



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**FACULDADE DE GEOLOGIA**

---

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PETROGRAFIA DE MINERAIS COM O HÁBITO DE  
ASBESTO NA PORÇÃO OESTE DA ZONA DE  
CISALHAMENTO PATOS, REGIÃO DE VÁRZEA ALEGRE,  
CEARÁ**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado por:**

**FELIPE ANDERSON DOS SANTOS PROFETA**

**Orientador: Prof<sup>a</sup>. D.Sc Rosemary da Silva Nascimento (UFPA)**

---

**BELÉM - PA**  
**2019**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

P962p Profeta, Felipe Anderson dos Santos  
Petrografia de minerais com o hábito de asbesto na porção oeste da Zona de Cisalhamento Patos, região de Várzea Alegre, Ceará / Felipe Anderson dos Santos Profeta. – 2019.  
xvi, 51 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Candido Augusto Veloso Moura.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará.  
Belém, 2019.

1. Asbesto. 2. Hábito Fibroso. 3. Zona de Cisalhamento Patos.  
4. Retrometamorfismo. 5. Pseudomorfismo. I. Título.

CDD 552

---



**Universidade Federal do Pará  
Instituto de Geociências  
Faculdade de Geologia**

**PETROGRAFIA DE MINERAIS COM O HÁBITO DE  
ASBESTO NA PORÇÃO OESTE DA ZONA DE  
CISALHAMENTO PATOS, REGIÃO DE VÁRZEA ALEGRE,  
CEARÁ**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO POR:**

**FELIPE ANDERSON DOS SANTOS PROFETA**

**Como requisito à obtenção do Grau de Bacharel em Geologia**

**Data de Aprovação: 03 / 12 / 2019**

**Banca Examinadora:**

Prof.<sup>a</sup> D.Sc. Rosemery da Silva Nascimento  
Orientadora – UFPA

Prof. D.Sc. Evaldo Raimundo Pinto da Silva  
Relator – UFPA

MSc Luciano Ribeiro da Silva  
Relator – Externo

*Aos meus familiares, em especial à minha mãe, que não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

Não há nenhuma luta que não seja devidamente recompensada. Como dizem os clássicos e sábios ditados “Aquilo que não mata, nos fortalece” e para o fortalecimento é necessário aproveitar cada oportunidade que a vida nos oferece, buscando sempre manter o equilíbrio satisfatório entre o necessário e o essencial.

O meu maior agradecimento é ter concluído esta graduação com o respeito e a admiração dos meus amigos e professores, sentimentos os quais eu sempre prezei nas minhas relações interpessoais, a fim de tornar o mundo na medida do possível um lugar convivível.

Em primeiro lugar agradeço a Universidade Federal do Pará e a Faculdade de Geologia por me acolherem na realização deste trabalho. Essas instituições tornaram possível a viagem de campo necessária para o estudo, assim como a disponibilização dos equipamentos e laboratórios do Instituto de Geociências. Outros incentivos também condizem a parceria e o financiamento da bolsa de estudos ofertados pelo Programa de Educação Tutorial (PET), coordenado pela tutora Prof<sup>a</sup>. D.Sc Rosemary Nascimento.

Aos Laboratório de Laminação, agradeço a chefia Joelma Lobo e ao auxiliar técnico Bruno Fernandes pela paciência e a responsabilidade na confecção das lâminas delgadas e polidas.

Ao Laboratório de Petrografia, coordenado pela Prof<sup>a</sup>. MSc Vânia Barriga, agradeço a disponibilidade integral para a descrição petrográfica das amostras.

Ao Laboratório de Difração de Raios X, coordenado pelos Profs. D.Sc Rômulo e Simone, agradeço pelas amostras analisadas e interpretadas com o auxílio também do banco de dados, exclusivo ao laboratório.

Ao Laboratório de Microanálises Químicas, coordenado pelo Prof. D.Sc Cláudio Nery Lamarão e as auxiliares técnicas Ana Paula e Gisele, pelas análises obtidas em MEV-EDS.

Ao Laboratório do Museu de Geociências, coordenado pelo Prof. D.Sc Marcondes Costa, por ter cedido as análises preliminares em MEV-EDS.

Todos esses esforços estão não seriam possíveis se não houvesse ao meu lado pessoas que apoiam e me amam. Por isso, eu quero agradecer imensamente à minha família por ter me ensinado os princípios éticos e morais que fazem parte do que sou. Aos professores que me proporcionaram o conhecimento e a maturidade científica que gradualmente são desenvolvidos cada vez mais por meio da pesquisa, e com certeza será fortalecida na trajetória profissional até o dia de se aposentar. Aos amigos que fizeram parte da minha trajetória acadêmica, onde construí amizades para o resto da vida.

Especialmente, eu gostaria de agradecer à minha mãe Katia, que sempre me criou e me apoiou em tudo o que estava ao seu alcance e mais um pouco. Às minhas avós Lucidalva e Telma, que são exemplos de matriarcas da família. Às minhas amadas tias, Lucicléia e Lucivalda, que sempre contribuíram em minha vida. Ao meu pai que têm contribuição no meu êxito acadêmico pelos incentivos e conselhos que sempre me ofereceu. Aos meus tios, avôs, irmãos e primos que sempre estiveram presentes comigo.

Em relação aos meus professores, gostaria de agradecer a minha tutora e orientadora, Prof<sup>a</sup>. D.Sc Rosemery, pela orientação como estudante vinculado ao Programa de Educação Tutorial – PET Geologia desde o 4º semestre. Por do programa, realizei uma aproximação com os Profs. MSc Vânia Barriga e Ronaldo Lemos que são os responsáveis pelo meu êxito e afinidade na área de mineralogia e petrologia.

Aos meus amigos, deixando claro que não há uma ordem de prioridade nesse agradecimento, agradeço especialmente a minha querida amiga Thays, que foi minha companheira fiel desde a disciplina desde os primórdios da graduação. Às minhas equipes dos mapeamentos geológicos I e II que também fizeram parte das minhas grandes experiências acadêmicas, contribuindo com ensinamentos de trabalho em equipe que levarei para a vida profissional. Ao grande monitor Alan que sempre me incentivou no decorrer do curso. À minha querida Dani que cedeu amostra para o desenvolvimento de alguns resultados, além de fazer parte do nosso grupo firmado na sala da Prof<sup>a</sup>. MSc Vânia, junto com Sâmia, Nayra, Cristo, Alan e a querida Prof<sup>a</sup>. D.Sc Andreia Cardoso. Ao grupo de formatura pela parceria, esforço e dedicação na promoção da festa que ficará guardada para sempre em minha memória.

Não poderiam faltar nos meus agradecimentos, o meu namorado, que apesar de estarmos juntos a pouco tempo tenho todo o seu apoio. E por fim, obrigado às pessoas que mesmo de longe contribuíram com parte da formação do que sou hoje.

*“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma” (Antoine Lavoisier).*

## RESUMO

No domínio geológico da Zona de Cisalhamento Patos existem várias ocorrências de minerais com o hábito de asbesto, hospedados em rochas de composição metaultramáfica. Na região de Várzea Alegre, Granjeiro e Mangabeira os asbestos presentes nas associações de litotipos do Complexo Granjeiro eram explorados de maneira rudimentar por garimpeiros que visavam o desempenho das propriedades físico-químicas deste hábito cristalino em atividades comerciais, com destaque para a fabricação de telhas de amianto. A crescente tendência em nível global de proibição da comercialização de amianto provocou a desvalorização do material e o conseqüente abandono destes garimpos. Petrograficamente o hábito fibroso ou de asbesto fornece informações importantes dos processos geológicos que atuaram nesta região, caracterizada pelo metamorfismo de alta temperatura que atingiu a migmatização das rochas, pois são regulados no decorrer dos estágios termodinâmicos do metamorfismo em conjunto com a mobilidade dos fluidos hidrotermais que interagem com antofilita, tremolita e fibrolita. As análises petrográficas, de microscopia eletrônica acoplada com espectroscopia por energia dispersiva (MEV-EDS) e de difração de raios X (DRX) das associações mineralógicas presentes em litotipos aflorantes, incluindo rochas cálcio-silicáticas e metapelíticas, definem as condições e os processos ocasionados na estabilização dos minerais inerentes a zona de cisalhamento e à implantação do arranjo de *Duplex* transpressivo de Lavras da Mangabeira. Os litotipos foram metamorfisados em fácies anfíbolito alto a granulito, na faixa de temperatura apical em torno de 650-750 °C. As associações petrogenéticas indicam que as rochas foram acomodadas em níveis crustais distintos e, por isso, exibem associações minerais de pressões baixas ( $\pm$  250-350 MPa), médias ( $\pm$  400-600 MPa) e altas ( $\pm$  700-800 MPa). A percolação de fluidos secundários, succionados para zonas de baixa pressão por meio da decompressão exercida durante a exumação das rochas, é favorecida a partir dos planos de falhas e de cavalgamentos e realizam as transformações retrógradas do metamorfismo. No retrometamorfismo há a desestabilização de minerais de média e alta pressão, a formação de porfiroblastos de minerais agregados por sucção da matriz, além dos padrões de fraturamentos preenchidos com hidrominerais. Na interação com fluidos secundários são geradas neoblasteses, texturas de substituição e os processos de pseudomorfismo, classificados na talcificação, muscovitização ou epidotização das associações.

Palavras-chave: Asbesto. Hábito Fibroso. Zona de Cisalhamento Patos. Retrometamorfismo. Pseudomorfismo.

## ABSTRACT

In the geological domain of the Patos Shear Zone there are several occurrences of asbestiform minerals, hosted in rocks with metaultramagmatic composition. In the region of Várzea Alegre, Granjeiro and Mangabeira the asbestos found in the lithotypes of the Granjeiro Complex were rudimentary exploited by prospectors who aimed at the performance of the physicochemical properties of this crystalline habit in commercial activities, especially the manufacture of asbestos tiles. The growing global trend of banning asbestos marketing has led to the devaluation of the material and the consequent abandonment of these mines. In the petrographic study, the fibrous or asbestos habit provides important information of the geological processes that acted in this region, characterized by the high temperature metamorphism that reached the partial melt of the rocks. Fibrous habit are regulated in the thermodynamic process of metamorphism in conjunction with the mobility of hydrothermal fluids interacting with antophyllite, tremolite and fibrolite. The petrographic, scanning electron microscopy coupled with energy dispersive X-ray (SEM-EDX) and X-ray diffraction (XRD) analyzes of the mineralogical associations present in outcrop lithotypes, including calcium-silicate and metapellitic rocks, define the conditions and processes caused in the stabilization of the minerals inherent in the shear zone and the deployment of the transpressive Duplex of Lavras da Mangabeira arrangement. The lithotypes were metamorphosed into high amphibolite and granulite facies, in the apical temperature range around 650-750 ° C. The petrogenetic associations indicate that the rocks were accommodated at different crustal levels and, therefore, exhibit mineral associations of low ( $\pm$  250-350 MPa), medium ( $\pm$  400-600 MPa) and high pressures ( $\pm$  700-800 MPa). The percolation of secondary fluids, suctioned to low pressure zones through decompression exerted during the rock exhumation, is favored from the fault and horseback planes and performs the retrograde transformations of metamorphism. In retrometamorphism there is a destabilization of medium and high pressure minerals, the formation of porphyroblasts of mineral aggregates by matrix suction, and fracturing patterns filled with hydrominerals. In the interaction with secondary fluids, neoblastesis, replacement textures and pseudomorphism processes are generated, classified in the talcification, muscovitization or epidotization of the associations.

Key-words: Asbestos. Fibrous Habit. Patos Shear Zone. Retrometamorphism. Pseudomorphism.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, com destaque para os pontos estudados, concentrados na porção leste da região de Várzea Alegre, nas proximidades de Granjeiro e Mangabeira. As principais vias de acessos consistem em rodovias federais e estaduais, além de caminhos e estradas não pavimentadas não identificadas no mapa. ....3
- Figura 2 - Compartimentação tectônica da porção setentrional da Província Borborema, com destaque para os domínios estruturais Médio Coreaú (DMC), Ceará Central (DCC) e Rio Grande do Norte (DRGN). O retângulo sobre a Zona de Cisalhamento Patos (ZCP) destaca a região de estudo, no limite sul do domínio Rio Grande do Norte (RGN), onde afloram as rochas do Complexo Granjeiro (CG). (Legendas: MSJC, Maciço São José Campestre; MTPE, Maciço Tróia-Pedra Branca, LT, Lineamento Transbrasiliano; LSP, Lineamento Senador Pompeu. Fonte: Ancelmi (2013).....8
- Figura 3 - Grade petrogenética para rochas metaultramáficas, com ênfase no alcance de estabilidade da antofilita (Ath) introduzida pelas reações dos pontos 5, 6 e 7, principalmente pela reação de desidratação do talco (Tlc). Abaixo do ponto 6, a antofilita tem o campo de estabilidade reduzido, em desequilíbrio com forsterita (Fo) e enstatita (En). Entre os pontos 6 e 7, a antofilita tem o campo de estabilidade ampliado, onde talco pode estar presente. Já acima do ponto 7, a antofilita fica estável na presença de quartzo (Qtz) a partir da reação de desidratação do talco. De acordo com esta grade petrogenética, a tremolita (Tr) corresponde ao anfibólio preferencialmente formado em condições de pressões média a alta, introduzida pela reação do ponto 3 e com o campo de estabilidade até o ponto 10. Fonte: Winter (2014).....13
- Figura 4 - Condições de Pressão e Temperatura para a formação de granitos e migmatitos em terrenos de baixa e média pressão. Nesta grade petrogenética de metapelitos, a curva da reação de quebra da muscovita (Ms) apresenta sobreposição com o campo de anatexia. Em graus metamórfico maiores, a curva da reação de quebra da biotita (Bt) passa a ter um papel importante na anatexia de rochas metapelíticas, contribuindo com a blastese de aluminossilicatos (Curva Bt1) e de ortopiroxênio (Curva Bt2). Fonte: Brucher & Grapes (2011). ....15

- Figura 5 - A) Amostra de mão PVA18-33 caracterizada por uma xistosidade bem marcada, de granulação média e com aspectos sigmoidais. B) Aspecto geral da textura fibroblástica, marcada pela orientação das fibras de tremolita. C) Cristaloblastos prismáticos de tremolita (Tr) com terminações fibrosas, onde talco e clorita estão intersticiais. D) Fibras de tremolita substituídas por talco (Tlc), com a geração de talco fibroacircular (Seta amarela) ou formando franjas em tremolita. E) Clorita (Chl) preenchendo microfraturas da rocha. .... 17
- Figura 6 - A) Aspecto asbestiforme em litotipo talcificado, cuja associação composta por talco, clorita e minerais da série da tremolita testemunham o processo de talcificação sobre o litotipo tremolita xisto em estágio de asbestificação avançada. B) Aspecto microscópico do litotipo talcificado, composto por diminutos cristaloblastos de talco fibroso, com orientação fibroblástica ou fibroradial (círculo amarelo), associado a clorita e actinolita..... 18
- Figura 7 - A) Amostra de mão ZCP-05 caracterizada por uma xistosidade incipiente, de granulação grossa, e com porções intemperizadas de cor ocre ou alaranjado. B) Aspecto geral da textura nematoblástica, com destaque para a orientação preferencial de antofilita. C) Cristaloblasto de antofilita (Ath) com a extinção reta sendo transposta por tremolita (Tr). D) Cristaloblasto lamelar de talco (Tlc) em fase mineralógica acessória. .... 19
- Figura 8 - Ocorrência de asbestos em garimpo desativado nas proximidades da cidade de Granjeiro. A) Escavação do garimpo recoberto pela vegetação, sob condições de intenso intemperismo, com a obliteração quase total do afloramento. B) Asbesto antofílitico sob boas condições de preservação e com o aspecto de recristalização em veios. C) As ocorrências de serpentinito associado aos asbestos fornecem informações da rocha encaixante de composição metaultramáfica ainda preservada. D) Lente de antofilita asbesto destacada de rochas metaultramáficas intensamente alteradas, com fibras que medem até 35 cm. E) Antofilita asbesto com o padrão de recristalização em vênulas, com o crescimento perpendicular à parede de fraturamento. .... 21
- Figura 9 - Ocorrência de asbesto em garimpo desativado nas proximidades do distrito de Mangabeira. A) Escavação do garimpo recoberto pela vegetação, sob más condições de preservação. As rochas aflorantes em processo de intemperismo ressaltam o contato marcado pela forma acamadada. B) Asbesto talcificado sob boas condições de preservação e com o aspecto de recristalização em camada,

concordante com a orientação de cisalhamento, em NE-SW. C) A poucos metros do asbesto afloram gnaisses miloníticos que podem estar relacionados com o processo de asbestificação. ....22

Figura 10 - A) Amostra de mão ZCP-01 com o aspecto asbestiforme, composto por massas fibrosas de antofilita, de coloração ocre devido a atuação do intemperismo. B) Aspecto microscópico da textura fibroblástica ou asbestiforme, constituída por fibras de antofilita (Ath) orientadas paralelamente entre si em associação com talco (Tlc). C) Aspecto asbestiforme *in situ* aflorante em garimpo de onde coletou-se a amostra ZCP-02, composta por cristaloblastos de talco fibroacirculares predominantemente, a lamelar. D) Cristaloblasto prismático de antofilita (Ath) imerso em uma matriz talcificada.....23

Figura 11 - A) Amostra de mão PVA18-35, caracterizada pelos bandamentos de granulação média, com bandas quartzofeldspáticas alternadas com bandas compostas por granada (Grt) e muscovita (Ms). A rocha exibe a coloração branca ressaltada pela presença da albita (Ab). B) Aspecto geral das texturas heteroblástica e porfiroblástica, com porfiroblastos de muscovita, de hábito lamelar, com bordas corroídas e intrecrescidas com quartzo e feldspato. C) Albita com o maclamento carlsbad e o intercrescimento antipertítico (círculo amarelo), onde observa-se cristaloblastos de muscovita desenvolvidos na fase potássica. D) Cristaloblastos fibroacirculares a fibroradiais (círculo vermelho) de muscovita pseudomórfica de fibrolita. E) Granada com bordas corroídas e cristaloblastos residuais de biotita (Bt) inclusa e F) Cristaloblasto de granada com borda coronítica de muscovita. .25

Figura 12 - A) Amostra de mão PVA18-57, caracterizada pelos bandamentos de granulação média, com bandas compostas por minerais micáceos (Biotita – Bt, muscovita – Ms e clorita - Chl) alternadas com bandas compostas por cordierita (Cdr) e andaluzita (And), predominantemente. B) Cristaloblastos de biotitas orientados, com destaque para o círculo amarelo onde sillimanita (Sil) fibrolítica bordeja a mica. C) Crescimento de clorita sobre muscovita e com inclusões de seções quadradas de andaluzita. D) Seções retangulares de andaluzita associada a cordierita, clorita e muscovita. E) Porfiroblasto de cordierita rotacionado e contornado pela foliação micácea. F) Agregados de muscovita pseudomórfica de fibrolita. ....27

Figura 13 - A) Amostra de mão PVA18-56, caracterizada pelos bandamentos de granulação grossa, com bandas compostas por minerais cálcio-silicáticos alternadas com

bandas quartzofeldspáticas. B) Aspecto geral da textura heteronematoblástica, predominante na rocha. C) Cristaloblastos de escapolita coroados por plagioclásio, que ocasionalmente migra para as porções leucocráticas e reagem com o microclínio, gerando os intercrescimentos mimerquíuticos. D) Intercrescimento simplectítico entre microclínio e epidoto vermicular. E) Bandamento metamórfico composto pela orientação de granada, diopsídio e escapolita. Esta última encontra-se argilizada. F) Substituição pseudomórfica de epidoto em granada, o qual se desenvolve incluindo a granada e o plagioclásio. Notar o intercrescimento simplectítico com o microclínio, evidenciando a epidotização da rocha. ....29

Figura 14 - Imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura, com análises químicas pontuais por EDS em destaque pelo símbolo “+”, enumerado em vermelho. A) Análise em tremolita (Tr) da amostra PVA18-33, de composição química enriquecida Mg e Fe subordinado. As análises do núcleo e borda (exemplos +8 e +5) demonstram enriquecimentos em Fe acompanhados pelas perdas de Ca e Mg em direção às bordas. Alguns cristaloblastos de tremolita estão bordejados por minerais de composição Fe-cromita (Crm). São observados microveios, com aspectos brechiformes, preenchidos por Mg-clorita (Chl), ilmenita (Ilm) e apatita (Ap). B) Tremolita associada com ilmenita e Mg-clorita intersticiais. Nas microfaturas Mg-clorita inclui fragmentos de tremolita (Círculo amarelo). ..... 32

Figura 15 - Imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura, com análises químicas pontuais por EDS em destaque pelo símbolo “+”, enumerado em vermelho. A) Análise em antofilita (Ath) da amostra ZCP-05, de hábito prismático, obtendo que se trata de uma variedade pobre em Al e Fe. B) Análise em antofilita (Ath) da amostra ZCP-01, de hábito de asbesto, associada ao talco (Tlc). Consta-se a composição química semelhante das variedades asbestiforme e não-asbestiforme, o que reforça um rearranjo no hábito cristalino durante o processo de asbestificação sem grandes mudanças na composição química. ....33

Figura 16 - Imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura, com análises químicas pontuais por EDS em destaque pelo símbolo “+”, enumerado em vermelho. A) Análises do núcleo e borda em granada da amostra PVA18-35 onde há o predomínio da composição de almandina (Alm), com perda de Fe em direção às bordas, possivelmente transferido para coroas de muscovita (Ms). B) Análises do núcleo e borda em granada da amostra PVA18-56, onde há o predomínio da

- composição de grossulária (Grs), com perda de Ca e Fe em direção às bordas, onde se desenvolve epídoto (Ep). ..... 34
- Figura 17 - Imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura, com análises químicas pontuais por EDS em destaque pelo símbolo “+”, enumerado em vermelho. A) Análises em albita (Ab) da amostra PVA18-35 associado com granada almandina (Alm) e muscovita (Ms). As lamelas de muscovita presentes em albita indicam a possível reação de reestabilização das fases sódicas e potássicas, relacionada com a albitização do feldspato. B) Análises em plagioclásio (Pl) labradorítico (An<sub>50-53</sub>) que formam coroas em escapolita meionítica (Mei) da amostra PVA18-56. .... 35
- Figura 18 - Difratoograma da Amostra ZCP-05, com picos de cristalinidade indicando a presença de antofilita (Ath), quartzo (Qtz), clorita (Chl), talco (Tlc) e actinolita (Act). ..... 36
- Figura 19 - Difratoograma da amostra ZCP-01, cujos picos de cristalinidade indicam somente a presença de antofilita (Ath). ..... 37
- Figura 20 - Difratoograma da Amostra PVA18-35, com picos de cristalinidade indicando a presença da albita de alta temperatura (Ab), muscovita (Ms), quartzo (Qtz), microclínio (Mc) e granada (Grt). ..... 38
- Figura 21 - Difratoograma da Amostra PVA18-57, com picos de cristalinidade indicando a presença de biotita (Bt), muscovita (Ms), clorita (Chl), cordierita (Crd) e quartzo (Qtz). ..... 39

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>EPÍGRAFE</b> .....	vii
<b>RESUMO</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	ix
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	x
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 ABORDAGEM TEMÁTICA.....	1
1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO .....	2
1.4 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS .....	3
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
<b>1.5.1 Levantamento bibliográfico</b> .....	4
<b>1.5.2 Petrografia</b> .....	4
<b>1.5.3 Microscópio eletrônico de varredura acoplado com espectroscopia por energia dispersiva - MEV-EDS</b> .....	5
<b>1.5.4 Difração de Raios X - DRX</b> .....	5
<b>2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL</b> .....	7
2.1 ASPECTOS GERAIS.....	7
2.2 DOMÍNIO RIO GRANDE DO NORTE.....	7
2.3 ZONA DE CISALHAMENTO PATOS.....	8
2.4 TERRENO GRANJEIRO.....	9
2.5 COMPLEXO GRANJEIRO .....	9
2.6 OCORRÊNCIAS DE ASBESTOS NA REGIÃO.....	10
<b>3 REVISÃO CONCEITUAL E PETROGENÉTICA</b> .....	11
3.1 OS HÁBITOS FIBROSO E DE ASBESTO .....	11
<b>3.1.1 Antofilita</b> .....	12
<b>3.1.2 Tremolita</b> .....	13
<b>3.1.3 Sillimanita - Fibrolita</b> .....	14
<b>4 RESULTADOS</b> .....	16
4.1 ANÁLISES PETROGRÁFICAS .....	16
<b>4.1.1 Amostras de rochas metaultramáficas</b> .....	16
4.1.1.1 Tremolita xisto.....	16

4.1.1.2 Antofilita xisto.....	19
4.1.1.3 Antofilita asbesto.....	20
<b>4.1.2 Amostras de rochas metapelíticas.....</b>	<b>23</b>
4.1.2.1 Granada-albita gnaiss.....	23
4.1.2.2 Sillimanita-andaluzita-cordierita-biotita gnaiss.....	25
<b>4.1.3 Amostra de rocha cálcio-silicática.....</b>	<b>27</b>
4.1.3.1 Granada-diopsídio-escapolita gnaiss.....	27
4.2 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA - MEV.....	29
4.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X - DRX.....	36
<b>5 DISCUSSÕES.....</b>	<b>39</b>
5.1 INTERPRETAÇÕES E ESTIMATIVAS DAS CONDIÇÕES DO METAMORFISMO PROGRESSIVO.....	39
5.2 INTERPRETAÇÕES E ESTIMATIVAS DAS CONDIÇÕES DO METAMORFISMO REGRESSIVO.....	42
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 APRESENTAÇÃO

O presente documento trata dos estudos de minerais com o hábito fibroso ou de asbesto, oriundos das ocorrências de minerais asbestiformes relatadas por alunos da disciplina de Mapeamento Geológico II, ofertada pela Faculdade de Geologia (FAGEO) ao curso de graduação em Geologia da Universidade Federal do Pará (UFPA). Os relatórios e trabalhos de mapeamento passados descrevem a presença de asbesto antofilítico na região de Várzea Alegre onde foram coletadas as amostras, disponibilizadas com as suas respectivas coordenadas, para o acervo do Projeto Várzea Alegre (PVA) da FAGEO. Outras informações sobre os asbestos estão contidas na listagem de ocorrência mineral do Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, com destaque para o Projeto Jaguaribe, do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Ainda assim, no mapeamento geológico ofertado durante o ano de 2018 do Projeto Várzea Alegre (PVA18) foram realizadas novas coletas e informações que avançam no entendimento metamórfico e do contexto geotectônico da Zona de Cisalhamento Patos, ressaltando que as amostras iniciadas com a sigla PVA18 foram obtidas do trabalho realizado pela equipe II, deste projeto.

