

GRANULITOS MÁFICOS DE ALTA PRESSÃO NA PALEOZONA DE SUTURA DE ALTEROSA (SW DE MINAS GERAIS): PETROGRAFIA E METAMORFISMO DE ROCHAS METAMÁFICAS ENTRE AS ZONAS DE CISALHAMENTO VARGINHA E CAMPOS GERAIS

HIGH-PRESSURE MAFIC GRANULITES IN THE ALTEROSA SUTURE PALEOZONE (SW OF MINAS GERAIS): PETROGRAPHY AND METAMORPHISM OF METAMAFIC ROCKS BETWEEN THE VARGINHA AND CAMPOS GERAIS SHEAR ZONES

Thaís Güitzlaf LEME¹, Antenor ZANARDO², Guillermo Rafael Beltran NAVARRO²

¹Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente. Avenida 24-A, 1.515. Bela Vista – Rio Claro – SP. E-mail: thais.g.leme@unesp.br

²Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Departamento de Geologia. Avenida 24-A, 1.515. Bela Vista – Rio Claro – SP. E-mails: antenor.zanardo@unesp.br, guillermo.navarro@unesp.br

Introdução
Materiais e Métodos
Geologia Local
Petrografia e Química Mineral
Discussões
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - No sudoeste do estado de Minas Gerais, a Paleozona de Sutura de Alterosa separa o Complexo Guaxupé do Complexo Barbacena e corresponde a uma faixa de rochas intensamente deformadas. Na porção mais meridional dessa faixa de rochas, entre as zonas de cisalhamento Varginha e Campos Gerais, ocorrem metassedimentos contendo granada, cianita, oligoclásio/andesina, ortoclásio e rutilo, com intercalações de ortogneisses com granada, anfíbólio, biotita, clinopiroxênio, ortoclásio e oligoclásio/andesina, além de intercalações subordinadas de lentes de rochas metamáficas (anfíbolitos, granulitos máficos e retroeclogitos) e de rochas metaultramáficas. Este trabalho integra resultados de petrografia e de química mineral de granulitos máficos que ocorrem nessa porção, com objetivo de caracterizar o metamorfismo dessas rochas. As associações minerais, aspectos texturais e características de química mineral dos granulitos máficos indicam pico metamórfico em fácies granulito de alta pressão, com as paragêneses granada + sahlita + andesina/bytownita + quartzo + rutilo ± meionita, desenvolvidas anteriormente à foliação principal (Sn). As paragêneses de pico foram progressivamente superpostas por associações minerais do reequilíbrio metamórfico, em fácies granulito a anfíbolito superior durante o desenvolvimento de Sn, acompanhado por descompressão quase isotérmica, seguida de diminuição conjunta de temperatura e pressão, dentro do campo de estabilidade da cianita, exibindo trajetória metamórfica horária.

Palavras chaves: Granulitos de alta pressão. Petrografia. Metamorfismo. Paleozona de Sutura de Alterosa, Faixa Brasília Meridional.

ABSTRACT - In the southwest of Minas Gerais state, the Alterosa Suture Paleozoone separates the Guaxupé Complex from the Barbacena Complex and corresponds to a belt of intensely deformed rocks. In the southernmost portion of this belt, between the Varginha and Campos Gerais shear zones, occur metasediments bearing garnet, kyanite, oligoclase/andesine, orthoclase and rutile, with intercalations of orthogneisses with garnet, amphibole, biotite, clinopyroxene, orthoclase and oligoclase/andesine, in addition to subordinate lenses of metamafic rocks (amphibolites, mafic granulites and retroeclogites) and metaultramafic rocks. This paper integrates results from petrography and mineral chemistry of mafic granulites that occur in this portion to characterize the metamorphism of these rocks. The mineral associations, textural aspects and mineral chemistry characteristics of mafic granulites indicate a metamorphic peak in high-pressure granulite facies, with garnet + sahlite + andesine/bytownite + quartz + rutile ± meionite paragenesis, developed before the main foliation (Sn). Metamorphic peak paragenesis was progressively superimposed by mineral assemblages from metamorphic re-equilibration in granulite to upper amphibolite facies during Sn development, accompanied by near-isothermal decompression, followed by a decrease in temperature and pressure within the kyanite stability field exhibiting a clockwise metamorphic path.

Keywords: High-pressure granulites. Petrography. Metamorphism, Alterosa Suture Paleozoone. Southern Brasília Belt.

INTRODUÇÃO

Zonas de sutura são regiões intensamente deformadas que marcam o limite entre terrenos e/ou unidades tectônicas com diferentes evoluções geológicas, que foram amalgamados durante o desenvolvimento de cinturões orogênicos colisionais. Essas zonas geralmente são identificadas por fortes anomalias geofísicas e

frequentemente contêm remanescentes de sequências ofiolíticas, *mélanges* tectônicas, terrenos metamórficos de alta a ultra alta pressão, além de eclogitos e/ou retroeclogitos preservados (Chetty et al., 2011, 2016; Chetty, 2017). O reconhecimento e estudo de áreas que correspondem a zonas ou paleozonas de sutura são

essenciais para a compreensão dos processos tectono-metamórficos que atuaram em limites convergentes de placas, uma vez que representam o registro de informações essenciais de porções profundas da crosta (continental e oceânica) envolvidas em zonas de subducção e colisão continental, e que podem ser usadas para reconstruir a evolução geodinâmica de uma região (Chopin, 2003; Brown, 2007; Möller et al., 2018).

