com formação de novos grãos. Em alguns casos, nota-se polimorfos de andalusita, resultantes de sua completa substituição por biotita. Apresentam inclusão de biotita, quartzo, muscovita e opacos.

A biotita substitui os porfiroblastos de andalusita e também ocorre orientada segundo a foliação da rocha (Sn), anterior ao cisalhamento. Em algumas partes da lâmina foi possível observar a biotita orientada em duas diferentes direções (Fig. 9a). Ela também ocorre em grãos muito grossos cortando a andalusita perpendicularmente à sua direção de estiramento (Fig. 9b). A biotita é localmente cloritizada. No caso da amostra FD21/251,35 a biotita, associada à clorita constitui a matriz na porção da rocha rica em granada e esta, por sua vez, é, comumente, euédrica e constitui grandes aglomerados muito estirados, podendo atingir até 1mm (Fig. 9c)

O epidoto substituiu quase completamente cloritoide (pseudomorfo). O relevo e birrefringência são típicos de epidoto, porém o hábito é oval ou arredondado e não é característico do mineral.

O quartzo ocorre em bandas e também em vênulas. Há vênulas milimétricas de adulária, sintectônicas, que cortam a foliação milonítica da rocha (Fig. 9d). A monazita e o zircão formam halos pleocróicos e estão amplamente dispersos na biotita.

Na amostra FD21/251,35 a clorita apresenta grãos idiomálicos com habitus micáceo. A muscovita não apresenta orientação principal. A sericita encontra-se nas bordas dos grãos de andalusita. Nesta mesma amostra, os opacos estão estirados e encontram-se orientados nas bandas de granada. Os opacos, juntamente com granada e biotita, definem a foliação principal da rocha. Todavia, nas outras amostras a biotita está dispersa na lâmina e, normalmente, não apresenta orientação preferencial.

Na amostra FD21/201,50 a turmalina representa a fase hidrotermal da rocha e encontra-se em grãos subidiomálicos, zonados, de coloração verde azulada.