### 1.2 ABORDAGEM TEMÁTICA

O hábito cristalino é a forma ou o conjunto de formas em que um mineral se apresenta na natureza (Nardy *et al.* 2009, Klein & Dutrow 2012). Essa propriedade mineralógica pode ser diagnóstica na caracterização de alguns minerais e sugestiva dos processos geológicos que levaram a sua formação. Especialmente, o hábito fibroso é utilizado para classificar um agregado de fibras muito finas, que podem variar de fibras milimétricas, centimétricas até grandes massas fibrosas de um mesmo mineral. Quando um mineral apresenta o hábito fibroso bem desenvolvido e com boas propriedades físico-químicas, ele pode ser classificado como asbesto ou amianto (Zoltai 1981), termos clássicos utilizados para classificar minerais fibrocomerciais. Minerais asbestiformes são bons isolantes térmicos, com alta resistência mecânica e química, com alta durabilidade e flexibilidade (Janela & Pereira 2016, Oliveira 1996). Historicamente, a abundância na natureza e o baixo custo de extração permitiram a comercialização e a difusão dos asbestos no ramo industrial (Filho & Linares 2009).

A utilização de asbestos na fabricação de materiais de fibrocimento, entretanto, se tornou uma polêmica desde quando esse conjunto de minerais passou a ser objeto de estudos por estar relacionado com doenças, a partir da primeira guerra mundial (Scliar 1998). Desde então, foram realizados estudos científicos voltados para as áreas das ciências sociais,

biológicas, econômicas e políticas os quais chegaram à conclusão de que a respiração da poeira oriunda do processo de beneficiamento dos asbestos, durante a exploração, provoca efeitos nocivos na saúde das pessoas que trabalham nas minas e da sociedade afetada pela dispersão das poeiras. A comprovação de que essa poeira apresenta potencial carcinogênico implicou na proibição da comercialização desses minerais em mais de 70 países, inclusive no Brasil (ABREA 2018).

A comercialização de amianto das variedades de anfibólios está proibida no país desde 1995, pela lei federal 9.055/1995, que permitia somente o uso controlado de amianto branco, do grupo das serpentinas. Em novembro de 2017, o Supremo Tribunal Federal determinou a proibição total da comercialização de amianto de qualquer tipo em todo o país, alegando que não há níveis seguros para o uso do amianto (Casado 2017).

Na região de estudo, Vasconcelos (2000) caracteriza 17 ocorrências de amianto, apesar de que a importância desse bem mineral reside muito mais no aspecto científico, desprovido de qualquer interesse econômico. Sabe-se que no passado os jazimentos desse recurso mineral promoviam uma fonte local de renda, com a exploração voltada, de acordo com moradores locais, para a fabricação de telhas de amianto. O processo de garimpagem a céu aberto pelo qual extraíam o material foi abandonado depois da tendência global de proibição e conseqüente desvalorização do amianto, restando escavações que obliteram e dificultam a observação do material *in situ*. Essa dificuldade é potencializada pelo grau de intemperismo em que se encontra as rochas encaixantes metaultramáficas.

Apesar de sua comercialização proibida devido a legislação vigente, no campo do estudo petrográfico os minerais de hábito fibroso e sobretudo os minerais asbestiformes podem fornecer informações petrológicas importantes dos processos geológicos que atuaram na porção oeste da Zona de Cisalhamento Patos (ZCP), onde as ocorrências de asbestos estão atribuídas aos processos hidrotermais em rochas metaultramáficas do Complexo Granjeiro (Ferreira & Santos 2000, Vasconcelos 2000).

### 1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área estudada localiza-se na porção sul do estado do Ceará, próximo à divisa com o estado de Pernambuco. O acesso principal à área pode ser feito a partir da cidade de Várzea Alegre, pela rodovia federal BR-230 que liga sete estados brasileiros. Uma outra forma de acesso à área pode ser feita pela Br-122 que liga Várzea Alegre até Iguatu, no Ceará, ou ainda pelas rodovias CE-153 e CE-060 que ligam as cidades Mangabeira até Cedro e Granjeiro até Juazeiro do Norte, respectivamente. O mapa de localização a seguir (Figura 1) destaca o

acesso à área de estudo, onde a concentração dos pontos estudados se encontra ao leste da cidade de Várzea Alegre. As amostras iniciadas com a sigla PVA possuem a identificação do Projeto Várzea Alegre, referido pelo autor como amostras reaproveitadas no escopo desse trabalho. Já os pontos referidos como garimpo desativado têm relevância na coleta das amostras com siglas ZCP (Zona de Cisalhamento Patos), sendo a amostra ZCP-01 coletada nas proximidades da cidade de Granjeiro e as amostras ZCP-02 e ZCP-05 nas proximidades de Mangabeira, distrito da cidade de Lavras da Mangabeira.

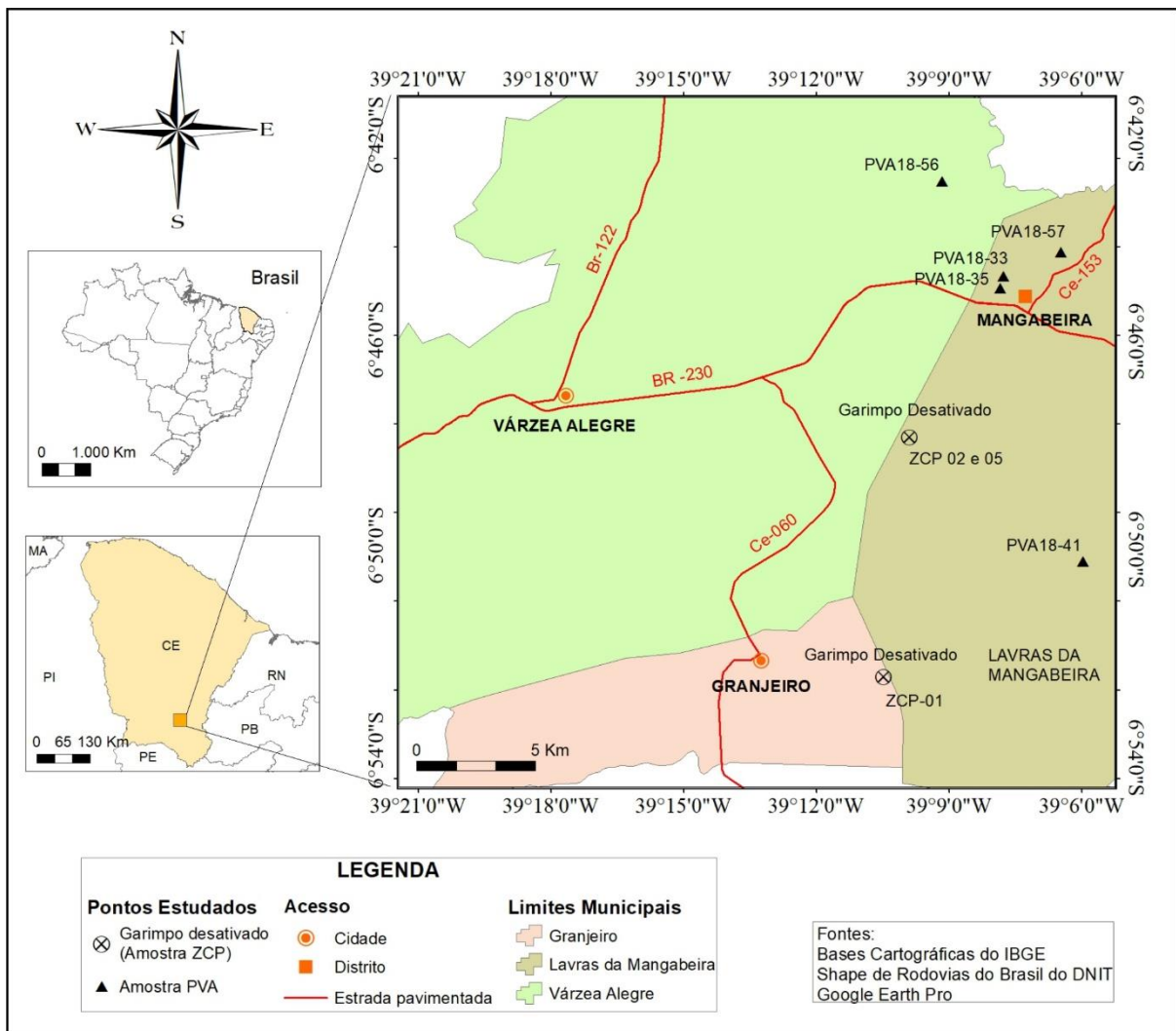


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, com destaque para os pontos estudados, concentrados na porção leste da região de Várzea Alegre, nas proximidades de Granjeiro e Mangabeira. As principais vias de acessos consistem em rodovias federais e estaduais, além de caminhos e estradas não pavimentadas não identificadas no mapa.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

O interesse científico de estudar os minerais de hábito fibroso e de asbesto reside do fato de que os únicos estudos nessa área remetem aos minerais asbestiformes, de tipo antofílitico, que estão associados aos processos hidrotermais desenvolvidos durante o

metamorfismo, não muito bem entendido, desta região. Ainda assim, não se discute a origem desses hábitos em outros minerais, a exemplo das ocorrências de tremolita, talco e fibrolita. Portanto, o objetivo deste trabalho consiste na caracterização petrográfica das ocorrências de minerais fibrosos e asbestiformes, estabelecendo os processos geológicos e o grau metamórfico associado na porção oeste da Zona de Cisalhamento Patos.

## 1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 1.5.1 Levantamento bibliográfico

Na primeira etapa desta metodologia foi realizado o levantamento bibliográfico da geologia regional (Seção 2), caracterizando o contexto geológico da área de trabalho, situada na porção oeste da Zona de Cisalhamento Patos e onde afloram as rochas do Complexo Granjeiro. Para tal caracterização da geologia, associada as ocorrências de asbestos na região, foi utilizada a literatura de Brito Neves *et al.* (2000), Freimann (2014), Ferreira & Santos (2000), Gomes (2001), Vasconcelos (1998), Vasconcelos (2000), dentre outras. Na segunda etapa foi realizado o levantamento de estudos e do conhecimento clássico e moderno sobre a origem do hábito fibroso e de asbesto nos contextos geológicos ao redor do mundo (Seção 3). Neste sentido, foram reunidas as principais informações sobre as ocorrências e tipo minerais que apresentam estes hábitos na natureza, os relacionando, portanto, com as ocorrências da área de estudo. A condição de formação de minerais fibrosos nas rochas metamórficas estudadas foi amplamente interpretada com bases na literatura especializada em processos metamórficos. Por isso, os dados obtidos foram tratados e interpretados seguindo essencialmente a literatura de Bucher & Grapes (2011) e Winter (2014). Para as leituras complementares utilizou-se a literatura de Miyashiro (1973), Turner (1935, 1968, 1981), Vernon (1975, 2004), Winckler (1979) e Yardley (1989) e as demais referências.

### 1.5.2 Petrografia

Nesta etapa de trabalho foram realizadas análises macroscópica e microscópica dos minerais que compõem as amostras coletadas (amostras ZCP-01, 02 e 05 e PVA18-33, 35, 41, 56 e 57). A análise macroscópica consistiu no reconhecimento geral das feições texturais das amostras, além de macroestruturas, associações dos litotipos, contatos, cor do litotipo e o hábito cristalino dos minerais, utilizando apenas a vista desarmada ou a lupa. Na análise microscópica foi requisitada a preparação de 15 lâminas delgadas no Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências da UFPA, com cortes transversais aos planos de foliações das amostras. Algumas amostras foram laminadas duas ou mais vezes, uma vez que existem fases mineralógicas importantes para o escopo do trabalho e que, contudo, estão

parcialmente preservadas e/ou ocorrem em quantidades acessórias nas rochas. Para a técnica de microscopia foi utilizado o microscópio petrográfico Zeiss convencional, de luz transmitida, disponibilizado pelo Laboratório de Petrografia (LABPETRO) do Instituto de Geociências (IG) da UFPA. Para o tratamento e elaboração das pranchas petrográficas foi utilizado o programa de desenho vetorial e design gráfico CorelDRAW versão de 2018.

### **1.5.3 Microscópio eletrônico de varredura acoplado com espectroscopia por energia dispersiva - MEV-EDS**

Nesta metodologia foram requisitadas a preparação de 6 lâminas polidas para a análise no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da UFPA. Como parte de requerimento da análise as lâminas foram metalizadas com Carbono Condutor da marca QUORUM, modelo Q150T-ES. As imagens de elétrons retroespalhados foram obtidas pelo equipamento MEV Zeiss, modelo SIGMA-VP, pertencente ao Instituto Tecnológico Vale (ITV), cedido em contrato de comodato para a UFPA. As condições de operação foram: corrente do feixe de elétrons = 80  $\mu$ A, voltagem de aceleração constante = 20 kv, distância de trabalho = 8,5 mm. O equipamento utilizado é acoplado a microanálises por EDS (energy dispersive spectroscopy), da marca IXRF, modelo Sedona-SD acoplado, também pertencente ao Instituto Tecnológico Vale (ITV). As condições de operação foram: corrente do feixe de elétrons = 80  $\mu$ A, voltagem de aceleração constante = 20 kv, distância de trabalho = 8,5 mm, tempo de contagem para análise dos elementos = 30 s.

### **1.5.4 Difração de Raios X - DRX**

As análises de DRX foram realizadas no Laboratório de Difração de Raios X do Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica do Instituto de Geociências da UFPA. Foram selecionadas 4 amostras, preparadas no gral de ágata, com exceção da amostra ZCP-01, que por se tratar de um material maleável, exigiu o tratamento no pulverizador da Retsch, modelo RM 200. Depois de pulverizada, 1 g de cada amostra foi prensada na ferramenta “Back load”, a fim de tornar a amostra um meio isotrópico planificado. Adiante, as análises foram realizadas no Difratorômetro modelo Emyrean da PANalytical, com tubos de raios-X cerâmico de anodo de Co ( $K_{\alpha 1} = 1,789010 \text{ \AA}$ ), foco fino longo, filtro  $K_{\beta}$  de Fe, detector PIXCEL3D-Medpix3 1x1, no modo *scanning*, com voltagem de 40 kV, corrente de 35mA, tamanho do passo  $0,0262^{\circ}$  em  $2\theta$ , varredura de  $3,0072^{\circ}$  a  $94,9979^{\circ}$  em  $2\theta$ , tempo/passos de 30,6 s, fenda divergente:  $1/4^{\circ}$  e anti-espalhamento:  $1/2^{\circ}$ , máscara: 10 mm. A identificação dos minerais foi feita através da comparação do difratograma obtido com

padrões (fichas) do banco de dados do ICDD-PDF (*International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File*).

## 2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

### 2.1 ASPECTOS GERAIS

A área de estudo está contida na Província Borborema. Esta província está localizada no Nordeste do Brasil, com uma área superior a 380.000 Km<sup>2</sup>, limita-se a sul com o Cráton São Francisco, a oeste com a Bacia do Parnaíba, a leste com a Província de Margem Continental Leste e com a Equatorial ao norte (Hasuí 2012).

A gênese geológica desta província tem origem na colisão de blocos crustais, que foram amalgamados durante a Orogênese Brasileira (Santos *et al.* 2001). Van Schumus *et al.* (1995) explica que a Província Borborema é uma região altamente deformada e metamorfisada com idades entre 500 e 600 Ma e que muitas feições anteriores a esta idade podem ser reconhecidas nas rochas e nas suas assinaturas isotópicas.

Brito Neves *et al.* (2000) subdivide a província em cinco domínios estruturais: Médio Coreaú, Ceará Central, Rio Grande do Norte, Transversal e Sul ou Meridional. Cada domínio é distinguido por parâmetros litoestratigráficos, estruturais, geocronológicos e geofísicos (Ferreira & Santos 2000). Esses compartimentos crustais se encontram seccionados por grandes zonas de cisalhamento, as quais não há um consenso se limitam domínios com evolução geológica distinta (Osako *et al.* 2011).

Santos *et al.* (2004) descreve que a Província Borborema compreende o embasamento composto de gnaisses e migmatitos, sequências supracrustais deformadas e metamorfisadas e plutons graníticos de idade brasileira. O embasamento consiste principalmente de ortognaisses paleoproterozoicos, com idades entre 2,2 e 2,0 Ga, com núcleos arqueanos (Neves *et al.* 2009).

Uma abordagem mais particular da província está voltada para a porção oeste da Zona de Cisalhamento Patos (Figura 2), situada a sul do Domínio Rio Grande do Norte. Nesta porção crustal afloram as rochas do Complexo Granjeiro, unidade onde se descreve as mais importantes ocorrências de minerais de hábito de asbesto da região.

### 2.2 DOMÍNIO RIO GRANDE DO NORTE

Cada domínio tectono-estratigráfico da Província Borborema compreende vários terrenos, considerados subfaixas geologicamente separáveis por discontinuidades estruturais e que também leva em consideração os parâmetros geofísicos, geocronológicos e litoestratigráficos (Ferreira & Santos 2000). Este domínio é formado pelos terrenos Rio Piranhas, Seridó, Granjeiro e São José do Campestre, sendo limitado a norte pela Bacia do Apodi, a sul pela Zona de Cisalhamento Patos, a oeste pela Zona de Cisalhamento Porto

Alegre e a leste pela Província Costeira (Ferreira & Santos 2000). Neste domínio a deformação transpressional ocorreu sob baixas pressões e altas temperaturas (Neves 2003).

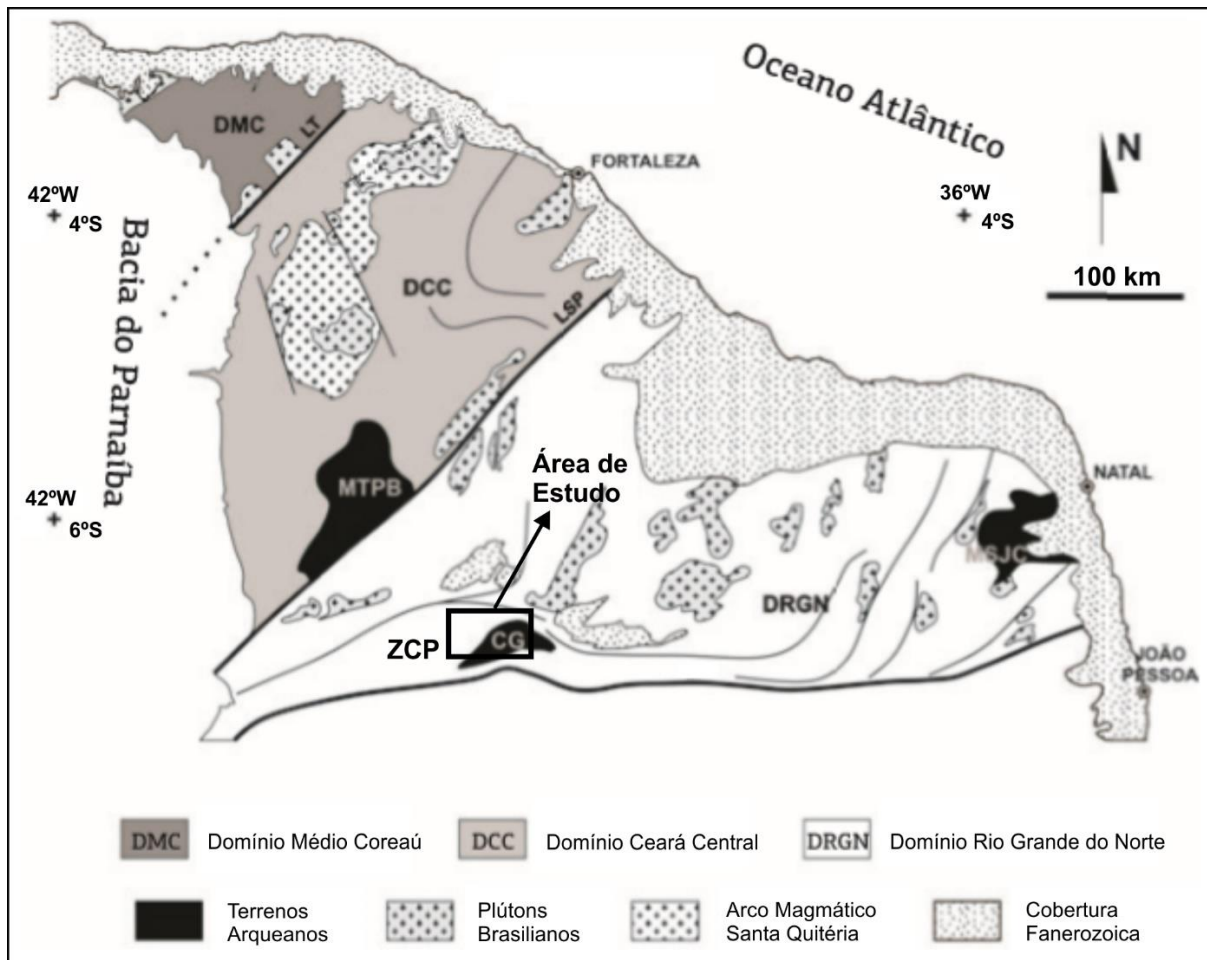


Figura 2 - Compartimentação tectônica da porção setentrional da Província Borborema, com destaque para os domínios estruturais Médio Coreau (DMC), Ceará Central (DCC) e Rio Grande do Norte (DRGN). O retângulo sobre a Zona de Cisalhamento Patos (ZCP) destaca a região de estudo, no limite sul do domínio Rio Grande do Norte (RGN), onde afloram as rochas do Complexo Granjeiro (CG). (Legendas: MSJC, Maciço São José Campestre; MTPB, Maciço Tróia-Pedra Branca; LT, Lineamento Transbrasiliânico; LSP, Lineamento Senador Pompeu. Fonte: Ancelmi (2013).

### 2.3 ZONA DE CISALHAMENTO PATOS

A Zona de Cisalhamento Patos ou Lineamento Patos constitui uma zona de falhas transcorrentes E-W e NNE-SSW resultado da colisão entre os crátons São Francisco/Congo e Oeste Africano (Arthaud 2007). A região entre o Lineamento Patos e a Zona de Cisalhamento Malta-Farias Brito consiste no principal cinturão de cisalhamento do Domínio Rio Grande do Norte, e onde estão confinados os objetos de estudo.

Estudos recentes de Freimann (2014) tratam a área que se estende desde a Zona de Cisalhamento Patos até a Zona de Cisalhamento Tatajuba caracterizada pelo arranjo de *Duplex* transcorrente compressivo de Lavras da Mangabeira, e destaca que neste cinturão de cisalhamento as rochas de domínios geológicos distintos foram deformadas e metamorfasadas

em grau alto, onde o metamorfismo de alta temperatura chegou até em torno de 700 °C, com registros de migmatização nas rochas do Complexo Granjeiro. Este autor descreve que o arranjo estrutural das rochas na porção oeste do Lineamento Patos apresenta fatias de níveis crustais do embasamento em contato alóctone com rochas de níveis crustais superiores.

#### 2.4 TERRENO GRANJEIRO

É limitado a norte pela Zona de Cisalhamento Malta-Farias Brito e a sul pela Zona de Cisalhamento Patos (Arthaud 2007). É formado principalmente por rochas de idades arqueanas e paleoproterozoica, com pequenas preservações de rochas neoproterozoicas e uma extensão da Faixa Seridó.

Ferreira & Santos (2000) descrevem que esta unidade corresponde a uma suíte intrusiva de tonalitos, trondhjemitos e granodioritos (TTG's), rochas metamáficas e metaultramáficas, com remanescentes de uma sequência metavulcanossedimentar pelítica e químico-exalativa metamorfisados na fácies anfíbolito grau médio a alto. De acordo com estes autores, são comuns ainda lentes de leucognaisses graníticos e trondhjemiticos, com idades obtidas pelo método U-Pb SHRIMP em zircão com até 2,54 Ga (Silva *et al.* 1997), associados a migmatitos orto e paraderivados.

Gonçalves (2009) complementam que este terreno apresenta fragmentos arqueanos imbricados tectonicamente em rochas paleoproterozoicas, e inclui ortognaisses do Complexo Serra dos Quintos. Segundo este a deformação imposta neste terreno é uma estruturação penetrativa E-W a NE-SW desenvolvida pelo sistema transcorrente da Zona de Cisalhamento Patos.

#### 2.5 COMPLEXO GRANJEIRO

Gomes & Vasconcelos (2000) descrevem que as rochas mais antigas do Terreno Granjeiro são referentes ao Complexo Granjeiro e são caracterizadas por um metamorfismo de fácies anfíbolito de grau médio a alto (Ferreira & Santos 2000). Esta unidade constitui uma sequência litológica composta por ortognaisses, paragnaisses, xistos, metabásicas e metaultrabásicas, cálcio-silicáticas, metacherts e formações ferríferas bandadas (Gomes 2000).

Hasui (2012) diz que o Complexo Granjeiro é composto por duas associações litoestratigráficas distintas, sendo a mais antiga representada por uma sequência supracrustal formada por metamáficas anfíbolitizadas, tufos máficos, félsicos e rochas metaultramáficas associadas a gnaiss, xisto, rochas cálcio-silicáticas, metacalcário, quartzito, formação

ferrífera bandada, metachert, os quais caracterizam uma associação vulcanosedimentar, com horizontes químico-exalativos, comum em crosta oceânica.

Palheta *et al.* (2018) complementa que esta unidade é constituída predominantemente por ortognaisses tonalíticos-granodioríticos, bandados, cinza, contendo várias injeções graníticas e frequentes *boudins* anfibolíticos, e propõe idades de até 2,79 Ga, obtidas pelo método U-Pb SHRIMP em zircão.

## 2.6 OCORRÊNCIAS DE ASBESTOS NA REGIÃO

A maior parte dos trabalhos desenvolvidos na região descrevem ocorrências de asbestos, classificados na listagem de ocorrências minerais da Folha Jaguaribe - SW (SB.24-Y) associadas com rochas básicas e ultrabásicas do Complexo Granjeiro.

Vasconcelos (2000) descreve 17 ocorrências de asbestos e 32 de talco nessa região, com principais zonas de ocorrências em torno das cidades de Granjeiro, Quitaiús e Mangabeira, no Ceará. De acordo com este autor, os asbestos estão configurados sob a forma de *stockworks*, associados a rochas básicas e ultrabásicas relacionadas com processos hidrotermais favorecidos pela Zona de Cisalhamento Patos (Gomes 2001).

Na localidade de Granjeiro são comuns tremolitos, peridotitos, serpentinitos, e hornblenditos, hospedeiras das inúmeras ocorrências de amianto, talco e vermiculita da localidade (Vasconcelos 1998) e onde os asbestos eram extraídos por garimpeiros a céu aberto. Atualmente sabe-se que esses jazimentos foram abandonados, devido à qualidade do asbesto, que do tipo antofilítico tem a sua comercialização proibida desde 1995, além também devido à falta de infraestrutura e pelo difícil acesso à região.

Outras ocorrências de asbestos também são descritas nos Complexos Caicó e Serra dos Quintos e, ao sul do Lineamento Patos, nos complexos Sertânia, São Caetano, Riacho Gravatá e em alguns ortognaisses paleo e mesoproterozoico (Ferreira & Santos 2000), porém, apenas o Complexo Granjeiro era considerado uma área mineralizada.

### 3 REVISÃO CONCEITUAL E PETROGENÉTICA

#### 3.1 OS HÁBITOS FIBROSO E DE ASBESTO

Scliar (1998) e Mendes (2001) consideram que são descritos mais de 350 minerais com o hábito fibroso, encontrados em rochas ígnea e metamórfica, porém apenas as classes das serpentinas e dos anfibólios ocorrem com o hábito de asbesto. Eles descrevem que na classe das serpentinas o principal representante dos minerais asbestiformes é o crisotila, com fibras flexíveis, finas e sedosas. Na classes dos anfibólios a antofilita, caracterizada por fibras fracas e quebradiças; a amosita, uma variedade fibrosa da grunerita-cummingtonita; a crocidolita, uma variedade fibrosa da riebeckita, caracterizada por fibras retas, finas e compridas; a tremolita, caracterizada por fibras fracas e quebradiças, apresentando também um uso limitado na indústria; e a actinolita a qual se apresenta escassa na forma fibrosa, comumente é quebradiça (Filho & Linares 2013).

Considerando que esses termos não podem ser aplicados em mesmas circunstâncias, Zoltai (1981) diz que o hábito de asbesto é restrito aos minerais que parecem asbestos, os quais comumente consistem de agregados fibrosos facilmente separáveis. Este autor ainda destaca que o hábito de asbesto e de suas características intrínsecas é gradacional, e apresentam formas alongadas, composta por fibras resistentes, flexíveis, duráveis e quando bem desenvolvidas pode apresentar tamanhos até 50 vezes maiores do que o mesmo mineral cristalizado em outro hábito.

Muitos autores consideram que o hábito de asbesto ocorre como resultado de transformações hidrotermais durante intrusões ígneas. Não obstante, Oliveira (1996) atribui mineralizações de crisotila asbestiforme por ação hidrotermal decorrente da intrusão de um magma ácido, de onde os fluidos promoveram a serpentinização de rochas ultramáficas, com a recristalização e o preenchimento das fissuras e fendas das rochas com o material fibroso. Outros autores atribuem as ocorrências de asbestos em ambientes de alta pressão (Van Orden 2006). Contudo, Zoltai (1981) ao realizar experimentos com asbestos sintetizados em laboratório constatou que o mais confiável método de crescimento de fibras é realizado por métodos de evaporação e condensação submetido a pressão de fluidos, onde o crescimento unidirecional das fibras é causado por uma tensão unidimensional. As ocorrências de asbestos no mundo inteiro apontam que este hábito está intimamente relacionado com condições de estresse e de atividade hidrotermal.

Em suma, apenas três minerais de hábito fibroso que fazem parte do escopo deste trabalho merecem destaque e por isso será apresentada uma revisão conceitual e petrogenética desses minerais, ressaltando as suas relações com o metamorfismo regional.

### 3.1.1 Antofilita

Durante a trajetória metamórfica de rochas metaultramáficas, parte da fase fluida aquosa presente durante o metamorfismo é armazenada em minerais hidratados, como a antofilita, podendo este mineral ocorrer nas formas asbestiforme ou não-asbestiforme (Roggli & Coin 2004). Ambas as formas são referidas com o nome antofilita, aplicando-se o adjetivo asbesto para distinguir e classificar a variedade fibrosa, como exemplo antofilita asbesto (ATSDR 2001), e elas podem ocorrer juntas em um mesmo ambiente geológico.

A formação de antofilita em rochas metaultramáficas é conduzida por diversas reações nas grades petrogenéticas do metamorfismo de grau médio a alto e o seu campo de estabilidade depende de vários fatores. Ao se tratar deste tipo de rocha, Harker (1974) destaca que os dois principais exemplares de rochas ultramáficas metamorfisadas são os peridotitos e os piroxenitos e a assembleia mineral metamórfica estável vai depender das proporções de piroxênio e olivina presente na composição mineralógica do protólito.

Neste trabalho é adotado o modelo petrogenético de Winter (2014), o qual retrata o campo de estabilidade da antofilita em rochas metaultramáficas (Figura 3). Para ele, em baixas pressões a antofilita é introduzida a partir da reação (1) (Ponto “5” da Figura 3):



De acordo com esse autor, o campo de estabilidade da antofilita é reduzido se a abundância de forsterita for maior do que a antofilita na rocha. Isso resulta na reação entre esses minerais para formar enstatita pela reação (2):



Contudo, rochas metaultramáficas com teores maiores em sílica, que se assemelham geoquimicamente aos piroxenitos (Harker 1974), o talco tem maior abundância e promove reações com a enstatita para formar antofilita pela reação (3) (Ponto “6” da Figura 3):



Ele ainda completa que em rochas metaultramáficas com maiores proporções de sílica o talco permaneceria estável para mais de 750 °C, onde finalmente seria decomposto pela reação (4) (Ponto “7” da Figura 3):



Harker (1974) conclui que a estabilidade do talco é favorecida quando o estresse de cisalhamento é maior. Segundo ele uma rocha metaultramáfica pode ser caracterizada pela associação de talco e tremolita ou talco e antofilita, na qual os anfibólios podem coexistir separados ou então juntos.



- Reconstituição química dos protólitos ultramáficos, que durante os processos metamórficos geram a recristalização dos minerais originais em grossos grãos de tremolita, comumente com trama planar ou linear.
- Se o tremolita xisto, descrito acima, é submetido ao estresse das movimentações mecânicas de cisalhamento, entretanto sem recristalização, o resultado será finos grãos de tremolita, caracterizado como fibras.
- Se o tremolita xisto for então submetido aos mecanismos de cisalhamento acompanhado por recristalização do material cisalhado, são geradas massas cristalinas completamente fibrosas, com orientação aleatória.
- Durante o cisalhamento e a recristalização em estágio avançado há a obliteração total do protólito ultramáfico original e as massas fibrosas de tremolita podem apresentar um aspecto xistoso à rocha, englobando algumas vezes um material grosseiro residual.

### 3.1.3 Sillimanita - Fibrolita

A sillimanita é um mineral que normalmente ocorre na sua variedade fibrosa, a fibrolita, onde a água composicional desse mineral é retida e absorvida entre as fibras (Deer *et al.* 1966). Em terrenos metamórficos, geralmente o aparecimento da sillimanita coincide com a formação de granitos e migmatitos (Yardley 1989). De acordo com Best (1982) o primeiro aparecimento da sillimanita em metapelitos, ocorre em baixas pressões como produto da reação (5) de desidratação da muscovita:



Por outro lado, na grande maioria dos casos o plagioclásio também participa desta reação, e a reação ideal se assemelha à equação de Winter (2014) que descreve a quebra da muscovita na presença de quartzo e da componente albita para gerar K-feldspato e sillimanita como mostra a reação (6):



O teor de albita presente permite a formação de um álcali-feldspato sódico-potássico no produto final da reação. Turner (1981) sugere que essas reações de desidratação da muscovita podem gerar sanidina e sillimanita, além de componentes graníticos resultantes da fusão parcial da rocha, que podem coexistir em equilíbrio com a paragênese quartzo-sanidina-muscovita-sillimanita.

Trabalhos mais recentes de Bucher & Grapes (2011) demonstram que a decomposição da muscovita na presença de quartzo em baixas pressões, exibe uma temperatura mínima para produzir sillimanita, K-feldspato e água sem fusão parcial. Já em pressões mais elevadas a

muscovita se decompõe em sillimanita e K-feldspato em equilíbrio com um líquido magmático anatético.

De acordo com Miyashiro (1973), o aumento do grau metamórfico causa progressivas reações de desidratação mineral, no qual a água é gradualmente liberada para fora das rochas, e o processo de quebra da biotita passa a ter um papel fundamental nas reações de desidratação.

Para Bucher & Grapes (2011) a desidratação da biotita para formar aluminossilicatos tem o campo da reação de quebra representado entre as curvas Bt1 e Bt2 (Figura 4), representada pela reação (7). A partir da curva Bt2 a biotita quebra para formar ortopiroxênio.

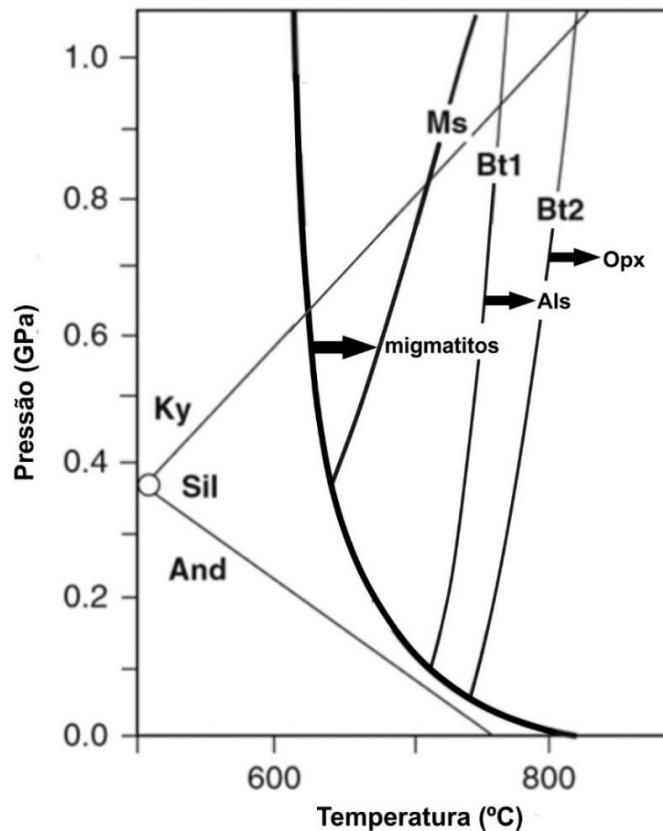


Figura 4 - Condições de Pressão e Temperatura para a formação de granitos e migmatitos em terrenos de baixa e média pressão. Nesta grade petrogenética de metapelitos, a curva da reação de quebra da muscovita (Ms) apresenta sobreposição com o campo de anatexia. Em graus metamórfico maiores, a curva da reação de quebra da biotita (Bt) passa a ter um papel importante na anatexia de rochas metapelíticas, contribuindo com a blastese de aluminossilicatos (Curva Bt1) e de ortopiroxênio (Curva Bt2). Fonte: Brucher & Grapes (2011).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISES PETROGRÁFICAS

Ao considerar os minerais de hábitos fibroso ou de asbesto a caracterização petrográfica é a metodologia mais adequada para observar os referidos hábitos. Esta metodologia serve como parâmetro para a exclusão ou a inclusão de minerais que apresentam estes hábitos na natureza, diferindo de variedades cristalinas não fibrosas ou não asbestiforme. É corroborada com os resultados da Difração de Raios X (Item 4.3), uma vez que estes apresentam respostas referentes ao arranjo estrutural e ao grau de cristalinidade das fases mineralógicas presentes na amostra.

Foram selecionadas cinco amostras de rochas metaultramáficas, das quais três contêm asbestos, duas amostras de rochas metapelíticas, uma granadífera e a outra não, além de uma amostra de rocha cálcio-silicática. As rochas metaultramáficas descritas (amostras PVA18-33, 41 e ZCP-01, 02 e 05) apresentam em associação mineral proporções variáveis de tremolita, antofilita e talco com os hábitos de interesse.

Em relação aos metapelitos (amostras PVA18-35 e 57) foi observado em associação mineral a sillimanita, de hábito fibroso, e a muscovita de hábito fibroacircular, associados com outros minerais aluminossilicatos estabilizados no contexto metamórfico regional.

A amostra de rocha cálcio-silicática (amostra PVA18-56) se distingue das demais amostras haja vista que em sua paragênese não se constatou minerais de hábito fibroso ou de asbesto.

Em suma os resultados petrográficos foram posteriormente comparados com os resultados obtidos por MEV-EDS e DRX (Itens 4.2 e 4.3).

#### 4.1.1 Amostras de rochas metaultramáficas

##### 4.1.1.1 Tremolita xisto

Os limites dimensionais deste litotipo aflorante não são precisamente estabelecidos, sobretudo pelo estado de intenso intemperismo que se encontram as rochas metaultramáficas da região. A amostra foi retirada de uma lente de ocorrência próxima ao distrito de Mangabeira, orientada em NE-SW e mergulho subvertical, associada em contato concordante a poucos metros do metapelito granadífero e de rochas anfíbolíticas. Este litotipo (amostra PVA18-33) apresenta a cor verde escura, granulação média (1-5 mm), com xistosidade bem desenvolvida, ligeiramente sigmoidal (Figura 5A), composta pela orientação predominantemente de tremolita ( $\pm 80\%$ ), e subordinadamente por talco ( $\pm 11\%$ ), clorita ( $\pm 9\%$ ), apatita e minerais opacos ( $\pm 1\%$ ). Apresenta a textura fibroblástica predominantemente (Figura 5B),

formada pelas fibras de tremolita orientadas segundo uma direção preferencial, e mais localmente a textura lepidoblástica reside.

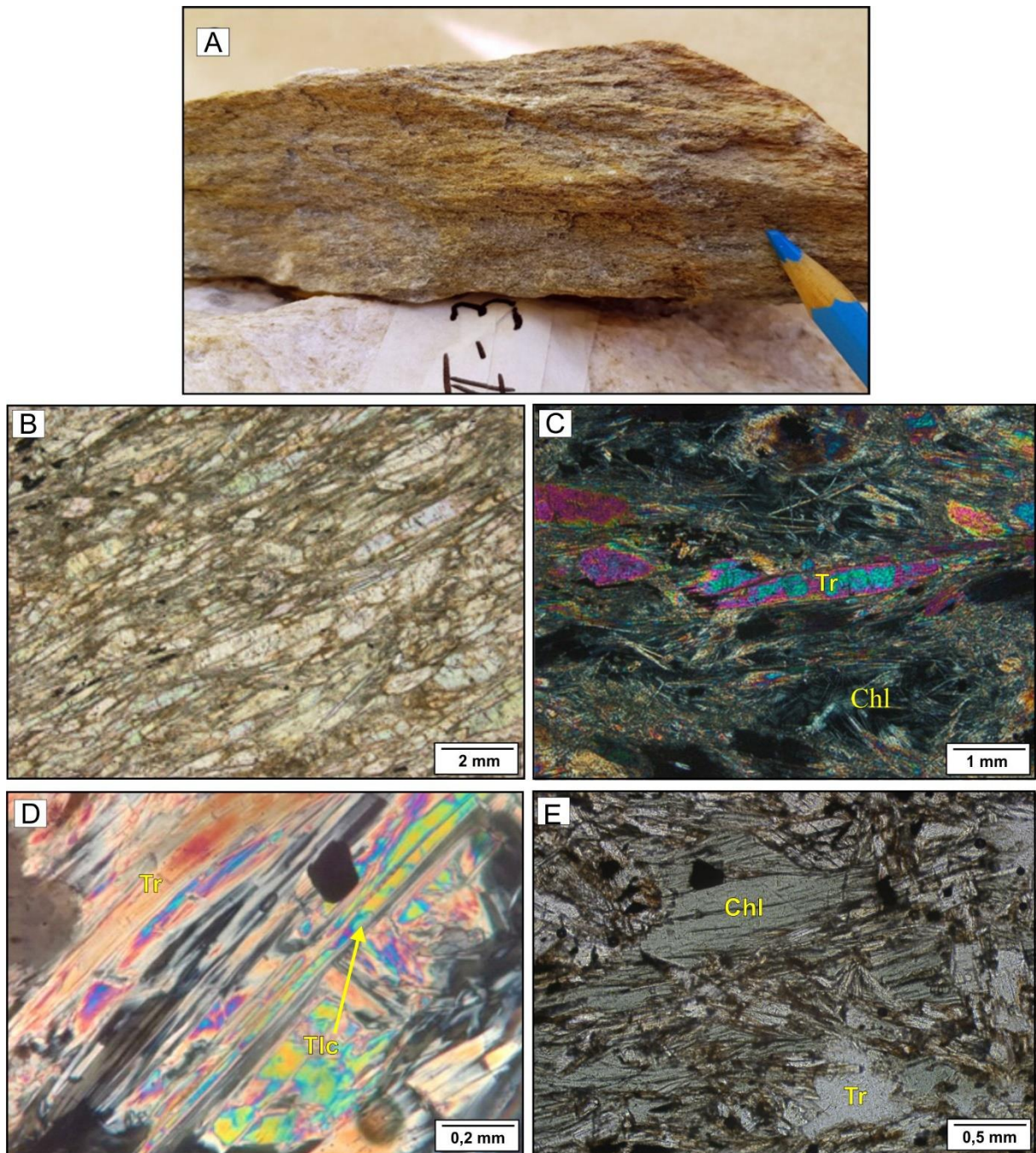


Figura 5 - A) Amostra de mão PVA18-33 caracterizada por uma xistosidade bem marcada, de granulação média e com aspectos sigmoidais. B) Aspecto geral da textura fibroblástica, marcada pela orientação das fibras de tremolita. C) Cristaloblastos prismáticos de tremolita (Tr) com terminações fibrosas, onde talco e clorita estão intersticiais. D) Fibras de tremolita substituídas por talco (Tlc), com a geração de talco fibroacircular (Seta amarela) ou formando franjas em tremolita. E) Clorita (Chl) preenchendo microfraturas da rocha.

A tremolita corresponde ao mineral mais abundante, ocupando cerca de 80% na rocha. Exibe cristaloblastos 3 mm a 5 mm, subdioblásticos a xenoblásticos, de hábito prismático com as terminações fibrosas (Figura 5C), de cor incolor a verde pálido, levemente pleocróico.