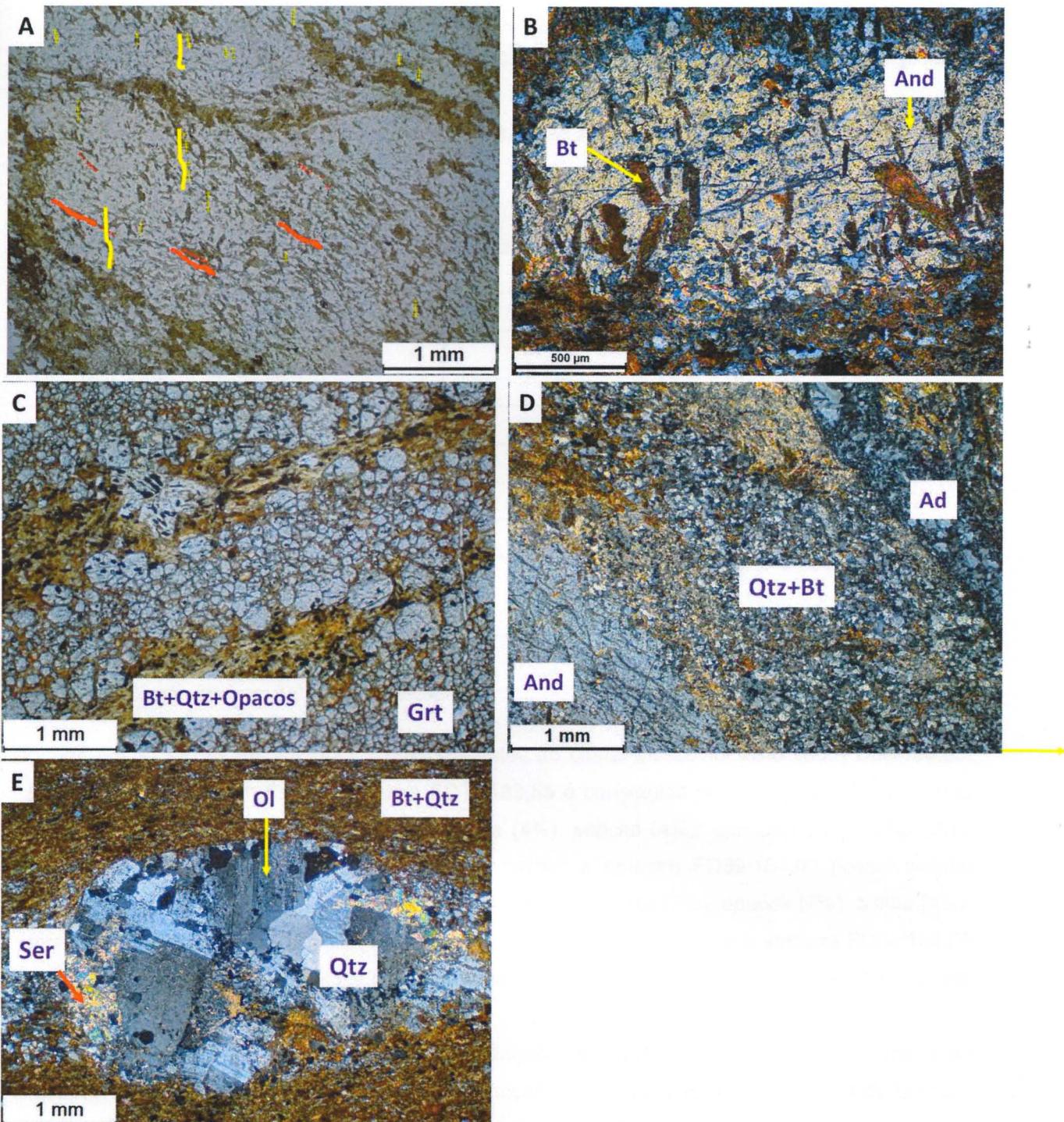


Figura 9. Fotomicrografias do Biotita xisto. (a) (amostra FD02/268,40): biotita com duas diferentes direções (LT; PD); (b) (amostra FD02/268,40): porfiroblastos de biotita cortam quase perpendicularmente porfiroblasto de andalusita que está estirando na mesma direção da foliação Sm (LT; PC); (c) (amostra FD21/251,35) a biotita, associada à clorita forma uma espécie de cimento na porção da rocha rica em granada (LT; PD) (d) (amostra FD02/268,40): vénula de adularia com considerável controle estrutural, segue direção de estiramento dos porfiroblastos de andalusita (LT; PC); (e) (amostra FD21/201,50): bolsão de oligoclásio com sericita, quartzo na matriz de biotita (LT; PC). Abreviações: And = andalusita, Bt = biotita, Grt = granada, OI = oligoclásio, Qtz = quartzo, Ser = sericita. LT = luz transmitida; PD = polarizadores descruzados; PC = polarizadores cruzados.

Foi possível observar na amostra FD21/201,50 bolsões de quartzo associado a oligoclásio e sericita contornado por biotia (Fig. 9e).

As relações entre blastese e microestruturas nesse litotipo são sumarizadas no Quadro 4.

Quadro 4. Relações entre blastese mineral e microestruturas no Biotita Xisto.

Mineral/Estágio	Sn		Sm
Biotita	—		—
Quartzo	—	—	—
Clorita			—
Monazita			—
Opaco			—
Andalusita	—		
Epidoto			—
Muscovita	—		
Adulária			—
Fibrolita	—		

5.1.5. Clorita-(muscovita) xisto silicificado

As amostras dos testemunhos correspondentes ao clorita-muscovita xisto são: FD39/183,85, FD39/184,00 e FD04/158,68. A amostra FD39/183,85 é constituída por muscovita (31%), clorita (27%), quartzo (24%), adulária (5%), andalusita (4%), sericita (4%), opacos (3%), biotita (2%), estaurolita (<1%), fibrolita (<1%) e leucoxênio (<1%); a amostra FD39/184,00 possui sericita (24%), clorita (20%), muscovita (17%), calcedônia (13%), quartzo (7%), opacos (7%), biotita (4%), albita (3%), adulária (2%), apatita (1%), titanita (1%) e leucoxênio (1%) e a amostra FD04/158,68 quartzo (65%), clorita (25%), albita (4%), adularia (3%), opacos (3%) e zircão (<1%). Tais rochas foram fortemente silicificadas.

As rochas possuem cor cinza, apresentando tons castanho devido à concentração de minerais mais escuros e também partes esbranquiçadas devido a presença de bandas de quartzo. A granulação da rocha varia de muito fina a média com grãos de tamanho variando de 0,01 a 0,5mm.

A foliação da rocha é milonítica marcada pela orientação de bandas de quartzo e constituídas por clorita \pm sericita \pm muscovita (Fig. 10a), apresentando também relíquias de textura granoblástica nas porções constituída por quartzo anterior ao cisalhamento ou lepidoblástica nas porções mais ricas em clorita e relíquias de biotita.

A andalusita é fortemente estirada ao longo da foliação milonítica. Suas fraturas internas não seguem a foliação Sn e algumas delas estão preenchidas por sillimanita fibrosa (fibrolita). É

possível notar o quase desaparecimento dos porfiroblastos de andalusita (Fig. 10b), que foram praticamente todos substituídos por escapolita, muscovita, sericita e, em sua clivagem, por clorita.

A estaurolita, rara, apresenta-se muito deformada e com extinção ondulante.

O quartzo ocorre associado à clorita \pm muscovita \pm sericita. Seus contatos são, normalmente, interlobados e possuem inclusões de opacos \pm muscovita. A rocha, em algumas porções, apresenta indícios de forte silicificação, com a formação de calcedônia (Fig. 10c) e vênulas de quartzo. A biotita foi fortemente cloritizada.

Na amostra FD39/184,00, a muscovita confere textura decussada à rocha e possui grãos grossos (Fig. 10d). Esta amostra apresenta também uma porção muito silicificada, com quartzo já sendo substituído por calcedônia. Quartzo dessas zonas, por vezes associado com albíta e biotita, é também cortado por veios de quartzo. Bolsões de plagioclásio hidrotermal (albíta) também são reconhecidos.

Os opacos ocorrem das mais variadas maneiras: orientados ou não segundo a foliação, estirados ou não, formando vênulas submilimétricas ou mesmo disseminados nas amostras.

Foi observado veio preenchido por muscovita-apatita-escapolita-titanita. Nesse veio, a calcopirita é observada nos planos de clivagem da muscovita (Fig 10e) e é relacionada à uma associação mineral retrógrada constituída por calcopirita-clorita-leucoxênio. É comum observar a titanita fraturada e envolvida pela calcopirita, o que resulta em formação de leucoxênio a partir de sua alteração (Fig.10f).