Esses minerais constituem uma geometria ligeiramente sigmoidal e são envolvidos por clorita, talco, predominantemente.

O talco e a clorita fazem parte dos constituintes minerais acessórios e secundários na rocha, dispostos em concordância a xistosidade da rocha, ocupando cerca de 20% na amostra PVA18-33, porém em quantidades variáveis em outras amostras desse mesmo litotipo.

O talco exhibe cristaloblastos incolores, em torno de 1 mm, subdioblásticos, com o predomínio do hábito fibroacircular, a lamelar, subordinadamente (Figura 5D). O hábito fibroso no talco geralmente está associado a substituição pseudomórfica nas fibras de tremolita, enquanto que os cristaloblastos lamelares tendem a ocorrer raramente de maneira intersticial ou formando franjas no anfibólio.

A clorita exhibe cristaloblastos verdes, levemente pleocróicos, em torno de 1 mm, subdioblásticos, de hábito lamelar. Em grande parte, consiste em mineral de alteração secundária, que por vezes preenchem as microfraturas e espaços abertos na rocha (Figura 5E).

Na amostra PVA18-41 o estágio de talcificação avançada no litotipo por meio da substituição pseudomórfica do anfibólio implica na textura mais sedosa para a rocha e testemunha a possível formação de tremolita asbestos (Figura 6A). Nesta amostra, o talco asbestiforme é composto por diminutos cristaloblastos de talco com o hábito fibroso a fibroradial (Figura 6B) que constituem cerca de  $\pm 75\%$  da rocha, associado a proporções subordinadas de clorita ( $\pm 15\%$ ), minerais da série da tremolita ( $\pm 10\%$ ) e minerais opacos ( $\pm 1\%$ ).

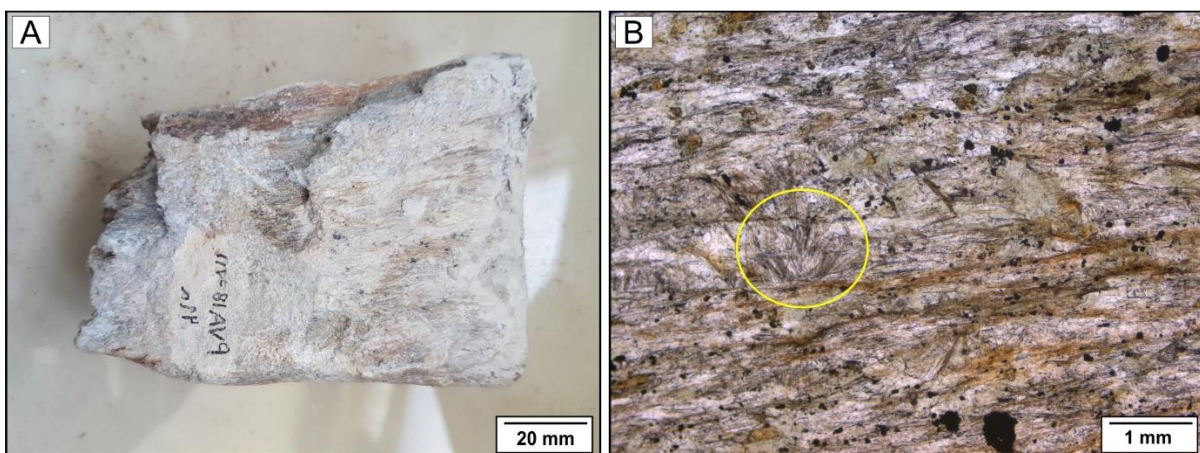


Figura 6 - A) Aspecto asbestiforme em litotipo talcificado, cuja associação composta por talco, clorita e minerais da série da tremolita testemunham o processo de talcificação sobre o litotipo tremolita xisto em estágio de asbestificação avançada. B) Aspecto microscópico do litotipo talcificado, composto por diminutos cristaloblastos de talco fibroso, com orientação fibroblástica ou fibroradial (círculo amarelo), associado a clorita e actinolita.

#### 4.1.1.2 Antofilita xisto

Os limites dimensionais deste litotipo aflorante não são precisamente estabelecidos, contudo sabe-se que assim como o litotipo tremolita xisto este litotipo também ocorre como lentes, orientadas em NE-SW e mergulho subvertical, associadas com rochas milonitizadas. Este litotipo (amostra ZCP-05) apresenta a cor verde clara, com porções ocre interpretadas como o produto do intemperismo. Possui granulação grossa (até 10 mm), com xistosidade bem desenvolvida (Figura 7A), sendo composto predominantemente pela antofilita ( $\pm 65\%$ ), tremolita ( $\pm 34\%$ ) e talco ( $\pm 1\%$ ). Apresenta a textura nematoblástica (Figura 7B), com a orientação dos anfibólios segundo uma direção preferencial, onde podem ocorrer cristaloblastos transversais de tremolita (Figura 7C).

A antofilita corresponde ao mineral mais abundante e exibe cristaloblastos de tamanhos entre 4 mm e 10 mm, subidioblásticos a idioblásticos, de hábito prismático, predominantemente. Os cristaloblastos são incolores, exibem divisibilidade basal e a extinção reta. Frequentemente apresentam as bordas em contatos com talco ou tremolita.

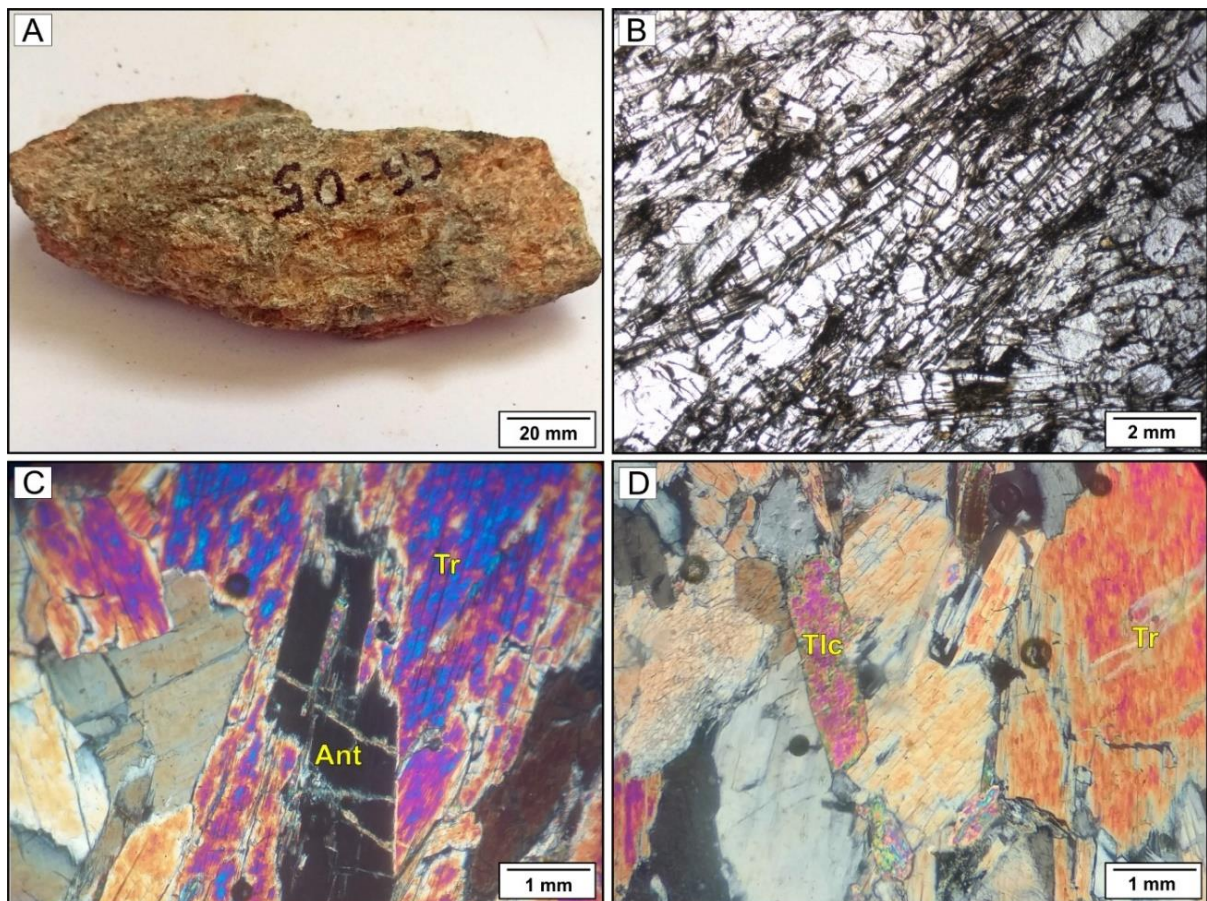


Figura 7 - A) Amostra de mão ZCP-05 caracterizada por uma xistosidade incipiente, de granulação grossa, e com porções intemperizadas de cor ocre ou alaranjado. B) Aspecto geral da textura nematoblástica, com destaque para a orientação preferencial de antofilita. C) Cristaloblasto de antofilita (Ath) com a extinção reta sendo transposta por tremolita (Tr). D) Cristaloblasto lamelar de talco (Tlc) em fase mineralógica acessória.

A tremolita, segundo mineral mais abundante na rocha, exhibe cristaloblastos subdioblásticos, de hábito prismático, com a cor incolor a verde pálido, levemente pleocróica, que medem em torno de 4 mm e 6 mm. As vezes os grãos apresentam-se transpostos a antofilita e ao talco, indicando que este mineral pode ter uma origem secundária.

A mineralogia acessória é composta de talco, com cristaloblastos subdioblásticos, de hábito lamelar (Figura 7D), por vezes bordejando a antofilita. A clorita ocorre como produto de alteração dos anfibólios ou preenchendo microfraturas.

#### 4.1.1.3 Antofilita asbesto

O antofilita asbesto (amostra ZCP-01) corresponde a um agregado de antofilita com o hábito de asbesto, composto por fibras que medem até 35 cm. Os seus limites dimensionais consistem em lentes, bolsões ou vênulas preenchidas com o material de cor branca, e ocre, quando intemperizado. Nas proximidades da cidade de Granjeiro ocorre em um garimpo desativado (Figura 8A) onde os asbestos (Figura 8B, D e E) estão associados a serpentinitos intensamente alterados pelo intemperismo (Figura 8C) e a disposição do material não está bem evidente na escavação, embora apresente os aspectos de preenchimento em veios e em vênulas da encaixante de composição metaultramáfica (Figura 8B e E), onde o crescimento do asbesto é perpendicular às paredes de fraturamentos.

Por outro lado, na localidade de Mangabeira a caracterização de asbestos (amostra ZCP-02) em um outro garimpo desativado (Figura 9A) registra o padrão de recristalização do material em camadas concordantes com o padrão de orientação regional em NE-SW (Figura 9B), associado com gnaisses miloníticos (Figura 9C), e a sua ocorrência nessa escavação está a poucos metros do antofilita xisto (amostra ZCP-05). Este litotipo (amostra ZCP-02) exhibe a textura fibroblástica ou asbestiforme (Figura 9B).

Ao microscópio o antofilita asbesto (amostra ZCP-01) é composto por mais de 98% de antofilita. Exhibe fibras incolores a marrom pálido, xenoblásticas, de hábito de asbesto, cujos agregados de antofilita finamente fibrosos, fortemente interligados e orientados paralelamente entre si, formam a massa fibrosa com a textura asbestiforme (Figura 10A). De modo geral, além do hábito, outra propriedade petrográfica diagnóstica da antofilita é a extinção reta. Nesta amostra, talco e clorita ocorrem com cristaloblastos subdioblásticos, de hábito lamelar, envolvidos entre as fibras de asbesto (Figura 10B).

Na amostra ZCP-02 o talco é o mineral predominante no material asbestiforme, constituindo  $\pm$  98% do litotipo, em estágio de talcificação avançado (Figura 10C). Neste caso, o talco apresenta cristaloblastos fibroacirculares, considerados pseudomórficos do antofilita

asbesto, e mais localmente cristaloblastos lamelares. Imersos nessa matriz talcificada são exibidos cristaloblastos prismáticos de antofilita (Figura 10D), além de placas de vermiculita e minerais opacos associados.

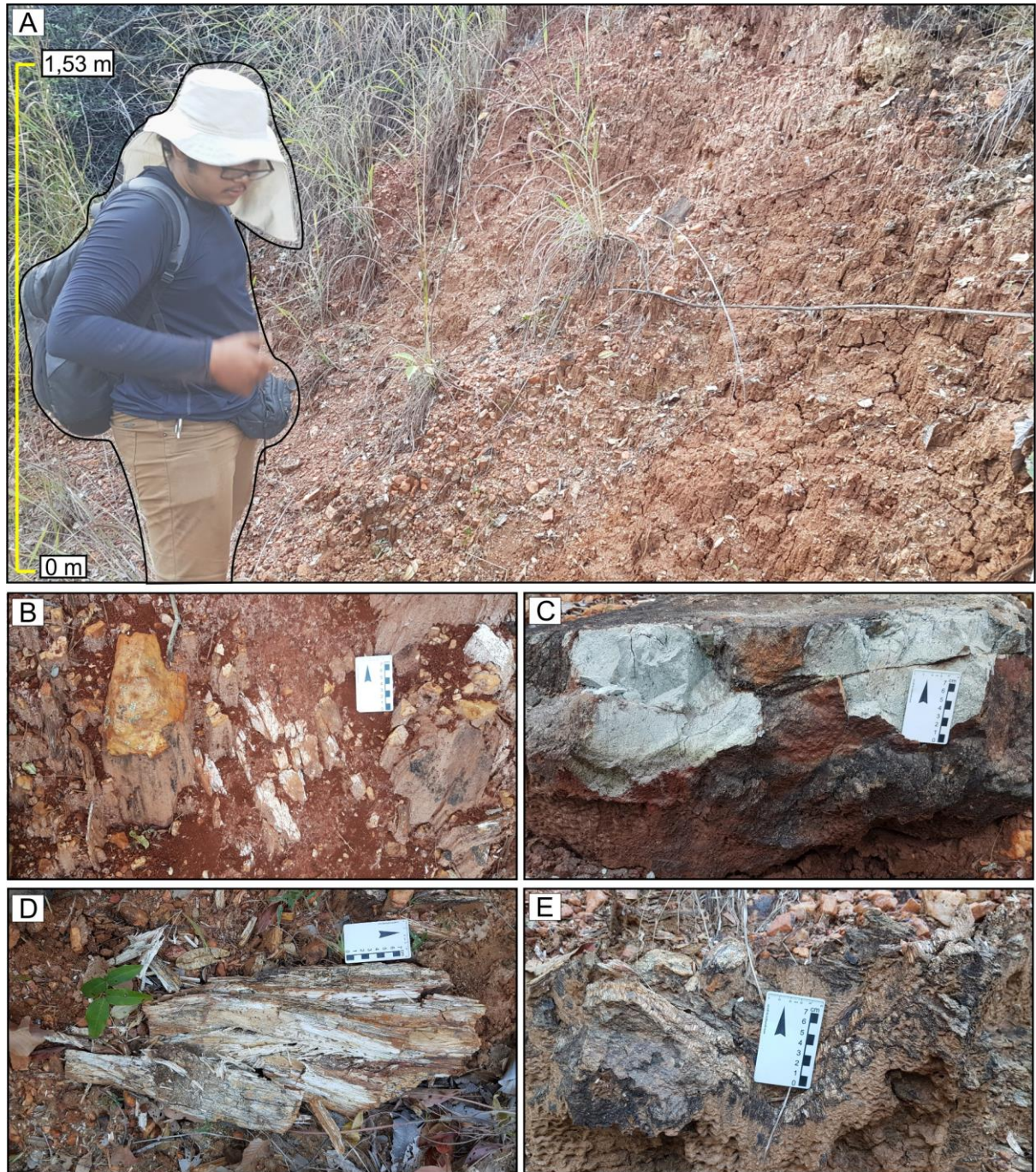


Figura 8 - Ocorrência de asbestos em garimpo desativado nas proximidades da cidade de Granjeiro. A) Escavação do garimpo recoberto pela vegetação, sob condições de intenso intemperismo, com a obliteração quase total do afloramento. B) Asbesto antofílitico sob boas condições de preservação e com o aspecto de recristalização em veios. C) As ocorrências de serpentinito associado aos asbestos fornecem informações da rocha encaixante de composição metaltramáfica ainda preservada. D) Lente de antofilita asbesto destacada de rochas metaltramáficas intensamente alteradas, com fibras que medem até 35 cm. E) Antofilita asbesto com o padrão de recristalização em vênulas, com o crescimento perpendicular à parede de fraturamento.

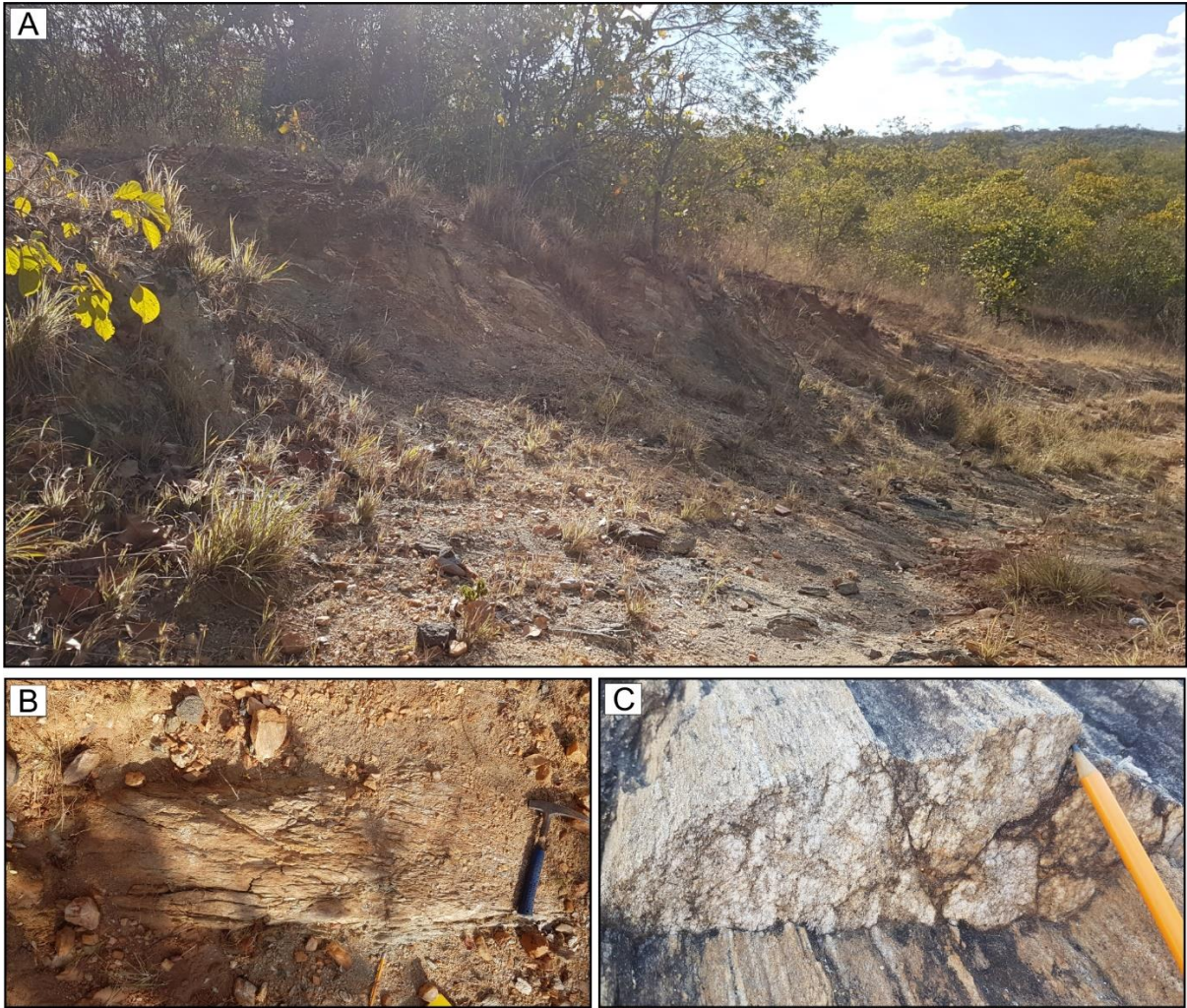


Figura 9 - Ocorrência de asbesto em garimpo desativado nas proximidades do distrito de Mangabeira. A) Escavação do garimpo recoberto pela vegetação, sob más condições de preservação. As rochas aflorantes em processo de intemperismo ressaltam o contato marcado pela forma acamadada. B) Asbesto talcificado sob boas condições de preservação e com o aspecto de recristalização em camada, concordante com a orientação de cisalhamento, em NE-SW. C) A poucos metros do asbesto afloram gnaisses miloníticos que podem estar relacionados com o processo de asbestificação.

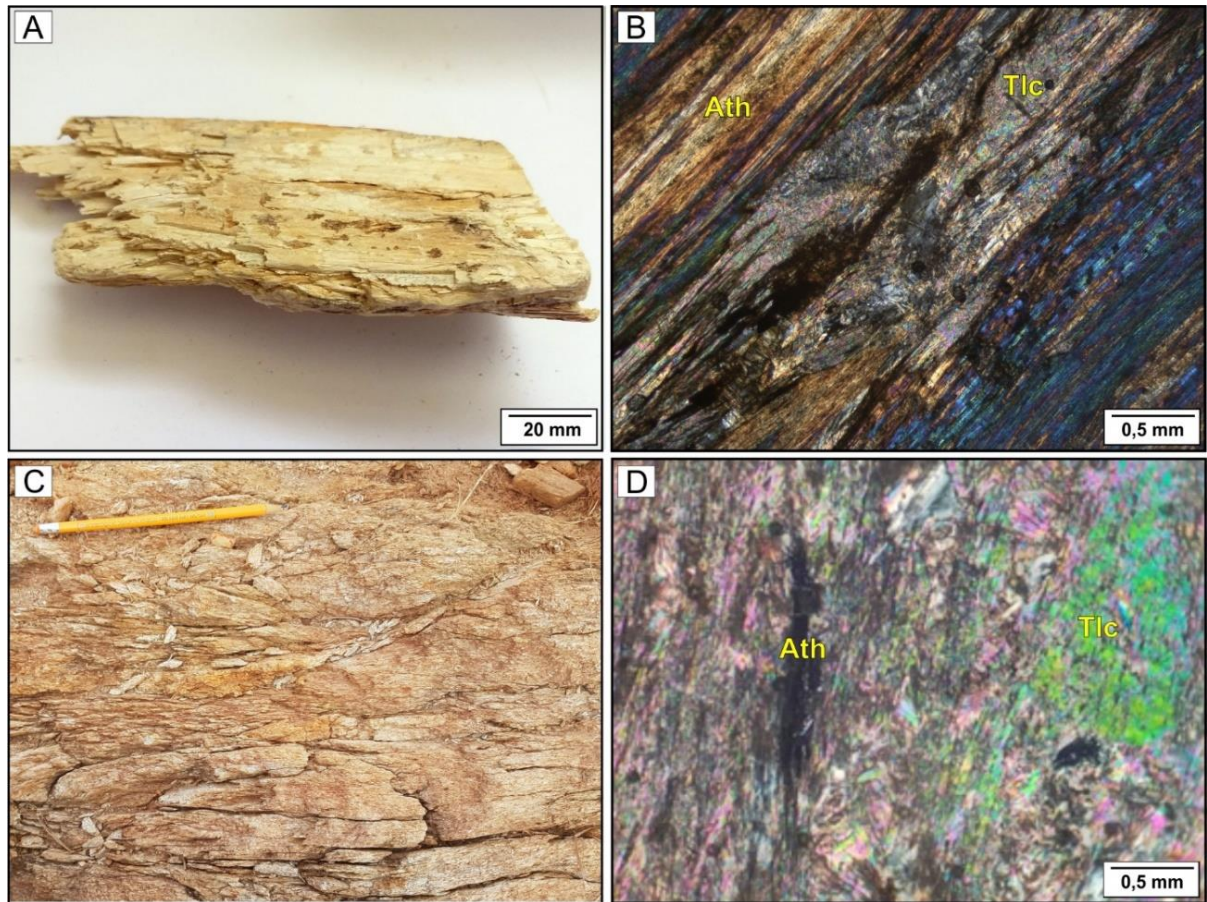


Figura 10 - A) Amostra de mão ZCP-01 com o aspecto asbestiforme, composto por massas fibrosas de antofilita, de coloração ocre devido a atuação do intemperismo. B) Aspecto microscópico da textura fibroblástica ou asbestiforme, constituída por fibras de antofilita (Ath) orientadas paralelamente entre si em associação com talco (Tlc). C) Aspecto asbestiforme *in situ* aflorante em garimpo de onde coletou-se a amostra ZCP-02, composta por cristaloblastos de talco fibrocirculares predominantemente, a lamelar. D) Cristaloblasto prismático de antofilita (Ath) imerso em uma matriz talcificada.

#### 4.1.2 Amostras de rochas metapelíticas

##### 4.1.2.1 Granada-albita gnaiss

Os limites dimensionais deste litotipo aflorante consistem em camadas, orientadas em NE-SW e mergulho subvertical. Está associado a uma sequência de rochas paraderivadas e ortoderivadas, incluindo o litotipo tremolita xisto (amostra PVA18-33) e rochas anfibolíticas.

Este litotipo (amostra PVA18-35) apresenta bandas de granulação média (1-5 mm), de cor branca com porções cinza esverdeada (Figura 11A), composto por bandas constituídas de plagioclásios ( $\pm 46\%$ ), quartzo ( $\pm 39\%$ ), albita ( $\pm 5\%$ ) e microclínio ( $\pm 2\%$ ), alternadas com bandas com maiores proporções de muscovita ( $\pm 6\%$ ), granada ( $\pm 1\%$ ) e concentrações acessórias ( $\pm 1\%$ ) de biotita, epídoto e xenotímio, monazita e columbita. Exibe as texturas heteroblástica e lepidoblástica predominantemente, e mais localmente simplectítica e porfiroblástica (Figura 11B).

O plagioclásio, de composição andesina, constitui o mineral mais abundante na rocha. Ocorre como cristaloblastos de tamanhos entre 0,5 mm e 4 mm, subdioblásticos, de hábito prismático, apresentando os maclamentos albita e albita-periclina, além de maclas de deformação e, localmente, extinção ondulante e feições de recristalização em subgrãos. Possui alteração para argilominerais.

O quartzo é o segundo mineral mais abundante e ocorre com cristaloblastos de 0,5 mm a 3 mm, xenoblásticos, de hábito granular. Inclui feições deformacionais como as bordas serrilhadas, a extinção ondulante, recristalização em subgrãos, com agregados em formas de fita (*ribbon* quartzo) e deformação lamelar.

A albita apresenta cristaloblastos de tamanhos entre 1 mm e 6 mm, subdioblásticos a idioblásticos, de hábito prismático. Este feldspato pode apresentar maclas carlsbad, intercrescimento antipertítico, e alteração para muscovita (Figura 11C).

A muscovita ocorre como cristaloblastos de 1 mm a 2 mm, na matriz, e até 8 mm em porfiroblastos, com faces subdioblásticos a idioblásticos, de hábito lamelar a fibroacircular (Figura 11D). Os cristaloblastos podem exibir as bordas corroídas e intercrescimento simplectito com o quartzo e feldspato (Figura 11B). Muitos cristaloblastos de muscovita de hábito fibroacircular constituem pseudomorfos de fibrolita, ocorrendo em agregados de cristaloblastos, associados a albita, quartzo e epídoto.

Os minerais acessórios consistem na granada, que inclui cristaloblastos de 1 mm a 2 mm, idioblásticos a subdioblásticos, de hábito prismático, bordas corroídas, com raras ou ausentes feições de sombra de recristalização. Apresenta borda de reação com raros cristaloblastos de biotita, indicando que ela formou-se a partir da reação de quebra dessa mica, e possui borda coronítica de muscovita (Figura 11E e F).

O microclínio exibe cristaloblastos de tamanhos entre de 1 mm e 2 mm, xenoblásticos, de hábito granular, com o maclamento xadrez, e por vezes, substituindo a albita. Outras concentrações acessórias incluem o epídoto, a monazita, o xenotímio e a columbita, com cristaloblastos menores que 1 mm, xenoblásticos, de hábito granular. Raros cristaloblastos de biotita são observados, o que reforça a quebra total deste mineral durante as reações metamórficas.

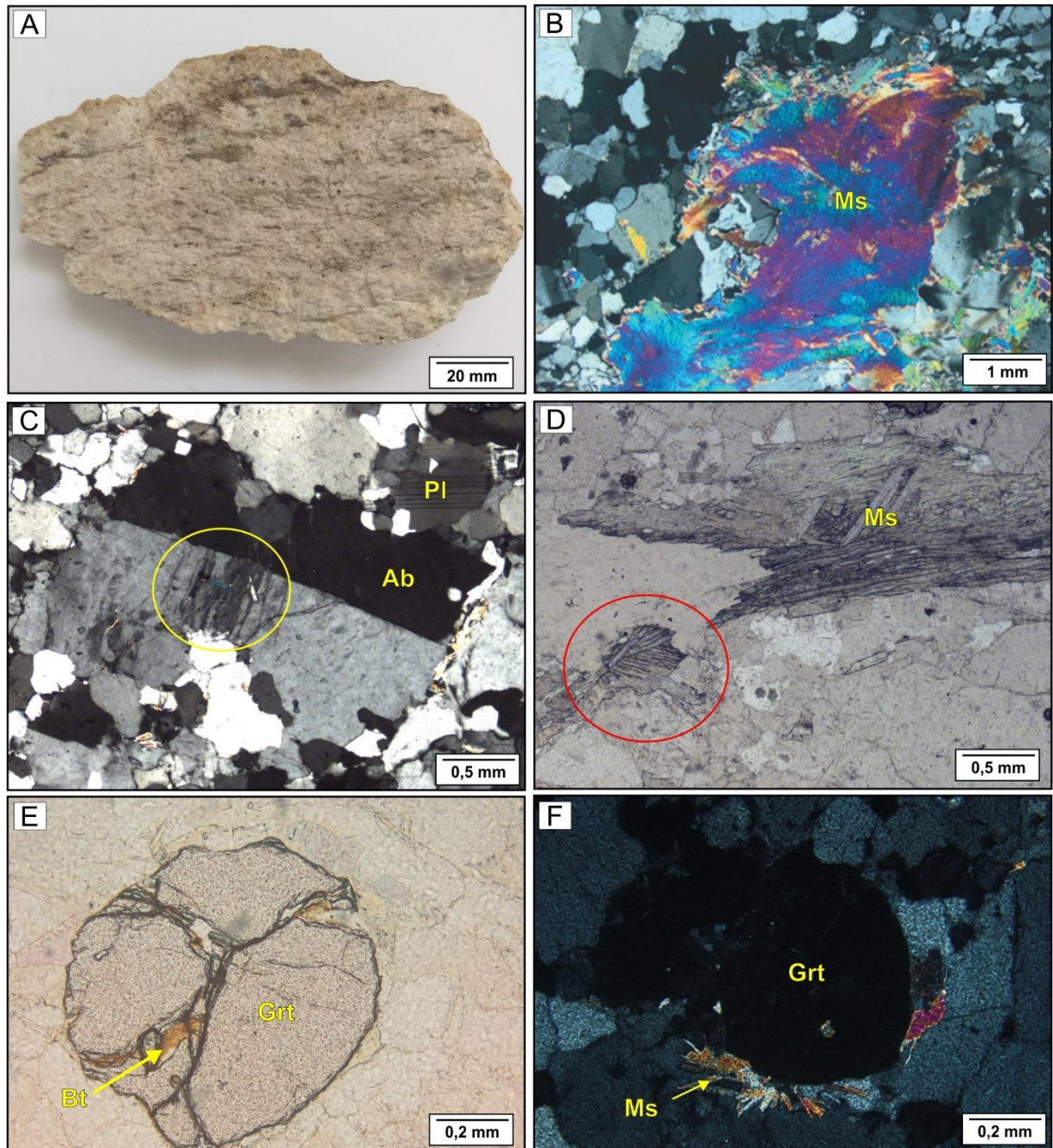


Figura 11 - A) Amostra de mão PVA18-35, caracterizada pelos bandamentos de granulação média, com bandas quartzofeldspáticas alternadas com bandas compostas por granada (Grt) e muscovita (Ms). A rocha exibe a coloração branca ressaltada pela presença da albita (Ab). B) Aspecto geral das texturas heteroblástica e porfiroblástica, com porfiroblastos de muscovita, de hábito lamelar, com bordas corroídas e intrecrescidas com quartzo e feldspato. C) Albita com o maclamento carlsbad e o intercrescimento antipertítico (círculo amarelo), onde observa-se cristaloblastos de muscovita desenvolvidos na fase potássica. D) Cristaloblastos fibroacirculares a fibroradiais (círculo vermelho) de muscovita pseudomórfica de fibrolita. E) Granada com bordas corroídas e cristaloblastos residuais de biotita (Bt) inclusa e F) Cristaloblasto de granada com borda coronítica de muscovita.

#### 4.1.2.2 Sillimanita-andaluzita-cordierita-biotita gnaiss

Os limites dimensionais deste litotipo aflorante consistem em camadas, orientadas em NE-SW e mergulho subvertical, associadas a sequência paraderivada e ortoderivada do Complexo Granjeiro, estando a poucos quilômetros do granada-albita gnaiss (amostra

PVA18-35). Este litotipo (amostra PVA18-57) apresenta a granulação média (1-5 mm), de cor cinza escura (Figura 12A), composto por bandas constituídas de biotita ( $\pm 14\%$ ), muscovita ( $\pm 6\%$ ) e clorita ( $\pm 5\%$ ) alternadas com bandas constituídas por cordierita ( $\pm 7\%$ ), andaluzita ( $\pm 2\%$ ), onde clorita e muscovita podem ocorrer subordinadamente ( $\pm 2\%$ ). O quartzo predomina em toda a rocha e ocupa cerca de ( $\pm 65\%$ ) e as concentrações acessórias ( $\pm 1\%$ ) consistem em sillimanita fibrolita, minerais do grupo do epídoto, zircão, xenotímio, monazita e rutilo. Exibe as texturas lepinematoblástica predominantemente, poiquiloblástica e porfiroblástica subordinadamente.

O quartzo, mineral mais abundante, ocorre com cristaloblastos de 1 mm a 4 mm, xenoblásticos, de hábito granular. Inclui feições deformacionais como a extinção ondulante, a deformação lamelar e a recristalização em subgrãos.

A biotita, de cor marrom, apresenta cristaloblastos de 2 mm até 5 mm, subdioblásticos a idioblásticos, de hábito lamelar. Assim como as demais micas, a biotita possui borda de corrosão, além de inclusões de andalusita, cordierita, muscovita, epídoto e zircão. Pode apresentar-se bordejada por fibrolita (Figura 12B) e com crescimento sobre clorita.

A muscovita ocorre como cristaloblastos em torno de 2-3 mm, subdioblásticos a idioblásticos, de hábito lamelar a fibroso (Figura 12C e F). Muitos cristaloblastos de muscovita, como das micas em modo geral, apresentam as bordas corroídas, e agregados de hábito fibroso são considerados produtos da substituição pseudomórfica de fibrolita (Figura 12F).

A clorita ocorre como cristaloblastos de 2 mm a 4 mm, subdioblásticos, de hábito lamelar, podendo apresentar inclusões de rutilo e com crescimento sobre muscovita (Figura 12C). Comumente encontra-se associada a andalusita e a cordierita (Figura Figura 12C e D).

A cordierita exibe cristaloblastos em torno de 2 a 5 mm, na matriz, e de 5 até 7 mm nos porfiroblastos (Figura 12E), cujos cristaloblastos são idioblásticos a subdioblásticos, de hábito prismático, rotacionados, com o maclamento polissintético. Assim como andalusita, pode ocorrer de maneira inclusa nos minerais micáceos, que bordejam e também preenchem os espaços abertos da cordierita.

As concentrações acessórias consistem no epídoto, rutilo, xenotímio, monazita e zircão metamítico, com cristaloblastos menores de que 1 mm, xenoblásticos a subdioblásticos, de hábito granular a prismático.

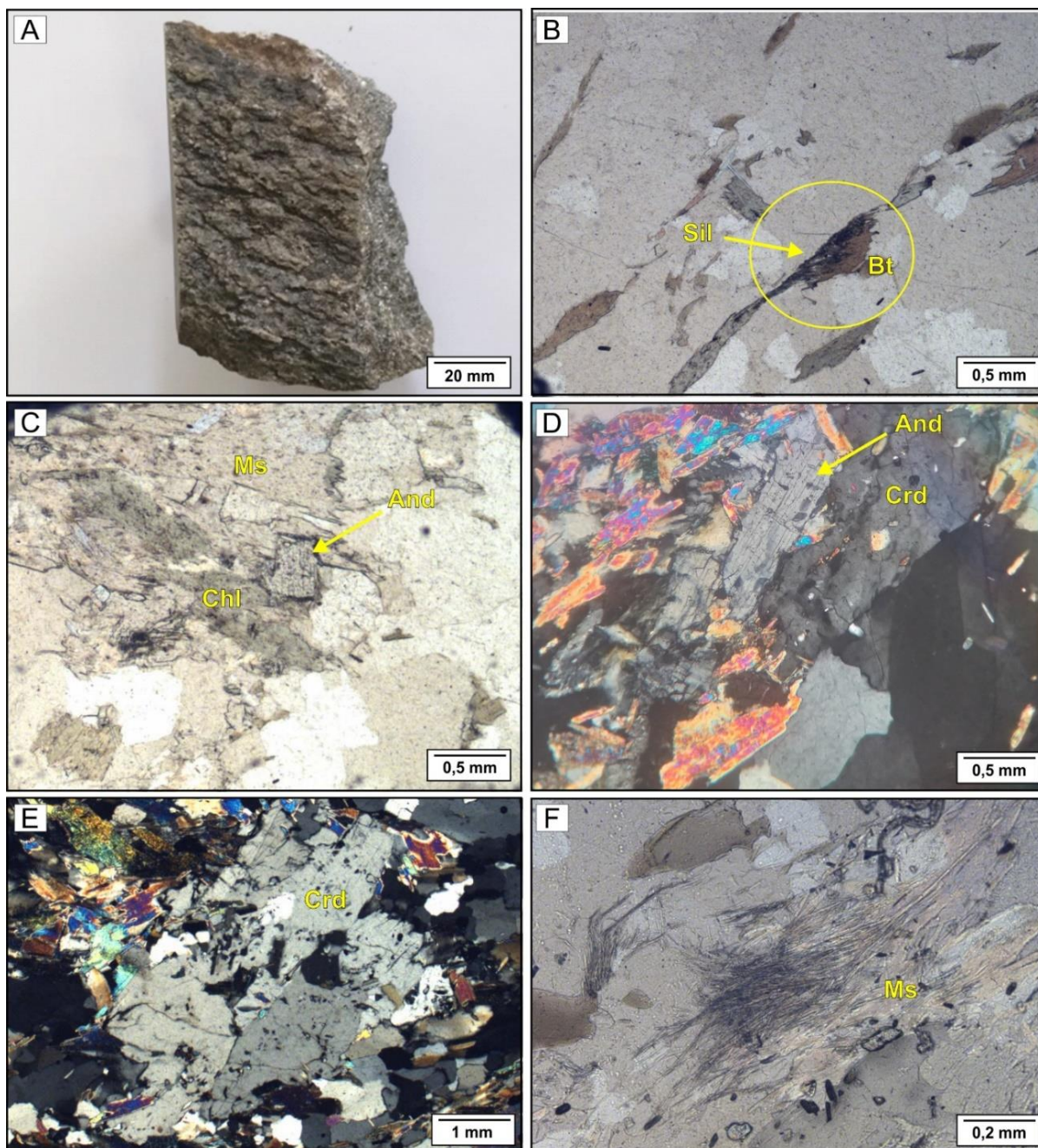


Figura 12 - A) Amostra de mão PVA18-57, caracterizada pelos bandamentos de granulação média, com bandas compostas por minerais micáceos (Biotita – Bt, muscovita – Ms e clorita - Chl) alternadas com bandas compostas por cordierita (Cdr) e andaluzita (And), predominantemente. B) Cristaloblastos de biotitas orientados, com destaque para o círculo amarelo onde sillimanita (Sil) fibrolítica bordeja a mica. C) Crescimento de clorita sobre muscovita e com inclusões de seções quadradas de andaluzita. D) Seções retangulares de andaluzita associada a cordierita, clorita e muscovita. E) Porfiroblasto de cordierita rotacionado e contornado pela foliação micácea. F) Agregados de muscovita pseudomórfica de fibrolita.

### 4.1.3 Amostra de rocha cálcio-silicática

#### 4.1.3.1 Granada-diopsídio-escapolita gnaiss

Os limites dimensionais deste litotipo aflorante consistem em camadas, orientadas em NE-SW e mergulho subvertical. Este litotipo (amostra PVA18-56) apresenta a granulação grossa (até 8mm), de cor cinza esverdeada com porções brancas (Figura 13A), composto por

bandas constituídas de quartzo ( $\pm 69\%$ ), microclínio ( $\pm 9\%$ ), plagioclásio ( $\pm 4\%$ ) e subordinadamente epídoto ( $\pm 4\%$ ), alternadas com bandas constituídas de escapolita ( $\pm 8\%$ ), diopsídio ( $\pm 3\%$ ), granada ( $\pm 1\%$ ) e concentrações acessórias ( $<1\%$ ) de titanita, minerais do grupo do epídoto, zircão, apatita e minerais opacos. Exibe a textura heteronematoblástica, predominantemente, simplectítica e borda de reação, subordinadamente (Figura 13B, C, D e F).

O quartzo ocorre como o mineral mais abundante na rocha, com cristaloblastos de 0,5 mm até 5 mm, xenoblásticos, de hábito granular. Apresenta extinção ondulante, com desenvolvimento de lamelas de deformação e bordas sinuosas.

A escapolita ocorre como cristaloblastos incolores de 0,5 mm a 8 mm, subdioblásticos a idioblásticos, de hábito prismático e birrefringência moderada. Apresenta-se alterada para argilominerais e muscovita e, muito frequentemente, estão coroadas por plagioclásios (Figura 13C).

O microclínio ocorre como cristaloblastos de 2 mm até 8 mm, subdioblásticos, de hábito prismático. Apresenta maclamentos xadrez, extinção levemente ondulante e está muito alterado para argilominerais. Exibe intercrescimentos com quartzo e plagioclásio ou com o epídoto (Figura 13C e D).

O diopsídio inclui cristaloblastos de 1 mm a 3 mm, subdioblásticos a idioblásticos, de hábito prismático, de cor verde pálido, levemente pleocróico e, de modo geral associado com granada, escapolita e epídoto (Figura 13E).

A granada, de cor marrom, apresenta cristaloblastos de 1 mm até 2 mm, subdioblásticos a xenoblásticos, de hábito prismático, predominantemente. Apresenta-se geralmente coroada por epídoto, o qual a substitui de modo pseudomórfico (Figura 13F).

Os minerais acessórios ou secundários incluem o plagioclásio, com faces xenoblásticas, de hábito granular, com intercrescimento mimerquítico e coroados grãos de escapolita. Minerais do grupo do epídoto que variam de cristaloblastos xenoblásticos, subdioblásticos a idioblásticos, de hábito granular, a prismático, geralmente compoem as texturas de substituição. A titanita, o zircão e a apatita, exibem cristaloblastos menores do que 1 mm, subdioblásticos, de hábito prismático.

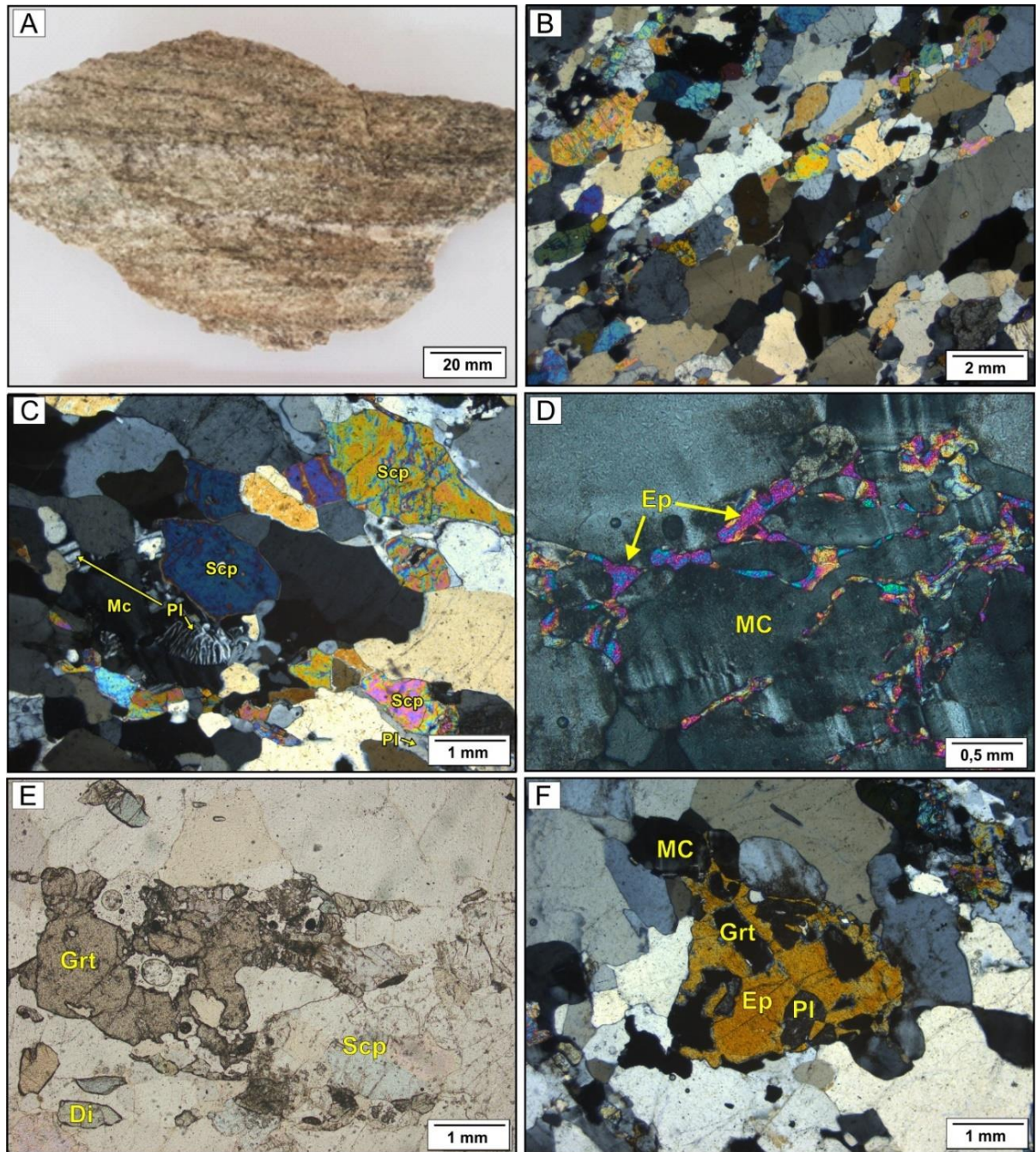


Figura 13 - A) Amostra de mão PVA18-56, caracterizada pelos bandamentos de granulação grossa, com bandas compostas por minerais cálcio-silicáticos alternadas com bandas quartzofeldspáticas. B) Aspecto geral da textura heteronematoblástica, predominante na rocha. C) Cristaloblastos de escapolita coroados por plagioclásio, que ocasionalmente migra para as porções leucocráticas e reagem com o microclínio, gerando os intercrescimentos mimerquíticos. D) Intercrescimento simplectítico entre microclínio e epidoto vermicular. E) Bandamento metamórfico composto pela orientação de granada, diopsídio e escapolita. Esta última encontra-se argilizada. F) Substituição pseudomórfica de epidoto em granada, o qual se desenvolve incluindo a granada e o plagioclásio. Notar o intercrescimento simplectítico com o microclínio, evidenciando a epidotização da rocha.