Na amostra FD04/158,68 a albíta forma bolsões juntamente com os grãos de quartzo. Foi possível observar um zircão fortemente zonado.

As relações entre a blastese dos diferentes minerais presentes nesse litotipo e suas microestruturas podem ser observadas no Quadro 5.

Quadro 5. Relações entre blasteses mineral e microestruturas no clorita-muscovita xisto silicificado.

Mineral/Estágio	Sn	Sm	Pós-cisalhamento
Andalusita	—		
Quartzo	—	—	—
Albita		—	
Biotita	—	—	
Muscovita	—	—	—
Apatita			—
Escapolita			—
Titanita			—
Clorita			—
Opacos (Cpy)		—	—
Leucoxênio			—
Estaurolita	—		
Fibrolita	—		
Adulária		—	
Sericita		—	
Calcedônia			—
Zircão		----	

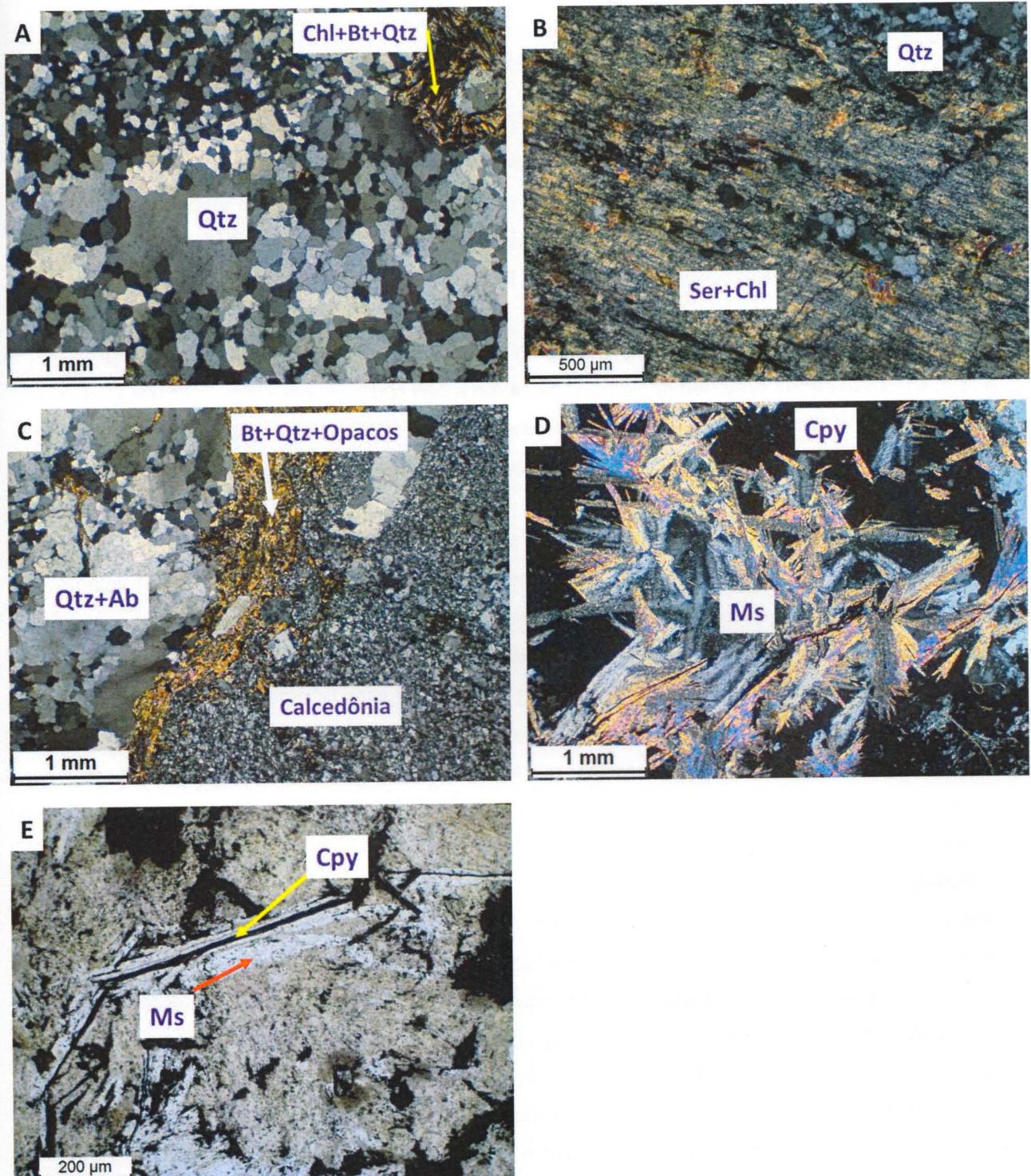


Figura 10. Fotomicrografias dos clorita-(muscovita) xistos. (a) (FD02/184,00): biotita com duas diferentes direções (LT; PC); (b) (amostra FD39/183,85): poliformo de antiga andalusita substituída por sericita e clorita (LT;PC); (c) (amostra FD39/184,00): bolsão de quartzo e plagioclásio com a foliação definida por clorita e muscovita contornando-a com formação de calcedônia (lado direito da foto) (LT;PC); (d) (amostra FD39/184,00): grãos grossos de muscovita sem orientação preferencial (LT; PC); (e) (amostra FD39/184,00): calcopirita nos planos de clivagem da muscovita (indicado pela seta amarela) (LT;PD). Abreviações: Ab = albita, Bt = biotita, Chl = clorita, Cpy = calcopirita, Qtz = quartzo, Ms = muscovita, Ser = sericita. LT = luz transmitida; PD = polarizadores descruzados; PC = polarizadores cruzados.

5.1.6. Granada-grunerita xisto

As amostras dos testemunhos FD02/278,10 e FD02/210,93 são representativas deste grupo e apresentam quantidades consideráveis de grunerita e de granada. A amostra FD02/278,10 possui porcentagem estimada em volume de cada mineral: granada (34%), quartzo (32%), grunerita (25%), opacos (5%), biotita (2%), apatita (1%), clorita (1%) e monazita (<1%); e a amostra FD02/210,93 é composta por grunerita (40%), granada (35%), quartzo (20%), opacos (4%) e biotita (1%).

Esse litotipo é constituído por rocha de cor cinza com porfiroblastos de granada rosa-pálido. A granulação da matriz varia de muito fina a média com grãos de tamanho entre 0,01 a 0,3 mm. A mineralogia é representada por granada, grunerita e acessórios como opacos e biotita. Outros minerais como apatita, clorita e monazita também podem ocorrer como acessório em alguma das lâminas.

A granada, euédrica a subédrica, ocorre em faixas dispostas paralelamente à foliação milonítica (Sm) da rocha. Os cristais finos de granada são coalescentes e a sua transição para cristais maiores formados a partir de vários núcleos iniciais de granada é observada na amostra FD02/278,10 (Fig. 11a). Todavia, na amostra FD02/210,93 os porfiroblastos de granada são formados de um único grão muito fraturado (Fig. 11b) e grãos de granada extremamente pequenos (<0,02 mm) formam vênulas que cortam a lâmina (Fig. 11c).

A amostra FD02/278,10 divide-se em duas partes: uma com foliação definida pela orientação de grunerita e quartzo e outra parte que sofreu silicificação (Fig. 11d). Na primeira porção, a rocha possui feições miloníticas com cristais de grunerita contornando os cristais de granada coalescentes, muito estirados (Fig. 11e). Os opacos formam grãos subdioblásticos a xenoblásticos e estão associados a biotita. A outra parte da rocha encontra-se fortemente silicificada, com intensa formação de quartzo xenoblástico inequigranular e com contatos interlobados entre eles. A clorita forma vênulas submilimétricas que cortam a amostra.

Essa amostra também apresenta cristais de granada muito estirados orientados de acordo com a foliação principal. Nos interstícios, entre os cristais de granada fortemente estirados, há quartzo e biotita. Não foi observada grunerita bem formada nessas porções da rocha. A foliação milonítica é definida pela orientação de quartzo e biotita e a textura é lepidogranoblástica. Ainda nessa parte muito silicificada foram observadas biotita com grãos xenoblásticos e também apatita, submilimétrica, inclusa no quartzo que trunca a rocha. Cristais de monazita ocorrem associados à grunerita.

A amostra FD02/210,93 pode ser dividida em três partes (Fig. 11f): uma delas de textura granonematoblástica com predominância de grãos de quartzo, com contatos interlobados entre eles e a foliação definida pela orientação de grãos aciculares de grunerita, que cortam o quartzo. A outra faixa é composta por grunerita, que define a orientação da foliação, associada a bolsões

de quartzo e, por fim, porções com quartzo, granada e grunerita. Essa última define a orientação da rocha e contorna os porfiroblastos de granada. A biotita apresenta grãos xenoblásticos e pode estar associada às bordas do quartzo ou dispersa na lâmina. A presença de granada-grunerita indica forte alteração hidrotermal com enriquecimento em ferro, predominantemente.

As relações entre a blastese dos diferentes minerais presentes nesse litotipo e suas microestruturas podem ser observadas no Quadro 6.

Quadro 6. Relações entre blastese mineral e microestruturas relacionadas à Sn do Granada-grunerita xisto.

Mineral	Pré-tectônico		Sin-tectônico		Pós-tectônico
			Sn		
Granada		—			
Grunerita			—		
Quartzo	—	—			
Opacos				—	
Clorita				—	
Monazita				—	
Biotita			—		