#### 4.2 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA - MEV

As análises de MEV-EDS abordam o conhecimento mais específico sobre as variações composicionais, bem como as análises semiquantitativas dos elementos que compõem a estrutura cristalina dos minerais. Os pesos moleculares obtidos pelas microanálises estão

expressos em porcentagem (%) e ilustrados pontualmente pela simbologia “+” nas figuras de complementação analítica (Figuras 14 a 17) que sucedem as microanálises.

Neste item, optou-se por analisar alguns dos minerais que possuem um ou mais membros mineralógicos em solução sólida em virtude de que esses membros possam fornecer informações do comportamento geoquímico destes minerais durante as reações metamórficas, são eles:

**Tremolita:** Corresponde a uma solução sólida dentro da série tremolita-ferroactinolita. Na amostra PVA18-33 as microanálises revelam a composição enriquecida em tremolita composta pelos teores de Mg (15,4-16,9%), Ca (9,0-9,8%) e Fe (3,8-4,1%). É comum que este mineral apresente enriquecimento em Fe (11,9-12,3%) em direção às bordas acompanhado pelas perdas de Ca (0-0,5%) e subordinadamente de Mg (14,5-14,8%). O enriquecimento em Fe ocorre durante o processo de lixiviação e substituição dos conteúdos de Ca e Mg presentes na composição química do mineral, os quais em parte foram reequilibrados pelas reações que formam talco, Mg-clorita e apatita secundários.

**Antofilita:** De acordo com Deer *et al.* (1966) a grande maioria das antofilitas são ricas em magnésio e a substituição do Fe pelo Mg é restrita neste membro, sendo maior, bem como a presença do alumínio, quanto maior for o teor de gedrita em solução sólida. As microanálises revelam que a antofilita das amostras ZCP-05 e ZCP-01 apresentam semelhanças composicionais, pois ambas consistem em uma variedade pobre em alumínio, enriquecidas em Mg e com teores subordinados de Fe. As microanálises constam teores de Mg (16,3-19,5%), Fe (10,4-11,2%) e Al (0-0,4%) para a antofilita da amostra ZCP-05 e de Mg (20,1-22,0%), Fe (5,0-6,1%) e Al (0-0,2%) para a antofilita da amostra ZCP-01. Neste caso a principal diferença entre elas consiste no hábito cristalino.

**Granada:** Na amostra metapelítica PVA18-35 a granada é do tipo almandina, de composição enriquecida em Fe (19-27%), embora apresente componentes de piropo (Mg: 0,6-1,0%) e esperssatita (Mn: 5,2-8,5%) em solução sólida. As análises do núcleo e das bordas demonstram que o teor de almandina diminui em direção às bordas, conferindo a transferência de Fe em grãos coroados por muscovita (Fe: 2,6-2,8%). Na amostra PVA18-56 a granada se trata do tipo grossulária, enriquecida em Ca (24,5-26%), e componentes subordinados de almandina (Fe: 10,2-10,5%). Nota-se um empobrecimento de Ca e principalmente de Fe em direção às bordas, indicativo de que a transferência desses elementos tem participação nas reações de formação das coroas de epidoto.

**Feldspato:** Na amostra PVA18-35 a albita (Na: 8,0-8,4%) apresenta um baixo teor de anortita (Ca: 0,6-0,8%) e nenhum teor de ortoclásio (K: 0-0,2%) na sua estrutura. Neste caso, o

componente potássico da albita está concentrado nos intercrescimentos antipertícticos ou então transferido para a outra fase potássica secundária, a muscovita (K: 9,9-10,2%). Na amostra PVA18-56 o plagioclásio apresenta a composição labradorítica ( $An_{50-55}$ , onde Ca: 5,5-6,1% e Na: 5,1-5,3%) e geralmente bordejam grãos de escapolita meionítica (Ca: 13,5-14,1% e Na: 2,6-2,8%) sugerindo a concentração do Na e a liberação do Ca nas reações de epidotização da rocha.

A composição petrográfica e química realizada por MEV-EDS identificou padrões texturais e composicionais que contribuem com os resultados das análises petrográficas convencionais. A obtenção de dados químicos auxilia na interpretação das reações ocorridas nos estágios do metamorfismo progressivo e regressivo, concluindo que a mobilidade dos elementos estabilizados nos minerais formados no primeiro momento do metamorfismo, subsidia a neoblastese dos minerais secundários, que substituem ou preenchem fraturas nas rochas. Até então, foram certificados os reequilíbrios de Mg-clorita, talco e apatita nos litotipos metaultramáficos, de muscovita nos litotipos metapelíticos, além de epidoto e labradorita no litotipo cálcio-silicático.

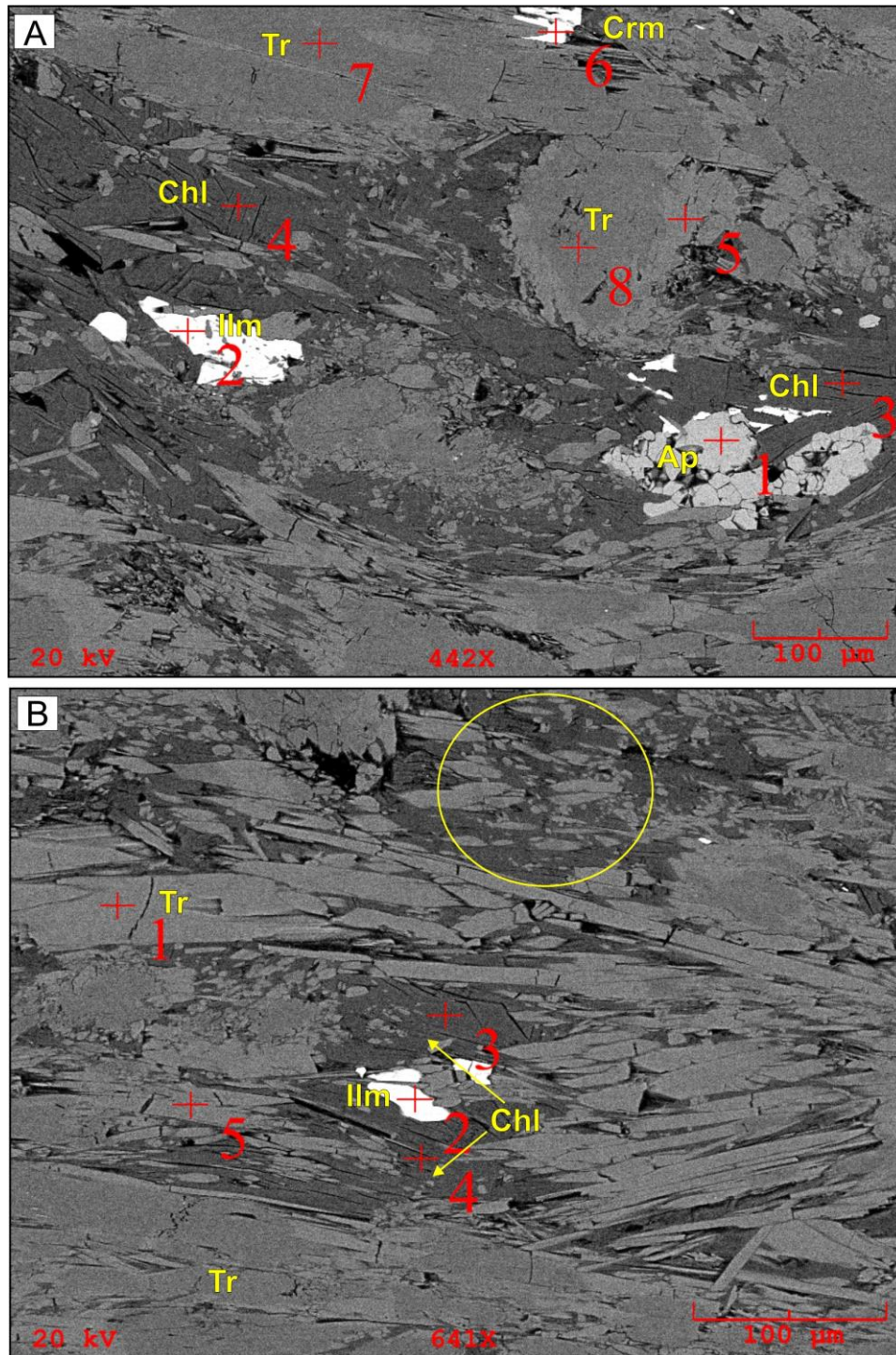


Figura 14 - Imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura, com análises químicas pontuais por EDS em destaque pelo símbolo "+", enumerado em vermelho. A) Análise em tremolita (Tr) da amostra PVA18-33, de composição química enriquecida Mg e Fe subordinado. As análises do núcleo e borda (exemplos +8 e +5) demonstram enriquecimentos em Fe acompanhados pelas perdas de Ca e Mg em direção às bordas. Alguns cristaloblastos de tremolita estão bordejados por minerais de composição Fe-cromita (Crm). São observados microveios, com aspectos brechiformes, preenchidos por Mg-clorita (Chl), ilmenita (Ilm) e apatita (Ap). B) Tremolita associada com ilmenita e Mg-clorita intersticiais. Nas microfaturas Mg-clorita inclui fragmentos de tremolita (Círculo amarelo).

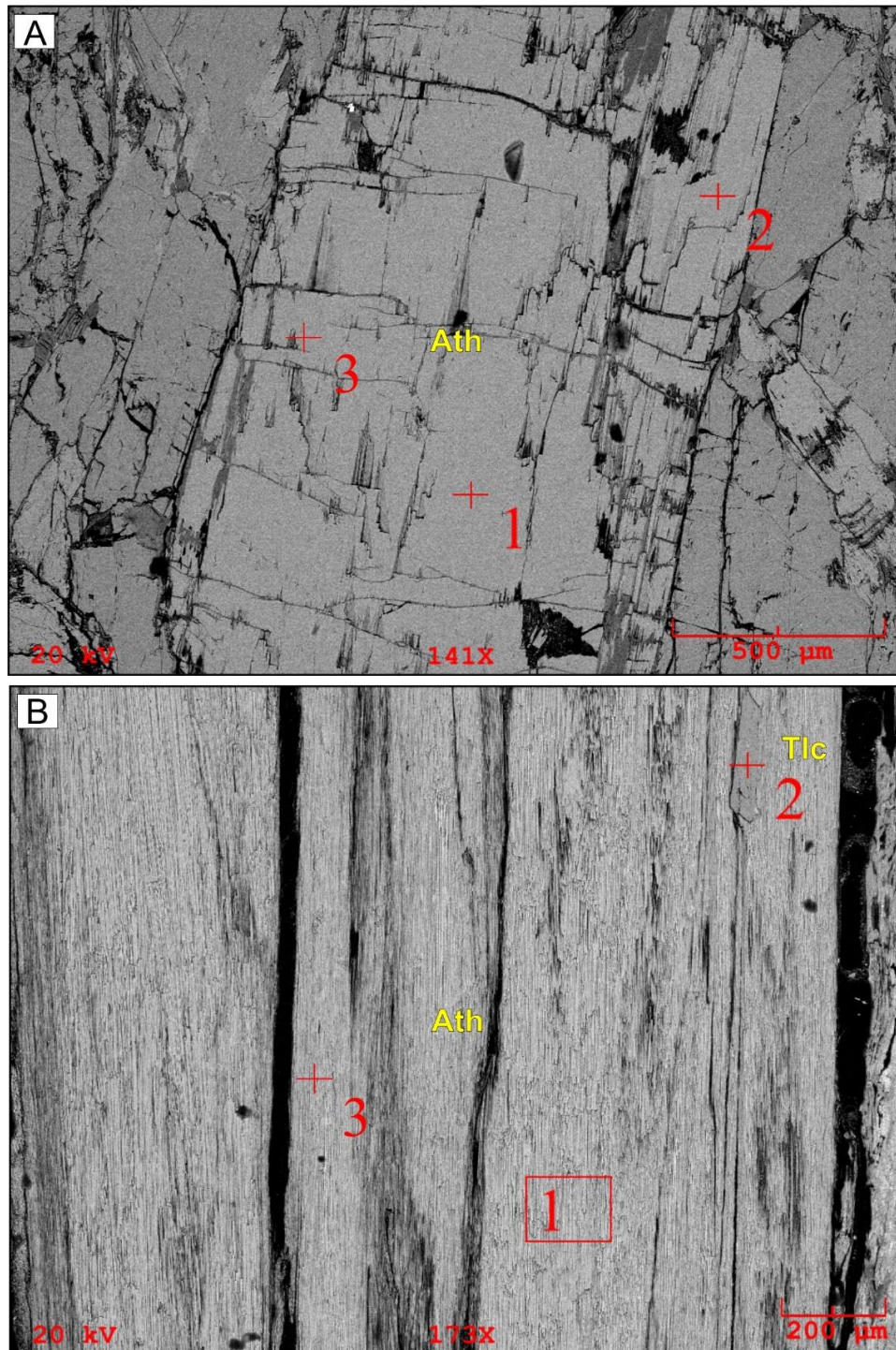


Figura 15 - Imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura, com análises químicas pontuais por EDS em destaque pelo símbolo “+”, enumerado em vermelho. A) Análise em antofilita (Ath) da amostra ZCP-05, de hábito prismático, obtendo que se trata de uma variedade pobre em Al e Fe. B) Análise em antofilita (Ath) da amostra ZCP-01, de hábito de asbesto, associada ao talco (Tlc). Consta-se a composição química semelhante das variedades asbestiforme e não-asbestiforme, o que reforça um rearranjo no hábito cristalino durante o processo de asbestificação sem grandes mudanças na composição química.

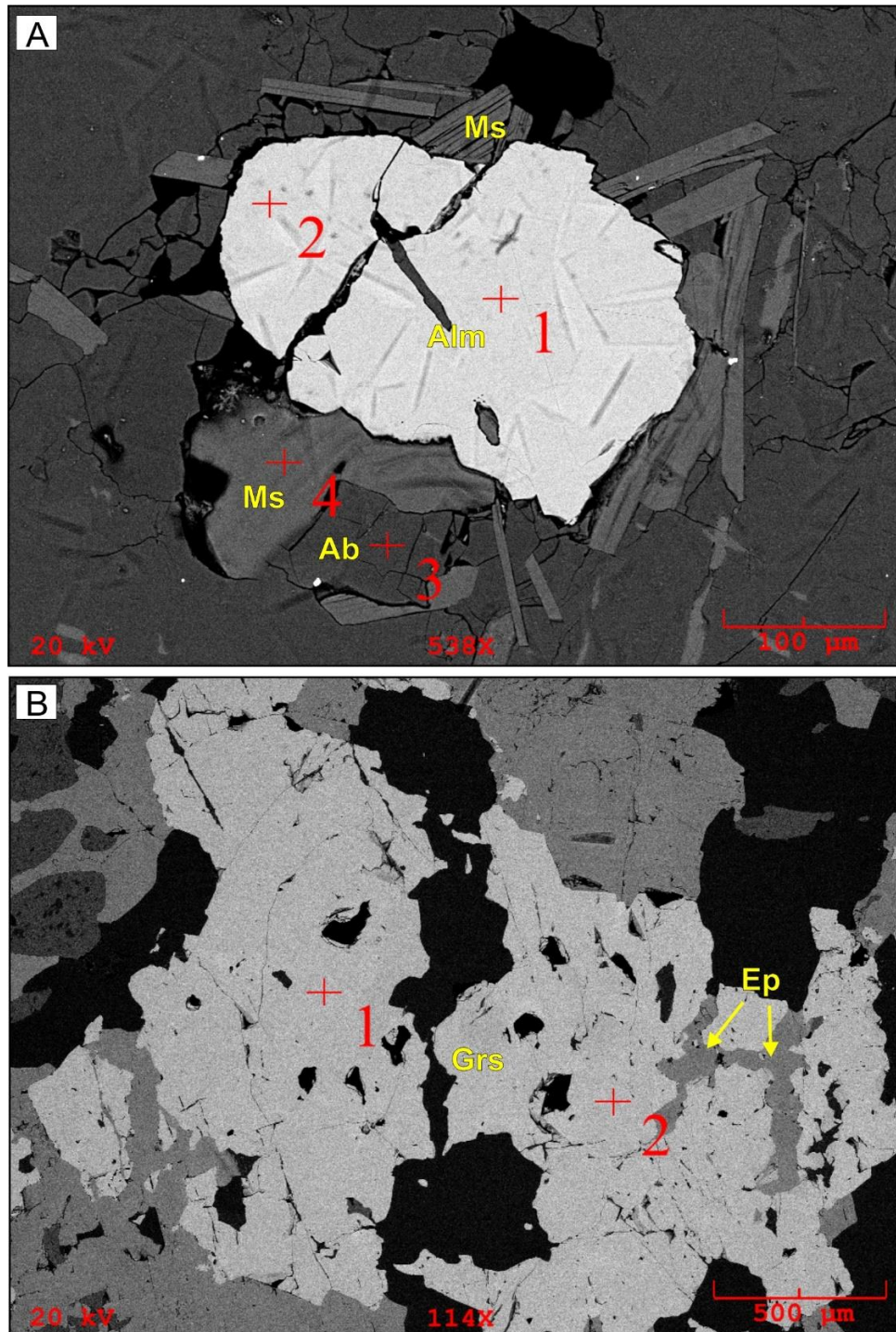


Figura 16 - Imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura, com análises químicas pontuais por EDS em destaque pelo símbolo “+”, enumerado em vermelho. A) Análises do núcleo e borda em granada da amostra PVA18-35 onde há o predomínio da composição de almandina (Alm), com perda de Fe em direção às bordas, possivelmente transferido para coroas de muscovita (Ms). B) Análises do núcleo e borda em granada da amostra PVA18-56, onde há o predomínio da composição de grossulária (Grs), com perda de Ca e Fe em direção às bordas, onde se desenvolve epidoto (Ep).

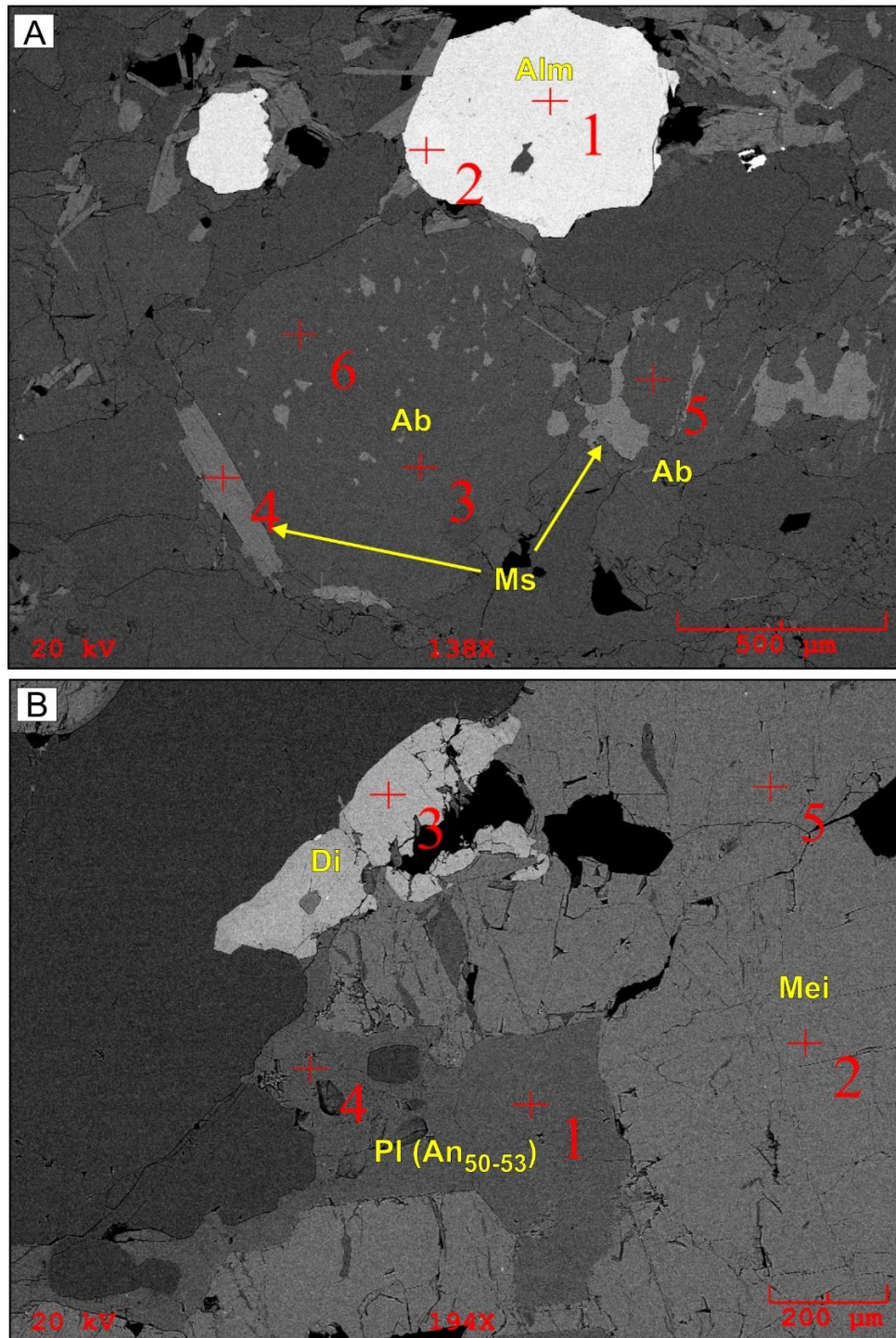


Figura 17 - Imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura, com análises químicas pontuais por EDS em destaque pelo símbolo “+”, enumerado em vermelho. A) Análises em albita (Ab) da amostra PVA18-35 associado com granada almandina (Alm) e muscovita (Ms). As lamelas de muscovita presentes em albita indicam a possível reação de reestabilização das fases sódicas e potássicas, relacionada com a albitização do feldspato. B) Análises em plagioclásio (Pl) labradorítico ( $An_{50-53}$ ) que formam coroas em escapolita meionítica (Mei) da amostra PVA18-56.