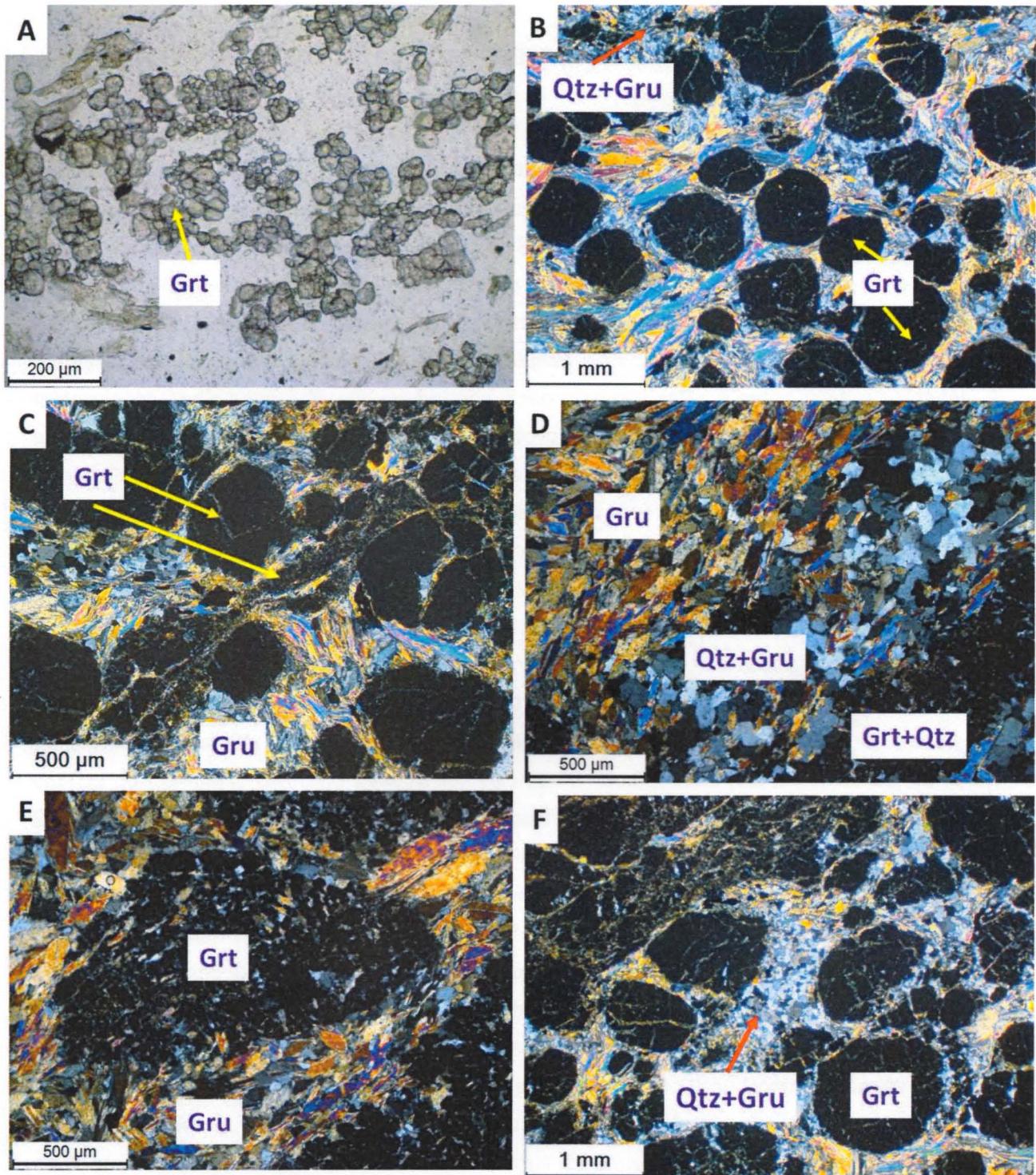


Figura 11. Fotomicrografia dos granada-grunerita xisto. (a) (amostra FD02/278,10): finos de granada coalescentes e a sua transição para cristais maiores formados a partir de vários núcleos iniciais de granada associados ao quartzo (porção incolor da foto) (LT; PD); (b) (amostra FD02/210,93): porfiroblastos de granada com formato amendoado intercrescido com grunerita (LT;PC); (c) (amostra FD02/210,93): finos grãos de granada (<0,02mm) em porção cisalhada da rocha (LT;PC); (d) (amostra FD02/278,10): Uma parte da rocha possui textura granonematoblástica com grunerita definindo sua foliação e a outra a parte é mais silicificada com formação de aglomerados estirados de granada (LT;PC); (e) (amostra FD02/278,10): grãos de grunerita contornando os porfiroblastos de granada com traços vermelhos indicando a foliação (LT; PC); (f) (amostra FD02/210,93): seta vermelha indica aglomerado de quartzo e de grunerita (LT;PC). Abreviações: Qtz = quartzo, Grt = granada, Gru = grunerita. LT = luz transmitida; PD = polarizadores descruzados; PC = polarizadores cruzados.

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Evidências de foliação metamórfica (Sn) foram encontradas somente na parte interior dos porfiroblastos de andalusita. Esta Sn foi transposta por uma foliação milonítica (Sm) associada ao desenvolvimento e/ou reativação da Falha Transcorrente do Cinzento. A foliação Sm apresenta-se fortemente crenulada com o desenvolvimento de Sn+1.

Embora os xistos aluminosos tenham sido atribuídos, em estudos prévios sobre o depósito Furnas (Santos, 2014), à Formação Águas Claras (Nogueira *et al.*, 1995), paleoproterozoica e metassedimentar, ou ao Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988), neoarqueano e metavulcanossedimentar, não são conhecidos litotipos semelhantes a esses nessas unidades. A ausência de dados geocronológicos relativos à proveniência e idades máximas de deposição não permite, no momento, avanços em relação ao posicionamento estratigráfico dessa unidade.

Embora a história metamórfica do depósito tenha sido fortemente obliterada pela intensa atividade hidrotermal, a presença de porfiroblastos sin-Sn, tanto de andalusita como de granada, apontam para condições de pressão relativamente baixa durante o evento de metamorfismo inicial. A presença de fibrolita em fraturas na andalusita, por sua vez, sugere aumento de temperatura na trajetória retrometamórfica.

Estudos anteriores de Barros *et al.* (2000) interpretaram a existência de porfiroblastos sintectônicos de granada em xistos maficos do Grupo Rio Novo como formados na auréola de contato do Complexo Granítico Estrela, sintectônico e neoarqueano (ca. 2,74 Ga; Barros *et al.*, 2004), como resultado de efeitos termais e mecânicos resultantes da colocação deste plúton granítico. De acordo com Barros (1997), as condições de T-P na auréola de contato variaram de 520° a 612°C e de 2,5 a 3,5 kbar, correspondentes às fácies hornblenda e piroxênio hornfels.

No depósito Furnas, poucos testemunhos de sondagem interceptaram o Granito Furnas. Entretanto, Santos (2014) o correlacionou ao granito Igarapé Gelado (ca. 2,74 Ga; Barbosa, 2004), identificado ao longo da Zona de Cisalhamento Cinzento, que seria coevo ao Granito Estrela (Barros, 1997). Ambos os granitos são considerados sintectônicos em relação ao desenvolvimento das zonas de cisalhamento regionais reconhecidas no Domínio Carajás.

Dessa forma, o papel das zonas de cisalhamento e da colocação desses granitos e os seus efeitos termais nas sequências supracrustais da Província Carajás precisam ser melhor compreendidos, uma vez que podem representar parte importante da evolução dos sistemas minerais responsáveis pela formação dos depósitos cupro-auríferos da província, como evidenciado no Depósito Furnas.

Além de possíveis efeitos do metamorfismo termal, as associações minerais presentes em todos os litotipos também refletem a intensidade dos processos de alteração hidrotermal na área do depósito Furnas.

O estágio de silicificação inicial foi concomitante ao desenvolvimento da foliação milonítica e prévio à alteração potássica, como evidenciado pela presença de biotita truncando e sobrepondo zonas ricas em quartzo. Entretanto, a silicificação também sobrescreveu zonas com alteração potássica, refletindo uma recorrência dos estágios hidrotermais.

A alteração potássica se evidencia pela formação expressiva de biotita. A biotita formada inicialmente é bastante fina e associa-se aos planos de foliação milonítica das rochas hidrotermalizadas. Além disso, o *front* de potassificação também resulta em substituição total dos porfiroblastos de andalusita, formando pseudomorfos. Um segundo estágio de potassificação, com formação de biotita mais grossa, pode ser identificado através de veios e vênulas de biotita grossa, comumente associados a veios de quartzo tardios, que ocorrem de forma concordante ou discordante em relação à estrutura predominante da rocha ou mesmo biotita grossa cortando a andalusita.

Posterior a concomitante aos pulsos hidrotermais que possibilitaram a formação de biotita, observa-se a formação da granada, que é seguida por intensa formação de grunerita.

Rochas ricas em granada e quartzo, representada pelo granada-quartzo xisto, apresentam porfiroblastos de granada e também faixas compostas por granada muito finas, comumente associadas a faixas ricas em quartzo. Este mineral constitui porfiroblastos nas rochas denominadas "biotita xisto" e são formados devido à acresção de cristais submilimétricos a milimétricos de granada coalescente. Essa associação, pode também resultar de processos hidrotermais, responsáveis pela remoção de elementos mais móveis em zonas de lixiviação, concomitante à silicificação.

A formação de grunerita nas rochas ricas em granada e biotita e no muscovita-andalusita-biotita-quartzo xisto marca o início do enriquecimento em ferro das rochas. A formação tardia do anfibólio rico em ferro em uma rocha com paragênese típica de um metapelito pode refletir processos metassomáticos (sistema aberto) vinculados ao sistema hidrotermal.

Nos estágios mais tardios do sistema hidrotermal, observou-se forte cloritização das rochas representado pela formação de clorita em vênulas, assim como em *fronts* de substituição mais pervasiva. A formação de vênulas de estilpnometano, carbonatos, adulária-albita-titanita e muscovita-apatita-escapolita-titanita pode ser considerada também tardia em relação ao cisalhamento, embora algumas das vênulas ainda apresentam controle estrutural significativo. Tais vênulas são, por vezes, mineralizadas e apresentam calcopirita associada à pirrotita.

7. CONCLUSÕES

A caracterização das associações minerais metamórficas prévias ao cisalhamento com (estaurolitita)-andalusita-biotita-muscovita-quartzo indicam condições compatíveis com as de fácies anfibolito em baixa pressão a partir de protólitos pelíticos.

Todavia, associações minerais presentes nos litotipos estudados como, por exemplo, o epidoto que substituiu completamente o clorítóide; vênulas de calcopirita com titanita e albita associadas; andalusita substituída por escapolita; leucoxênio resultante da reação de titanita com fluídos hidrotermais; processo forte silificação; calcopirita associada a muscovita grossa ou em seus planos de clivagem; e a formação de adularia, turmalina e grunerita, também refletem a intensidade de processos hidrotermais na área do depósito Furnas.

Através do reconhecimento das relações de blastese mineral e microestruturas foi possível reconstituir a história metamórfica e deformacional da rocha, mesmo que com imprecisões. Distintos estágios de alteração hidrotermal estão também impressos nas rochas.

Para identificar o tipo de metamorfismo associado às paragêneses minerais dos xistos aluminosos mais estudos ainda devem ser feitos.

A Falha Transcorrente do Cinzento, possivelmente, possibilitou a circulação de fluidos hidrotermais em distintos eventos e, a sua interação com as rochas hospedeiras, desenvolveu o sistema hidrotermal responsável pelas mineralizações cupro-auríferas.