### 4.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS X - DRX

Para avançar no conhecimento da rede cristalina dos minerais identificados na caracterização petrográfica convencional e por MEV-EDS (Seções 4.1 e 4.2) foram realizadas análises por Difração de Raios X, corroborando na identificação da associação mineralógica presentes nas amostras. Por este método, não foram detectados os minerais que ocorrem em quantidades acessórias nas amostras em função dos graus de cristalinidade abaixo do limite de detecção do aparelho. Desse modo, foram lidos somente os picos de cristalinidade característicos das fases mineralógicas mais abundantes, representados nos difratogramas a seguir (Figuras 18 a 21):

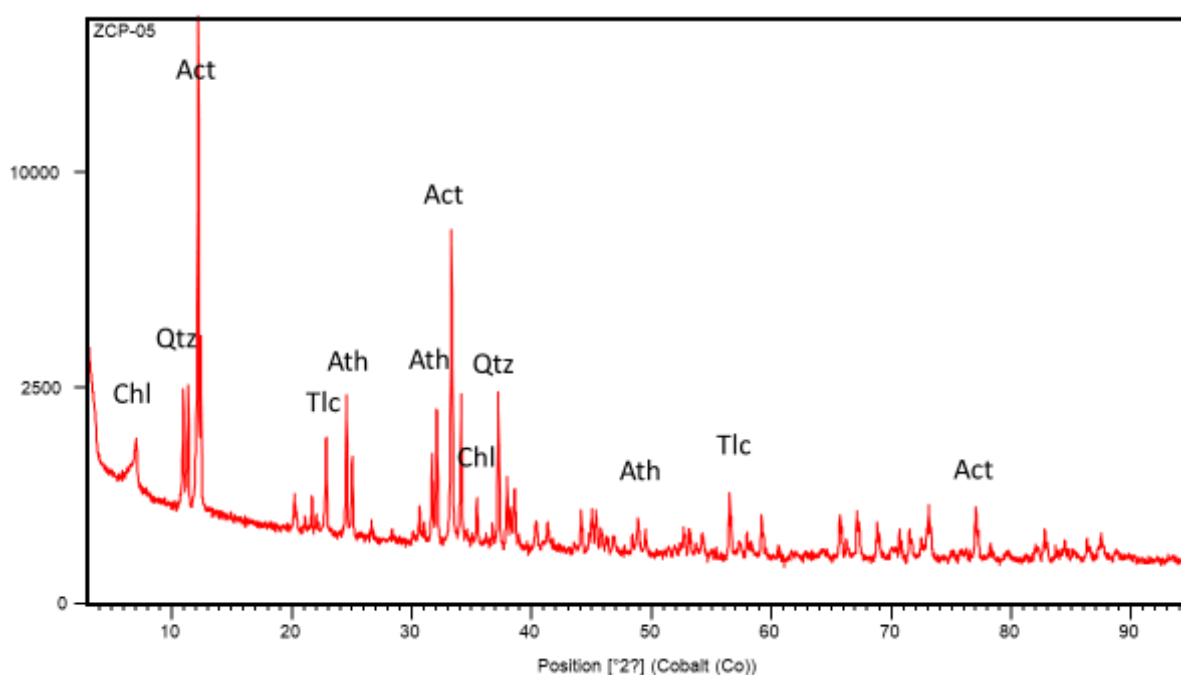


Figura 18 - Difratograma da Amostra ZCP-05, com picos de cristalinidade indicando a presença de antofilita (Ath), quartzo (Qtz), clorita (Chl), talco (Tlc) e actinolita (Act).

Compartilhado das informações petrográficas, a identificação de antofilita (Ath), actinolita (Act), talco (Tlc) e clorita ratifica a associação mineralógica de rochas metaultramáficas na Amostra ZCP-05. A identificação de actinolita ao invés de tremolita reside no aumento da substituição dos íons de Mg pelo Fe que possui tendência em gerar tremolitas impuras, dentro da série tremolita-ferroactinolita (Deer *et al.* 1966). A clorita identificada no âmbito petrográfico consiste no constituinte mineral acessório e de alteração, sendo a presença deste mineral indicativa de pressões mais elevadas (Bucher & Grapes 2011) ou de alteração por processos secundários. O quartzo por sua vez não foi identificado na caracterização petrográfica e possivelmente está associado a presença de microveios no

litotipo ou de contaminação do material durante a preparação da amostra para a realização da análise.

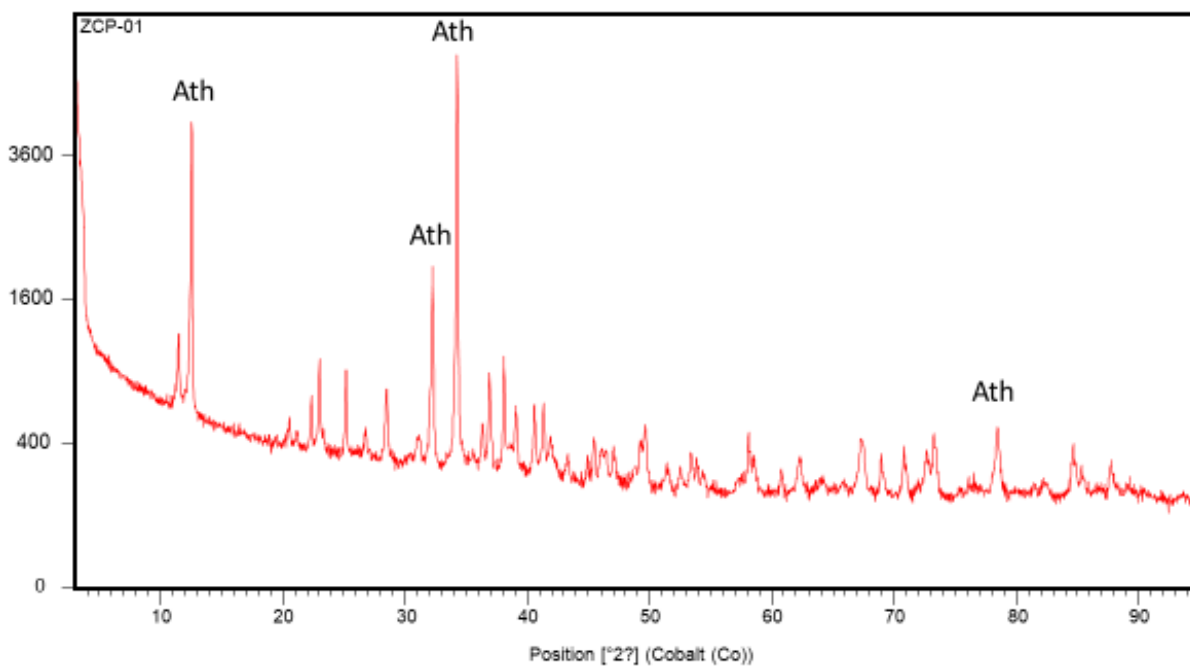


Figura 19 - Difratograma da amostra ZCP-01, cujos picos de cristalinidade indicam somente a presença de antofilita (Ath).

Na amostra ZCP-01 a leitura dos picos de cristalinidade é condizente com a estrutura da antofilita, ocupando quase que a totalidade da rede cristalina do litotipo. Neste caso, a ausência de picos do talco condiz ao limite de sensibilidade do equipamento em caracterizar fases mineralógicas acessórias.

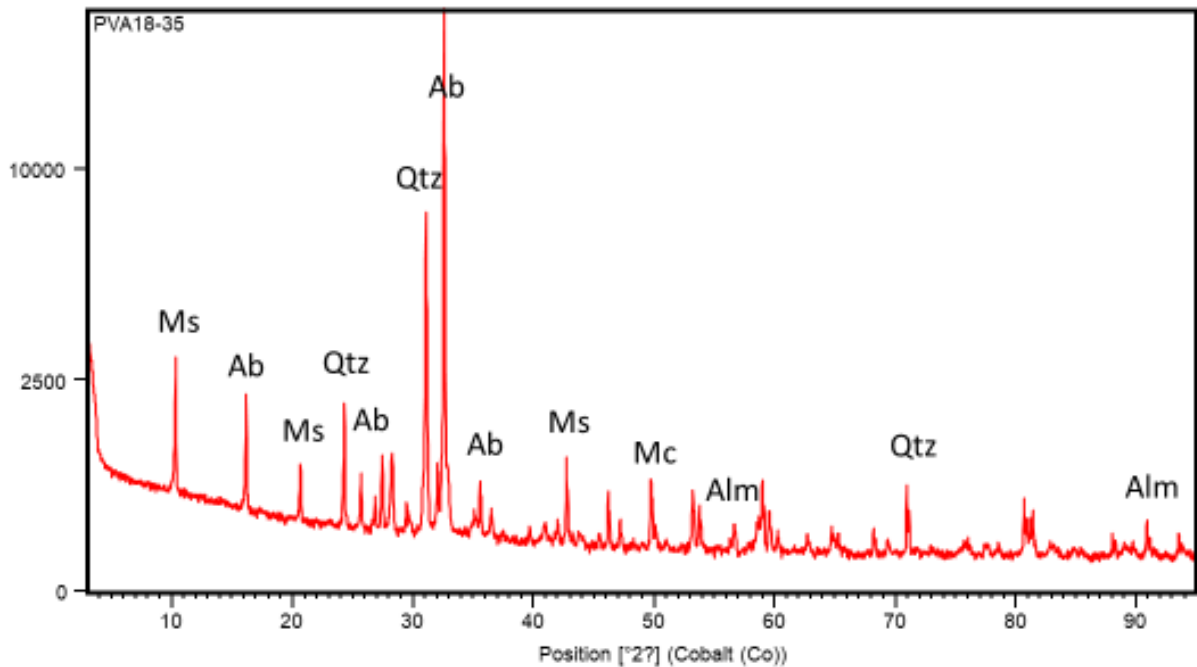


Figura 20 - Difratoograma da Amostra PVA18-35, com picos de cristalinidade indicando a presença da albita de alta temperatura (Ab), muscovita (Ms), quartzo (Qtz), microclínio (Mc) e granada (Grt).

Na amostra PVA18-35 a assembleia mineral com o maior grau de cristalinidade é composta por muscovita (Ms), granada (Grt), microclínio (Mc) e albita de alta temperatura (Ab) o que ressalta a associação aluminossilicática granadífera que é compatível com a associação de rochas metapelíticas. A leitura da estrutura da albita de alta temperatura, termo sódico da série albita de alta temperatura-sanidina, que possui a distribuição desordenada de Si e Al em relação as variedades de menor temperatura (Deer *et al.* 1966, Klein & Dutrow 2012, Vlach 2002), indica a natureza do metamorfismo de alta temperatura em condições especiais dos processos geológicos que geram a albitização do feldspato.

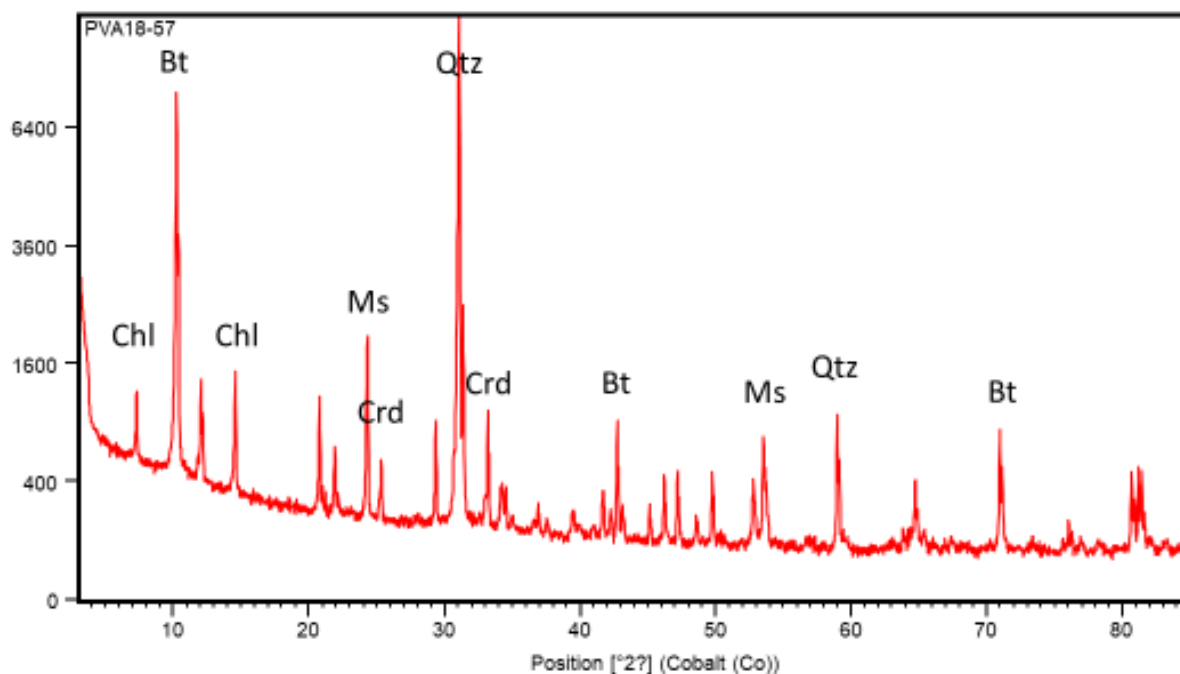


Figura 21 - Difratoograma da Amostra PVA18-57, com picos de cristalinidade indicando a presença de biotita (Bt), muscovita (Ms), clorita (Chl), cordierita (Crd) e quartzo (Qtz).

Na amostra PVA18-57 a assembleia aluminossilicática não granadífera pode ser diagnóstica de rochas metapelíticas de baixa pressão. Os picos indicando a presença de cordierita, associada a sillimanita e a andaluzita da caracterização petrográfica e que não foram identificadas nesta análise, indicam os atributos do metamorfismo de temperaturas elevadas. Em contraponto a abundância da cristalinidade dos minerais micáceos resultam em dados significantes para o metamorfismo, uma vez que relacionados a esta associação de alta temperatura são estáveis proporcionalmente a elevação da pressão de vapor d'água.

## 5 DISCUSSÕES

### 5.1 INTERPRETAÇÕES E ESTIMATIVAS DAS CONDIÇÕES DO METAMORFISMO PROGRESSIVO

Na amostra ZCP-01 a ocorrência de antofilita asbesto associada a serpentinitos ressalta a natureza do metamorfismo de temperatura e pressão elevadas em rochas de composição metaultramáfica. Os serpentinitos consistem em um ótimo indicador de fase fluida rica em água durante o metamorfismo (Winckler 1979). O campo de estabilidade dessas rochas no metamorfismo regional geralmente termina na fácies anfíbolito médio devido à quebra das serpentinas em temperaturas elevadas ao passo em que o surgimento da antofilita coincide com as condições da fácies anfíbolito alto (Bucher & Grapes 2011). O campo de preservação dos minerais do grupo das serpentinas nas mesmas condições termais de formação da antofilita, durante o metamorfismo regional, exige pressões elevadas que condicionam a

blastese de antofilita asbesto por meio da interação com fluidos hidrotermais metamórficos condensados.

O carácter concordante das amostras ZCP-02 e PVA18-33 reproduz que o processo de asbestificação ocorreu primeiramente *in situ* durante o metamorfismo dinâmico do cisalhamento, quando os grãos de antofilita ou tremolita foram cominuidos em finas fibras, fundamentado no modelo de Turner (1935), que posteriormente, por interação com fluidos hidrotermais, resultariam no hábito de asbesto. Por outro lado, o padrão de recristalização de antofilita asbesto em veios e vênulas da rocha encaixante possivelmente está ligado ao fraturamento tardio das rochas desenvolvido com a progressão da dinâmica da Zona de Cisalhamento Patos.

O processo de asbestificação ocorreu de maneira heterogênea nos diversos litotipos, regulado pela interação dos fluidos hidrotermais condensados durante o metamorfismo progressivo. Diferentemente do antofilita asbesto, o processo de asbestificação em tremolita de litotipos, que inclui a amostra PVA18-33, está modestamente identificado pelas terminações fibrosas presentes nas bordas desse anfibólio. Nesta situação os grãos prismáticos de tremolita foram cominuidos em finas fibras de tremolita, entretanto, sem a recristalização no hábito de asbesto. Se tomarmos como base a necessidade de um ambiente de estresse e de tensão unidirecional, submetidos a fluidos hidrotermais, fundamentado no modelo de Zoltai (1981), que em conjunto podem originar o hábito de asbesto, a ausência de tremolita asbestos neste litotipo reside da deficiência dos fluidos hidrotermais na interação com o mineral.

Na amostra PVA18-41 o litotipo constituído por talco, e minerais da série da tremolita, possui o aspecto asbestiforme, em estágio de talcificação avançada. A matriz composta por talco com o hábito fibroso é sugestiva de que as fibras de tremolita asbestos foram mascaradas pelo processo de substituição pseudomórfica.

Em termos petrogenéticos, a análise petrográfica desses minerais definem o alcance do metamorfismo progressivo em rochas metaultramáficas, dentro do campo de estabilidade da antofilita. A paragênese antofilita + talco  $\pm$  tremolita  $\pm$  clorita (amostras ZCP-01 e CG-05) indica que esses limites de temperatura e de pressão estão situados entre os pontos “6 e 7” da grade petrogenética de rochas metaultramáficas (Figura 3), onde a temperatura estimada está dentro da faixa de 700-750 °C e com pressões em torno de 700-800 MPa.

As amostras metapelíticas PVA18-57 e PVA18-35 também apresentam paragêneses características de temperaturas muito altas. Na primeira, classificada como paragnaisse não-granadífero (PVA18-57), a associação cordierita + sillimanita + andaluzita é característica de terrenos metamórficos de baixas pressões. A configuração do metamorfismo de alta

temperatura direcionado para uma ordem de maior pressão, entretanto, pode ser exemplificada pela presença das micas na assembleia que são formadas durante o aumento da pressão de fluidos aquosos e são recristalizadas gerando inclusões e preenchendo os espaços vazios de andaluzita e cordierita. Os graus de corrosão nas bordas desses minerais são indicativos de que o litotipo atingiu a fusão por anatexia, coincidente com a introdução da sillimanita, do tipo fibrolita, a partir da reação de quebra da biotita, corroborando com o alcance de pressão e temperatura (P-T) acima da curva Bt1 na grade petrogenética de metapelitos (Figura 4). Em função dos parâmetros petrográficos acredita-se que este litotipo foi estabilizado na faixa de temperatura que permeia 650-700 °C, submetido às condições de pressões em torno de  $\pm$  250-350 MPa.

Para a amostra PVA18-35 o arranjo cristalino da albita de alta temperatura identificado na análise de DRX (Figura 19) ressalta a possível condição de temperaturas acima de 800 °C (Klein & Dutrow 2012, Yund & Tullis 1983). Nestas condições de temperatura os membros da série albita de alta temperatura-sanidina são estáveis em estado homogêneo e, contudo, a sanidina só poderia ser preservada se houvesse na rocha um resfriamento rápido. A caracterização do intercrescimento antipertítico na albita permite inferir que durante um resfriamento lento nos feldspatos em estado homogêneo os íons de Na e K migraram para outras regiões. Na consideração de que a formação da sanidina se forma em temperaturas acima de 700 °C (Frank 2017) é provável que o processo de albitização do feldspato tenha ocorrido dentro do intervalo de temperatura 700-800 °C. Nesta amostra os resíduos de biotita inclusos em granadas fornecem evidências das condições anidras que legitimou a quebra das micas neste litotipo. A granada, definida como o mineral de blastese mais tardio, uma vez que demonstra irrelevantes ou ausentes feições rotacionais e sombras de recristalização, é formada em conformidade com as reações de quebra da biotita e a geração de um líquido anatético aluminoso que gera graus de corrosão nas bordas dos minerais. A reação de quebra da biotita para originar aluminiossilicatos (reação 7) define também as condições metamórficas acima da curva Bt1 (Figura 4), indicando temperaturas em torno de 700-750 °C, em uma ordem de pressão na faixa de 400-600 MPa.

Nas associações petrográficas são descritos gnaisses com diopsídio e escapolita, minerais que fazem parte da assembleia metamórfica de mais alto grau de rochas cálcio-silicáticas (Yardley 1989). Em alguns terrenos metamórficos esta assembleia constitui a paragênese da fácies granulito (Turner 1981) e a ocorrência deste litotipo reforça os atributos de pressão e temperatura (P-T) do metamorfismo regional.

Em contribuição às condições de pressão elevada a presença de escapolita durante o metamorfismo regional é controlada pela elevada pressão de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) na rocha, sendo formada pela reação (8) (Bucher & Grapes 2011, Deer *et al.* 1966):



O consumo do carbonato nas reações de descarbonatação durante o metamorfismo progressivo dá origem aos minerais cálcio-silicáticos, como diopsídio, grossulária, titanita e escapolita (Winter 2014) e a infiltração de fluidos ricos em gás carbônico (CO<sub>2</sub>), liberado nessas reações é proporcionalmente maior com o aumento do grau metamórfico. As estimativas de P-T na formação da assembleia cálcio-silicática desse litotipo (amostra PVA18-56), no entanto, dependem da quantidade de “X” mols de CO<sub>2</sub> disponível no sistema. Neste caso, é estabelecido que o amplo consumo dos reagentes da equação (8) para a formação da escapolita, associada com o diopsídio e outros minerais cálcio-silicáticos, enfatiza as condições metamórficas da fácies granulito, diante dos parâmetros petrogenéticos de Bucher & Grapes (2011) e Winter (2014).

## 5.2 INTERPRETAÇÕES E ESTIMATIVAS DAS CONDIÇÕES DO METAMORFISMO REGRESSIVO

O processo de retrometamorfismo é favorecido pela infiltração de fluidos através das estruturas formadas durante a exumação das rochas (Ancelmi 2013). Do ponto de vista tectônico, a região é entendida por Freimann (2014) como um sistema de imbricamento de blocos associado com a formação do *Duplex* transpressivo de Lavras da Mangabeira. Esse sistema é limitado por planos de falha e cavalgamento que limitam as zonas de alívio da pressão (McClay & Bonora 2001, Pinet & Cobbold 1992), onde são geradas zonas de baixas pressões para onde fluidos são succionados e acontecem as reações retrógradas (Vernon 2004). Nesse estágio do metamorfismo, as taxas de reações diminuem devido à queda da temperatura, embora trabalhos anteriores de Vasconcelos (1998) descrevem paragêneses associadas ao metamorfismo regressivo com o decrescimento até a fácies xisto-verde.

Nos litotipos descritos, é comum a formação de minerais secundários, de grau metamórfico inferior aos minerais formados no ápice metamórfico, geralmente compondo as texturas de substituição e substituições pseudomórficas, a exemplo de talco, muscovita ou epídoto. Para Ferry (2001) o pseudomorfismo está relacionado às condições retrógradas do metamorfismo, cuja força de blastese dos minerais se torna menor, fazendo com que um novo mineral substitua um outro pré-existente. Neste caso, o desenvolvimento de minerais às novas

condições de P-T depende da lixiviação e da mobilização de elementos químicos (Augustithis 1990) presentes em minerais pré-existentes.

Nas amostras de rochas metaultramáficas (amostras ZCP-01, PVA18-33 e PVA18-41), as fases mineralógicas secundárias que comumente estão associadas aos anfibólios são talco e clorita. Estas cloritas consistem em uma variedade pobre em alumínio, quando comparada com as cloritas que ocorrem em metapelitos e assim como o talco podem ocorrer até o alto grau metamórfico (Harker, 1974). Esses minerais são restritos no alto grau metamórfico e a abundância dos teores em rochas metaultramáficas é favorecida pelas transformações secundárias, visualizadas pela substituição dos anfibólios ou no preenchimento de fraturas e microfraturas dos litotipos.

Na literatura de rochas metaultramáficas são descritos agregados de palhetas finas de talco que substituem anfibólios e piroxênios de maneira pseudomórfica no estágio retrometamórfico (Szabó 1989). Em outros trabalhos o processo de talcificação está vinculado ao cisalhamento, controlado pelo grande volume de fluidos aquosos infiltrado para as rochas a partir dos planos de cisalhamento (Szabó & Andrade *et al.* 2006). No processo de talcificação os conteúdos de Ca e Mg presentes em anfibólios tendem a se tornar móveis (Saunite *et al.* 2011) e reequilibram para formar minerais secundários.

Comparavelmente, neste estudo algumas ocorrências de asbestos apresentam o processo de talcificação em estágio avançado (amostra PVA18-41 e ZCP-02), decorrente da lixiviação do conteúdo de Mg presente nos minerais. As análises de MEV-EDS em tremolita (amostra PVA18-33) esclarecem que a lixiviação dos íons de Mg e Ca presentes neste mineral é acompanhada do enriquecimento no teor de Fe em direção às bordas, influenciando no aumento do teor de actinolita em solução sólida. A mobilidade dos conteúdos de Mg e Ca implica na neoblastese de Mg-clorita, talco e mais subordinadamente apatita.