O depósito Furnas, apesar de apresentar grande importância econômica devido aos seus recursos, ainda é pouco estudado e inúmeras questões sobre seu posicionamento estratigráfico, sua idade e relação com os granitos espacialmente próximos ainda não possuem resposta.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, V. G., Lafon, J. M., Correia, F. C. Jr, Macambira, B. E. M. (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, UPPA, 96p.
- Barros, C. E. M., Dall'agnol, R., Barbey P. and Boullier A. M (1997). Geochemistry of the Estrela Grantite Complex, Carajás Region, Brazil: an example of an Archaean A-type granitoid. *Journal of South-American Earth Sciences* 10(3-4): 321-330.
- 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., Dall'Agnol, R., Vieira, E. A. P., Magalhães, M. S. (1995). Granito Central de Carajás: Avaliação do potencial metalogenético para estanho com base em estudos da borda oeste do corpo. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi, série Ciências da Terra*, 7: 93-123p.
- Barros, C. E. M., Macambira, M. J. B., Barbey, P., Scheller, T. (2004). Dados Isotópicos Pb-Pb em zircão (Evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás, Brasil: Implicações petrológicas e tectônicas. *Revista Brasileira de Geologia*, 34 (4): 531-538.
- 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.
- Básicos do Brasil (PLGB). Santos, M. H. L. (2014). Interpretação e modelagem (inversão) 3d de dados magnéticos e estudos comparativos de seus resultados com modelagem 3d de medidas de susceptibilidade magnética (testemunhos): um estudo de caso em prospecção geofísica aplicada a Depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro (*iron oxide-copper-gold - IOCG*) na Província mineral de Carajás, Brasil. Tese de doutorado, UnB, 151p.
- Beisiegel, V. R., Bernardelli, A. L, Drummond, N. F., Tremaine, J. W. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 3, n. 4, p. 215-242, 1973.

- Chiaradia, M., Banks, D., Cliff, R., Marschik, R., de Haller, A. (2006). Origin of fluids in iron oxide-copper-gold deposits: constraints from $\delta^{37}\text{Cl}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and Cl/Br. *Mineralium Deposita*. 41(6), 565-573p. DOI: 10.1007/s00126-006-0082-6.
- 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.
- DOCEGEO. (1988). Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. *XXXV Congresso Brasileiro de Geologia. Anexo aos Anais*. 11-54p. Belém: SBG.
- Dreher, A. M., Xavier, R. P., Taylor, B. E., Martini, S. (2008). New geologic, fluid inclusion and stable isotope studies on the controversial Igarapé Bahia Cu–Au deposit, Carajás Province, Brazil. *Mineralium Deposita*. 43(2), 161-184p. DOI: 10.1007/s00126-007-0150-6.
- Ehrig, K. (2015). Olympic Dam – Future Directions, Belo Horizonte. *BHPBilliton. SA Exploration and Mining Conference*. Acessado em 13 de Março de 2016
- Feio, G. R. L. (2011). Magmatismo granitoide arqueano da área de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução crustal da Província. Tese (Doutorado). Pará: Universidade Federal do Pará- UFPA.
- Feio, G. R. L., 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2012.02.020>.
- Galarza, M. A., Macambira, M.J.B., Villas, R. N. (2002). Geocronologia e geoquímica isotópica (Pb, S, C e O) do depósito de Cu-Au do Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás (PA). In: Cong. Bras. Geol., 41, João Pessoa, SBG, p.493.
- Gonzalez, M. G. B., Dall'Agnol, R., Vieira, E. A. P., Macambira, M.J. B, Senta, N. D. (1988). Geologia do Maciço anorogênico Cigano, vale do Rio Parauapebas-PA. In: 35 CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1988, Belém. *Anais...: SBG-Núcleo Norte*. v. 3, p. 1132-1146.
- Groves, D. I., Bierlein, F. P., Meinert, L. D., Hitzman, M. W. (2010). Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposits through Earth History: Implications for Origin, Lithospheric Setting, and Distinction from Other Epigenetic Iron Oxide Deposits. *Economic Geology*. 105, 641-654p.

- Hirata, W. K., Rigon, J. C., Kadekaru, K., Cordeiro, A. A. C., Meireles, E. A. (1982). Geologia Regional da Província Mineral de Carajás. *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 1, 100-110. Belém: SBG/Núcleo Norte.
- Hitzman, W. M., Oreskes, N., Einaudi, M. T. (1992). Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits. *Precambrian Research*. 58, 241-287p.
- 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). *Caracterização da evolução paragenética e da distribuição das zonas de alteração hidrotermal do depósito cupro-aurífero de Furnas*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia). São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências – USP
- Jesus, S. G. P. (2015). *Paragênese e distribuição das zonas de alteração hidrotermal do depósito de cobre-ouro de Furnas, Província Mineral Carajás*. Exame de Qualificação de Mestrado, 49p. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo – USP.
- Jesus, S. G. P. (2016). Múltiplos estágios de alteração hidrotermal do depósito de óxido de ferro-cobre-ouro Furnas, Província Carajás: evolução paragenética e química mineral. Dissertação de Mestrado, 164p. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo – USP.
- Lancaster, O. J., Fanton, J., Almeida A. J., Leveille, R. A., Vieira, S. (2000). Discovery and geology of the Sossego copper–gold deposit, Carajás District, Pará State, Brazil. In: IUGS, Intern Geol Congr, 31, [CD-ROM].
- Macambira, E. M. B., Vale, A. G. (1997), *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB) - São Félix do Xingu: folha SB.22-Y-B*. escala 1:250.000. Texto Explicativo. 344 p. Brasília: CPRM.
- Machado, N., Lindenmayer, D. H., Krough, T. E., Lindenmayer, Z. G. (1991). U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49, 329-354p.
- Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Carvalho, E. R., Hitzman, M. W., Johnson, C. A., Souza Filho, C. R. and Torresi, I. (2008a). Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints. *Mineralium Deposita*. 43(2), 129-159p. DOI:[10.1007/s00126-006-0121-3](https://doi.org/10.1007/s00126-006-0121-3).
- Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Hitzman, M. W., Juliani, C., Souza Filho, C. R., Carvalho E. R. (2008b). Mineral chemistry of ore and hydrothermal alteration at the Sossego iron oxide-copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. *Ore Geology Reviews*. 34(3), 317-336p. DOI:[10.1016/j.oregeorev.2008.01.003](https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2008.01.003).