Os efeitos de retrometamorfismo em amostras metapelíticas residem ativamente na amostra PVA18-35. O aporte de fase fluida aquosa interage com a rocha parcialmente fundida e gera um líquido magmático hidratado, pela qual Ashworth & McLellan (1985) pontua que a retrogressiva reação de hidratação é diagnóstica de retrometamorfismo, sendo expressa na seguinte reação (9):



Em casos como este, uma forte interação entre os fluidos aquosos e a rocha parcialmente fundida gera a muscovitização da rocha, indicada pela substituição observada na alteração da albita para a muscovita, em cristaloblastos de muscovita pseudomórficas de fibrolita ou em bordas coroníticas de muscovita em granada.

Um outro processo considerado retrógrado na amostra PVA-18-35 é a albitização do feldspato indicada pela presença da albita de alta temperatura. Durante as reações de desidratação do metamorfismo progressivo em altas temperaturas sanidina deveria ser o álcali-feldspato sódico-potássico estável na rocha. No processo de albitização os fluidos aquosos em um resfriamento lento conduzem a liberação do potássio da sanidina em solução, como demonstra a reação (10), de Bucher & Grapes (2011):



Vernon (1975) descreve que quando a atividade dos íons  $K^+$  em solução é reduzida, principalmente devido à adição de água no sistema, sendo concomitante com a diminuição da temperatura, a quebra do feldspato quebrará para formar muscovita pela reação (11):



Em casos particulares, o potássio liberado pela quebra do álcali-feldspato reage com  $Sil + H_2O$  (Reação 9), promovendo a albitização do feldspato residual e a neoblastese de muscovita, que substitui de maneira pseudomórfica a fibrolita.

Tais reações foram realizadas de maneira ativa no granada-albita gnaisse (amostra PVA18-35), acompanhadas da mobilidade dos íons de K e Fe. De acordo com as análises de MEV-EDS a perda das moléculas de almandina em direção aos bordos da granada sugere o reequilíbrio de Fe nas reações de muscovitização.

Os porfiroblastos neoformados de muscovita são indicadores de percolação por sucção dos fluidos secundários que realizam as transformações retrógradas, uma vez que são formados a partir de agregados de cristaloblastos matriciais succionados no pulso de descompressão (Vernon 2004) exercido durante a exumação da rocha.

As feições retrometamórficas são corroboradas em todas as amostras estudadas, inclusive no gnaisse cálcio-silicático (amostra PVA18-56). Particularmente neste litotipo as principais feições retrógradas correspondem às texturas de substituição, originadas pela desestabilização dos minerais durante descompressão. Como discutido anteriormente (Item 5.3), a transformação de anortita em escapolita sob elevada pressão de gás carbônico ( $CO_2$ ) marca a assembleia de fácies granulito em rochas cálcio-silicáticas. No estágio retrometamórfico, a descompressão do  $CO_2$  procede na transformação reversa e desenvolve plagioclásio cálcico em forma de coroas na escapolita, de onde ocasionalmente migra para as porções leucocráticas e reage com o microclínio.

De acordo com as microanálises por MEV-EDS, a desestabilização da escapolita em labradorita é acompanhada pela perda do conteúdo de Ca presente nesses minerais, reequilibrado na neoblastese de minerais, como o epídoto. A relação de intrescimento entre

labradorita e microclínio, que também ocorre intercrescido com o epídoto vermicular, ratifica um reequilíbrio conduzido na presença de fluidos aquosos durante o resfriamento da rocha (Shelley 1993).

A presença de epídoto pseudomórfico em granada ou gerando coroas, indicativos de retrometamorfismo, indica a contribuição da granada com a perda das moléculas de almandina e subodinadamente de grossulária em direção aos bordos como fonte de Fe e um pouco de Ca, reequilibrados na epidotização do litotipo.

## **6 CONCLUSÕES**

O hábito de asbesto é conduzido pela afinidade em que os minerais têm em se manifestar dessa forma na natureza, que primeiramente corresponde tão somente ao grupo dos anfibólios ou das serpentinas. No contexto geotectônico regional as condições termodinâmicas tornam instável a formação de asbestos no grupo das serpentinas e favorece o surgimento deste hábito preferencialmente em anfibólios. O processo de asbestificação em anfibólios é regulado no decorrer da trajetória do metamorfismo progressivo de rochas metaultramáficas em condições de temperatura e pressão favoráveis ao campo de estabilidade dos minerais que recristalizam neste hábito, com destaque para antofilita e tremolita.

Na região de Granjeiro e Mangabeira os asbestos estão preferencialmente contidos em camadas associadas com rochas milonitizadas pela Zona de Cisalhamento Patos ou também frequentemente hospedados em veios e vênulas de rochas encaixantes de composição metaultramáfica. Esses minerais eram comercialmente explorados à céu aberto por

garimpeiros que visavam o desempenho das propriedades físico-químicas deste hábito cristalino em atividades comerciais na produção de materiais de fibrocimento, com destaque na fabricação de telhas de amianto. Entretanto, no Brasil a comercialização de asbestos na classe dos anfibólios está proibida desde 1995 e a partir de 2017 foi também banida a comercialização de asbestos na classe das serpentinas. Por isso estas ocorrências atualmente apresentam um cunho inteiramente científico, desprovidas de interesses econômicos.

Na trajetória metamórfica retrógrada a talcificação dos asbestos resultou nas principais ocorrências de talco da região, cuja preservação do hábito de asbesto pode ser ocasionada pelas reações de substituição pseudomórfica. As ocorrências de talco eram igualmente exploradas pelas técnicas de garimpagem (Gomes & Vasconcelos 2000) que extraíam esses minerais de maneira rudimentar, destinadas para produtos de inseticidas (Ferreira & Santos 2000), restando apenas escavações.

Em amostras metapelíticas (amostra PVA18-57) a sillimanita de hábito fibroso possui blastese nas reações de desidratação realizadas no metamorfismo progressivo a partir da quebra das micas muscovita e biotita. A quebra da biotita marcada pelas condições de pressão e temperatura (P-T) acima da curva Bt1 (Figura 4) resulta na blastese de aluminossilicatos, sillimanita ou granada, ao passo em que há a formação de líquido magmático anatético. Isso tem relevância nos processos geológicos de evolução crustal que culminam na fusão por anatexia das rochas e resultam na geração de granitos e migmatitos. Por outro lado, as reações de hidratação favorecidas pela percolação de fluidos aquosos secundários durante o retrometamorfismo resultam na mucovitização dos litotipos metapelíticos (amostras PVA18-35 e 57).

As ocorrências de minerais de hábito fibroso ou de asbesto compartilham, portanto, da trajetória do alto grau metamórfico, que permeia entre as fácies anfíbolito alto e granulito. Nesta conjuntura geológica da porção oeste da Zona de Cisalhamento Patos esses hábitos cristalinos estão intimamente ligados aos estágios termodinâmicos do metamorfismo em conjunto com a mobilidade dos fluidos hidrotermais metamórficos presentes no sistema de blastese dos minerais. As análises petrográficas das associações presentes em litotipos metaultramáficos, metapelíticos e cálcio-silicáticos aflorantes na região de Várzea Alegre estabelecem que o metamorfismo dessa região atingiu as zonas de alta temperatura, numa faixa apical entre 650 °C e 750 °C, com evolução direcionada para uma ordem de maior pressão, indicada por associações mineralógicas de pressões baixas (amostra PVA18-57 ± 250-350 MPa), médias (amostras PVA18-35 e PVA18-33 ± 400-600 MPa) e altas (amostras PVA18-56, ZCP-01 e ZCP-05 ± 700-800 MPa).

Associado ao estágio de retrometamorfismo, identificado nas texturas de substituição e neoblastese de minerais secundários ao pico metamórfico, foram formados padrões de fraturamento preenchidos com hidrominerais, como clorita em fraturas brechiformes (amostra PVA18-33), antofilita asbesto (amostra ZCP-01) em acomodações rúpteis dos esforços tectônicos tardios, indicativos da sucção de fluidos por descompressão para as zonas de fraqueza. Outras feições petrogenéticas de descompressão são justificadas pela existência de porfiroblastos de muscovita succionados da matriz (amostra PVA18-35) e a desestabilização dos minerais de pressões mais elevadas, como granadas e escapolita (amostras PVA18-35 e 56).

Este conjunto de informações indica a provável influência do controle tectônico que acomoda as rochas na configuração do sistema de *Duplex* transpressivo de Lavras da Mangabeira. O arranjo dessa estrutura possibilita que em uma ordem comum de temperaturas elevadas os litotipos submetidos às diferentes condições de pressão fossem acomodados em níveis crustais distintos. A exumação das rochas dentro do *Duplex* ocasiona a sucção de fluidos secundários para as zonas de baixa pressão a partir dos planos de falha e de cavalgamento. A percolação desses fluidos facilita a lixiviação e a remobilização dos elementos químicos presentes nas associações mineralógicas, dando origem às transformações retrógradas, incluindo os processos de pseudomorfismo, classificados na talcificação, muscovitização ou epidotização das associações.

## REFERÊNCIAS

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2001. Toxicological profile for asbestos. Atlanta, 441 p. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp61.pdf>. Acesso em: 22 Mar. 2019.
- Ancelmi M.F., Santos T.J.S., Reginato R.A., Amaral W.S., Monteiro L.V.S. 2013. Geologia da Faixa Eclogítica de Forquilha, Domínio Ceará Central, noroeste da Província Borborema. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, **43**(2): 235-252
- Arthaud M.H. 2007. *Evolução neoproterozoica do Grupo Ceará (Domínio Central, Ne Brasil): da sedimentação à colisão Continental Brasileira*. PhD Thesis, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170 p.
- Ashworth J.R. & McLellan E.L. 1985. Migmatite layering. In: Shelley D. 1993. *Igneous and metamorphic rocks under the microscope: classification, textures, microstructures and mineral preferred orientations*. London, Chapman & Hall, p. 293-294.
- Associação Brasileira dos Expostos ao Amianto (ABREA). 2018. Amianto - o amianto ou asbesto é uma fibra mineral. Disponível em: <https://www.abrea.com.br/o-amianto/amianto-no-brasil.html>. Acesso em: 14 ago. 2019.

Augustithis S.S. 1990. Atlas of metamorphic-metasomatic textures and processes. Elsevier Science, 228 p.

Best M.G. 1982. *Igneous and metamorphic petrology*. New York – USA, W. H., Freeman and Company, 630 p.

Brito Neves B.B., Santos E.J., Van Schmus W.R., 2000. Tectonic history of the Borborema Province, Northeastern Brazil. *In*: Cordani U. G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. *Tectonic evolution of South America*. Rio de Janeiro, 31<sup>st</sup> International Geological Congress, p. 151-182.

Bucher K. & Grapes R. 2011. *Petrogenesis of metamorphic rocks*. [S.8.], German, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 482 p.

Casado L. 2017. *STF proíbe uso de amianto no Brasil*. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2017/11/1939248-stf-proibe-uso-de-amianto-no-brasil.shtml>. Acesso: 14 ago. 2019.

Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1966. *Minerais constituintes das rochas* – uma introdução. Tradução de: Conde L.E.N., London, 558 p. (Edição da Fundação Calouste Gulbenkian).

Ferreira C.A. & Santos E.J. 2000. Geologia/estratigrafia. *In*: Ferreira C.A. & Santos E.J. *Jaguaribe–SE, Folha SB.24-Z Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco*. Escala 1:500.000. Brasília - DF, CPRM, 2000. p. 11-44. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB).

Ferreira C.A. & Santos E.J. 2000. Recursos minerais e metalogenia. *In*: Ferreira C.A. & Santos E.J. *Jaguaribe–SE, Folha SB.24-Z Estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco*. Escala 1:500.000. Brasília - DF, CPRM, 2000. p. 51-58. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).

Ferry J.M. 2001. Patterns of mineral occurrence in metamorphic rocks. *American Mineralogist*, **85** (11-12):1573-1588.

Filho O.B.F. & Linares W.B. 2009. *Crisotila-amianto*. Brasília - DF, ANM, p. 655-679. Economia Mineral do Brasil. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/8-3-2013-crisotila-amianto>. Acesso em: 24 nov. 2018.

Frank H. 2017. *Guia de Minerais Transparentes ao Microscópio Petrográfico*. Porto Alegre, UFRGS. Departamento de Mineralogia e Petrologia, 213 p. Apostila.

Freimann M.A. 2014. *Geocronologia e petrotrama de quartzo milonitos do duplex transcorrente de Lavras da Mangabeira*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 83 p.

Gaffney S.H., Grespin M., Garnick L., Drechsel D.A., Hazan R., Paustenbach D.J., Simmons B.D. 2016. Anthophyllite asbestos: state of the science review. *Journal of Applied Toxicology*, San Francisco, **37** (1): 38-49.

Gomes J.R.C. 2000. Geologia. In: Gomes J.R.C. & Vasconcelos A.M. *Jaguaribe–SW, Folha SB.24-Y Estados do Ceará, de Pernambuco e do Piauí*. Escala 1:500.000. Brasília - DF, CPRM, 2000. p. 7-38. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB).

Gomes H.A. 2001. Geologia Econômica e Metalogenia. In: Programa Levantamentos Geológicos Básicos Do Brasil. *Projeto Serra Talhada, Folha SB.24-Z-C: Estados de Pernambuco, Paraíba e Ceará*. Brasília, p. 37-49. (Escala 1:250.000).

Gonçalves L.C. 2009. *Contribuição Geofísica à Análise do Arcabouço Tectônico do Domínio Rio Grande do Norte, Província Borborema-NE Brasil*. Ms Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 100 p.

Harker A. 1974. *Metamorphism: a study of the transformations of rock-masses*. London, Chapman and Hall, 362 p.

Hasui Y. 2012. Província Borborema. In: Hasui Y., Carneiro C.D.R., Almeida F.F.M., Bartorelli. A. *Geologia do Brasil*. São Paulo, Editora Beca, p. 264-267.

Janela J.M.E.M. & Pereira P.J.S. 2016. História do amianto no mundo e em Portugal. *Revista do Centro de Investigação Transdisciplinar: Cultura, Espaço e Memória*, Porto, **7** (1):193-206. Disponível em: <https://ler.letras.up.pt/uploads/ficheiros/14799.pdf>. Acesso em: 16 Fev. 2019.

Jordt-Evangelista H. & Silva M.E. 2005. Rochas metaultramáficas de Lamim, sul do Quadrilátero Ferrífero, MG: Contribuição ao conhecimento do protólito da pedra-sabão. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, **58** (1):11-20. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rem/v58n1/a03v58n1>. Acesso em: 11 jul. 2019.

Klein C. & Dutrow B. 2012. *Manual de ciência dos minerais*. Tradução e revisão técnica de: Menegat R. [S.23.], Porto Alegre, Bookman, 724 p.

Leite C. M.M, Barbosa J.S.F., Nicollet C., Sabaté P. 2007. Evolução metamórfica/metassomática paleoproterozoica do Complexo Saúde, da Bacia Jacobina e de leucogranitos peraluminosos na parte norte do Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, Salvador, **37** (4):777-797.

McClay K. & Bonora M. 2001. Analog models of restraining stepovers in strike-slip faults systems. *The American Association of Petroleum Geologists*, **85** (2):233-260.

Mendes R. 2001. Asbesto (amianto) e doença: revisão do conhecimento científico e fundamentação para uma urgente mudança da atual política brasileira sobre a questão. *Caderno de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, **17** (1):7-29.

Miyashiro A. 1973. *Metamorphism and Metamorphic Belts*. London, George Allen & Unwin LTD, 491 p.

Nardy A.J.R, Machado F.B., Zanardo A., Galembeck T.M.B. 2009. *Mineralogia óptica de cristais transparentes: parte prática*. São Paulo, UNESP. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro, 124 p. Apostila.

Neves S.P. 2003. Proterozoic history of the Borborema province (NE Brazil): Correlations with neighboring cratons and Pan-African belts and implications for the evolution of western Gondwana. *Tectonics*, **22** (4):1-14. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2001TC001352>. Acesso em: 10 Dez. 2018.

Neves S.P., Bruguier O., Silva J.M.R., Bosh D., Alcantara V.C., Lima C.M. 2009. The age distributions of detrital zircons in metasedimentary sequences in eastern Borborema Province (NE Brazil): Evidence for intracontinental sedimentation and orogenesis?. *Precambrian Research*, Elsevier, **175** (1-4):187-205.

Oliveira M.C.B. 1996. *Caracterização tecnológica do minério de crisotila da mina de cana brava, GO*. PhD Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 250 p.

Osako L.S., Castro D.L., Fuck R.A., Castro N.A., Pitombeira J.P.A. 2011. Contribuição de uma seção gravimétrica transversal ao estudo da estruturação litosférica na porção setentrional da província borborema, ne do brasil. *Brazilian Journal of Geophysics*, **29** (2):309-329.

Palheta E.S.M., Gomes I.P., Calado B.O., Rocha J.M.A.C., Vale Filho D.P. 2018. *Carta Geológica: Folha SB.24-Z-A-IV-1*. Fortaleza, Serviço Geológico do Brasil. *1 mapa color. Escala 1:50.000*.

Pinet N. & Cobbold P.R. 1992. Experimental insights into the partitioning of motion within zones of oblique subduction. *Tectonophysics*, Elsevier, **206** (3-4):371-388.

Rogli V.L & Coin P. 2004. Mineralogy of Asbestos. *In: Gaffney S.H., Grespin M., Garnick L., Drechsel D.A., Hazan R., Paustenbach D.J., Simmons B.D.* 2016. Anthophyllite asbestos: state of the science review. *Journal of Applied Toxicology*, San Francisco, **37** (1): 38-49.

Santos T.J.S., Fetter A.H., Hackspacher P.C., Van Schmus W.R., Neto J.A.N. 2004. Structural and geochronological studies of the Médio Coreaú Domain, NE Brazil: Constraints on Brasiliano/Pan-African tectonic Evolution in the NW part of the Borborema Province. *Journal of the Virtual Explorer*, **17** (7):1-16. Electronic Edition.

Santos T.J.S., Neto J.A.N., Fetter A.H., Hackspacher P.C. 2001. PETROGRAFIA E LITOQUÍMICA DAS ROCHAS DO EMBASAMENTO CRISTALINO DA REGIÃO DE GRANJA – CE. *Revista de Geologia*, Fortaleza, **14** (1):33-48.

Saunite D.M., Bello R.M.S., Andrade F.R.D., Szabó G.A.J. 2011. Metadolomitos talcificados do Grupo Itaiacoca, Paraná: regime de fluidos e implicações genéticas. *Revista do Instituto de Geociências - USP, Série Científica*, São Paulo, **11** (1):171-187.

Scliar C. 1998. *Amianto: mineral mágico ou maldito? Ecologia humana e disputa político-econômica*. Belo Horizonte, Centro de Documentação e Informação, 152 p.

Shelley D. 1993. *Igneous and metamorphic rocks under the microscope: classification, textures, microstructures and mineral preferred orientations*. London, Chapman & Hall, 445 p.

Silva L.C. McNaughton N.J., Vasconcelos A.M., Gomes J.R.C., Fletcher I.R. 1997. U-Pb SHRIMP ages in southern State of Ceará, Borborema Province, NE Brazil: Archean TTG accretion and Proterozoic crustal reworking. *In: ISGAM, International Symposium on Granites and Associated Mineralizations, Salvador. Extended abstracts and program*. Salvador. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/285454775\\_U-Pb\\_SHRIMP\\_ages\\_in\\_southern\\_state\\_of\\_Ceara\\_Borborema\\_Province\\_Brazil\\_Archean\\_TTG\\_accretion\\_and\\_Proterozoic\\_crustal\\_reworking](https://www.researchgate.net/publication/285454775_U-Pb_SHRIMP_ages_in_southern_state_of_Ceara_Borborema_Province_Brazil_Archean_TTG_accretion_and_Proterozoic_crustal_reworking). Acesso em: 14 fev. 2019.

Szabó G.A.J. 1989. *Contexto geológico e petrologia das rochas metaultramáficas de Alpinópolis, MG*. Ms Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 203 p.

Szabó G.A.J., Andrade F.R.D., Guimarães G.B., Carvalho F.M.S., Moya F.A. 2006. As jazidas de talco no contexto da história metamórfica dos metadolomitos do Grupo Itaiacoca, PR. *Revista do Instituto de Geociências – USP, Série Científica*, São Paulo, **5** (2):13-31.

Turner F.J. 1968. *Metamorphic petrology: mineralogical and field aspects*. New York, McGraw-Hill Book Company, 403 p.

Turner F.J. 1935. Geological investigation of the nephrites, serpentines, and related “Greenstones” used by the Maoris of Otago and South Canterbury. *Transactions of the Royal Society of New Zealand*, **65** (2):187-210. Disponível em: [http://rsnz.natlib.govt.nz/volume/rsnz\\_65/rsnz\\_65\\_00\\_002100.pdf](http://rsnz.natlib.govt.nz/volume/rsnz_65/rsnz_65_00_002100.pdf). Acesso em: 15 nov. 2018.

Turner F.J. 1981. *Metamorphic petrology: mineralogical, field tectonic aspects*. [S.2.], Washington, New York, London, McGraw-Hill Book Company, 524 p.

Van Orden D.R. 2006. Asbestos. *In: Janela J.M.E.M. & Pereira P.J.S. 2016. História do amianto no mundo e em Portugal. Revista do Centro de Investigação Transdisciplinar: Cultura, Espaço e Memória, Porto, 7* (1):193-206. Disponível em: <https://ler.letras.up.pt/uploads/ficheiros/14799.pdf>. Acesso em: 16 Fev. 2019.

Van Schmus W.R., Brito Neves B.B. de, Hackspacher P., Babinski M. 1995. U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of the eastern Borborema province, Northeastern Brazil: initial conclusions. *Journal of South America Earth Sciences*, **8** (3-4):267-288.

Vasconcelos A.M. 1998. Geologia econômica e metalogenia. *In: Vasconcelos A. M. & Mendonça F.E. Iguatu, Folha SB.24-Y: Estado do Ceará*. Escala 1:250.000. Brasília - DF, CPRM, 1998. p. 83-96. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB).

Vasconcelos A.M. 2000. Recursos minerais e áreas potenciais. *In: Gomes J. R. de C. & Vasconcelos A.M. Jaguaribe–SW, Folha SB.24-Y Estados do Ceará, de Pernambuco e do Piauí*. Escala 1:500.000. Brasília - DF, CPRM, 2000. p. 7-38. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil - PLGB).

Vernon R.H. 1975. *Metamorphic process: reactions and microstructure development*. New York, John Wiley & Sons, 247 p.

Vernon R.H. 2004. *A practical guide to rock microstructures*. New York, Cambridge University Press, 578 p.

Vlash S.R.F. 2002. A classe dos tectossilicatos: guia geral da teoria e exercício. *Revista do Instituto de Geociência – USP, Série Didática*, **1** (1):1-49.

Winckler H.G.F. 1979. *Petrogenesis of metamorphic rocks*. [S.5.], New York, Springer-Verlag, 348 p.

Winter J.D. 2014. *Principles of igneous and metamorphic petrology*. [S.2.], England, British Library, 738 p.

Yardley B.W.D. 1989. *An introduction to metamorphic petrology*. [S.2.], New York, John Wiley & Sons, 434 p.

Yund R.A. & Tullis J. 1983. *In: Ribbe P.H., Kroll H., Stewart D.B., Yund R.A., Tullis J., Smith J.V., Holmeister A.M., Rossman G.R. Feldspar mineralogy*. [S.2.], Mineralogical Society of America, p. 141-170.

Zoltai T. 1981. The geologic occurrences and health hazards of amphibole and serpentine asbestos. *In: Veblen D.R., Ghose S., Hawthorne F.C., Ross M., Thompson Jr.J.B., Zoltai T. 1981. Amphiboles and other hydrous pyriboles – mineralogy*. [S.2.], Mineralogical Society of America, p. 237-274.