- Monteiro, L. V. S., Xavier, R. P., Souza Filho, C. R., Moreto, C. N. P. (2014). Metalogênese da Província Carajás. In: Silva, M.G., Rocha Neto, M.B., Jost, H., Kuyumjian, R. M. eds. *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*. Belo Horizonte, CPRM, p. 43–92.
- NCL Brasil, 2005. Revision de La Estimación de Recursos del Proyecto Cristalino. Vale S.A Internal Report, 1-103.
- Nogueira, A. C. R., Truckenbrodt, W., Pinheiro, R. V. L. (1995). Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica. Boletim do Museu Para Emílio Goeldi, série Ciências da Terra. 7, 177-277p.
- 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.
- Pidgeon, R. T., Macambira, M. J. B., Lafon, J.M. (2000). Th–U–Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chemical Geology* 166, 159–171p.
- Rigon, J. C., Munaro, P., Santos, L. A., Nascimento, J. A. S., Barreira, C. F. (2000). Alvo 118 copper–gold deposit – geology and mineralization, Serra dos Carajás, Para, Brazil. In: IUGS, International Geological Congress, 31 [CD-ROM].
- Santos, J. O. S. (2003). Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. In: Buzzi, L.A. (Ed.). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG., 169-226p. Brasília: CPRM.
- Santos, M. H. L. (2014). Interpretação e modelagem (inversão) 3D de dados magnéticos e estudos comparativos de seus resultados com modelagem 3D de medidas de susceptibilidade magnética (testemunhos): um estudo de caso em prospecção geofísica aplicada a depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro (*iron oxide-copper-gold* - IOCG) na Província mineral de Carajás, Brasil. Tese (Doutorado). 151p. Brasília: Universidade de Brasília – UnB.
- Sardinha, A. S., Barros, C. E. 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 Science* 20: 327–339p.
- 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, Anais, 380–383.
- Tallarico, F. H. B. (2003). O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil. Tese de Doutorado, UNICAMP, 229p.
- Tallarico, F. H. B., Figueiredo, B. R., Groves, D. I., Kositcin, N., McNaughton, N. J., Fletcher, I. R., Rego, J. L. (2005). Geology and SHRIMP U–Pb geochronology of the Igarapé Bahia

- deposit, Carajás copper–gold belt, Brazil: an Archean (2.57 Ga) example of iron–oxide Cu–Au–(U– REE) mineralization. *Economic Geology*. 100: 7–28p.
- 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. and Macambira, M. J. B. (2004). A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C. D. R. and Brito Neves, B.B. (Eds.) *Geologia do Continente Sul-Americanano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. pp. 471-485.
- Teixeira, W., Tassinari, C. C. G., Cordani, U. G., Kawashita, K. (1989). A review of the geochronological of the Amazonian 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.
- 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, Vasquez, M.L., Rosa-Costa, L.T. 1:1.000.000. CPRM, Belém.
- Vasquez, M. L. and Rosa-Costa, L. T. (Org.) (2008). *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de informações Geográficas – SIG: Texto explicativo dos mapas geológicos e de recursos minerais do Estado do Pará: Escala 1:1.000.000*. Programa Geologia do Brasil. Belém: CPRM/CIAMA-PA.
- Villas, R. N. (1999). Granito Pojuca, Serra dos Carajás (PA): composição mineralógica, química mineral e controles químicos da alteração hidrotermal. *Revista Brasileira de Geociências*, 29 (3): 393- 404.
- Williams, P. J., Barton, M. B., Johnson, D. A., Fontboté, L., Haller, A., Mark, G., Oliver, N. H., Marschik, R. (2005). Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin. *Economic Geology* 100th Anniv., 100, 371-405p.
- Wirth, K. R., Gibbs, A. K., Olszewski, W. J. Jr. (1986). U-Pb ages of zircons from the Grão Pará Group and Serra dos Carajás granite, Pará, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. 16, 195-200p.
- Xavier, R. P., Monteiro, L. V. S., Moreto, C. P. N., Pestilho, A. L. S., Melo, G. H. C., Silva, M. A. D. da, Aires, B., Ribeiro, C., Freitas e Silva, F. H. (2012). The Iron Oxide Copper-Gold systems of the Carajás Mineral Province. In: Hedenquist J., Harris M., Camus F. (Org.) SEG Special Publication 16, (1a ed.) *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and*

Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe, Littleton: Society of Economic Geologists, Inc. 1, 433-454p.