No sudoeste do estado de Minas Gerais, a Paleozona de Sutura de Alterosa (PSA) é interpretada como o limite entre o cráton do São Francisco e o paleocontinente Paranapanema (que inclui os blocos São Paulo e Paraná de Haralyi & Hasui, 1982), aglutinados durante a formação do Gondwana Ocidental, no Neoproterozoico, e é delimitada por grande anomalia gravimétrica *Bouguer* (Almeida et al., 1980; Haralyi & Hasui, 1982; Haralyi et al., 1985; Zanardo et al., 1996, 2006; Ebert & Hasui, 1998; Braga & Ebert, 2006; entre outros).

Na região dos municípios de Guaxupé – Monte Belo – Jacuí – Petúnia, a PSA separa o Complexo Guaxupé (terrenos granulíticos) de terrenos arqueanos/paleoproterozoicos atribuídos ao Complexo Barbacena (terrenos tonalíticos-trondhjemiticos-granodioríticos e *greenstone belts* associados) e corresponde a uma faixa de rochas intensamente deformadas, estruturada segundo a direção E-W a WNW-ESE, com aproximadamente 20 km de largura. Essa faixa de rochas associada à PSA é constituída por metassedimentos pelíticos a psamo-pelíticos, com intercalações de ortognaisses e granitoides e intercalações subordinadas de rochas metamáficas e metaultramáficas, metamorfisados em fácies anfíbolito a granulito de alta pressão, no campo de estabilidade da cianita (Zanardo, 1992, 2003; Del Lama, 1993; Del Lama et al., 1994; Zanardo et al., 1996, 2006; Leme, 2019, 2023; Leme et al., 2023). O limite norte da PSA é marcado por concentração de rochas metamáficas/metaultramáficas atribuídas a uma sequência ofiolítica (Soares et al., 1990, 1991; Zanardo, 1992, 2003; Roig, 1993; Zanardo et al., 1996; Lima, 2014).

Devido à complexidade tectono-litológica da

PSA, os litotipos que compõem essa região receberam diferentes denominações no decorrer da evolução do conhecimento geológico, sendo incluídos inicialmente como parte do Complexo Campos Gerais e posteriormente foram correlacionados como continuidade física dos grupos Araxá e Andrelândia (Cavalcante et al., 1979; Fonseca et al., 1979; Soares et al., 1990; Zanardo, 1992, 2003; Morales, 1993; Zanardo et al., 1996, 2006; entre outros).

Trabalhos recentes realizados na PSA (Leme, 2016, 2019, 2023; Leme et al. 2019, 2020, 2023) detalharam os litotipos e as condições metamórficas das rochas que ocorrem na porção mais meridional dessa faixa de rochas, entre as zonas de cisalhamento Varginha e Campos Gerais.

Nesta porção ocorrem predominantemente rochas metassedimentares pelíticas, psamo-pelíticas, psamíticas e grauvaqueanas contendo granada, cianita, oligoclásio/andesina, ortoclásio e rutilo, representadas por gnaisses, quartzo xistos e quartzitos, que predominam na porção leste da área; com intercalações de ortognaisses contendo granada, anfíbolio, biotita, clinopiroxênio, ortoclásio e oligoclásio/andesina, que dominam na parte oeste da área; além de intercalações subordinadas de lentes métricas de rochas metamáficas (incluindo anfíbolitos, granulitos máficos e retroeclogitos) e de rochas metaultramáficas (metaperidotitos, talco xistos, anfíbolio xistos), intercaladas na sequência metassedimentar (Leme, 2019, 2023; Leme et al., 2019, 2023) (Figura 1). Dados de metamorfismo indicam pico metamórfico em fácies granulito de alta pressão, em condições *P-T* balizadas entre 850-900°C e 14,0-15,0 kbar (Leme, 2023; Leme et al., 2023).

Este trabalho integra resultados de petrografia e de química mineral de lentes de granulitos máficos que ocorrem entre as zonas de cisalhamento Varginha e Campos Gerais, intercalados em rochas metassedimentares, com objetivo de caracterizar as associações minerais, a química mineral, e aspectos texturais, bem como o metamorfismo dessas rochas, que preservam importantes registros para a compreensão da evolução tectono-metamórfica da PSA.

MATERIAIS E MÉTODOS

Após a caracterização petrográfica, foram selecionadas cinco amostras representativas de granulitos máficos para análises de química

mineral por microsonda eletrônica da marca *JEOL* modelo *JXA-8230 superprobe*. As análises foram realizadas no Laboratório de Microsonda

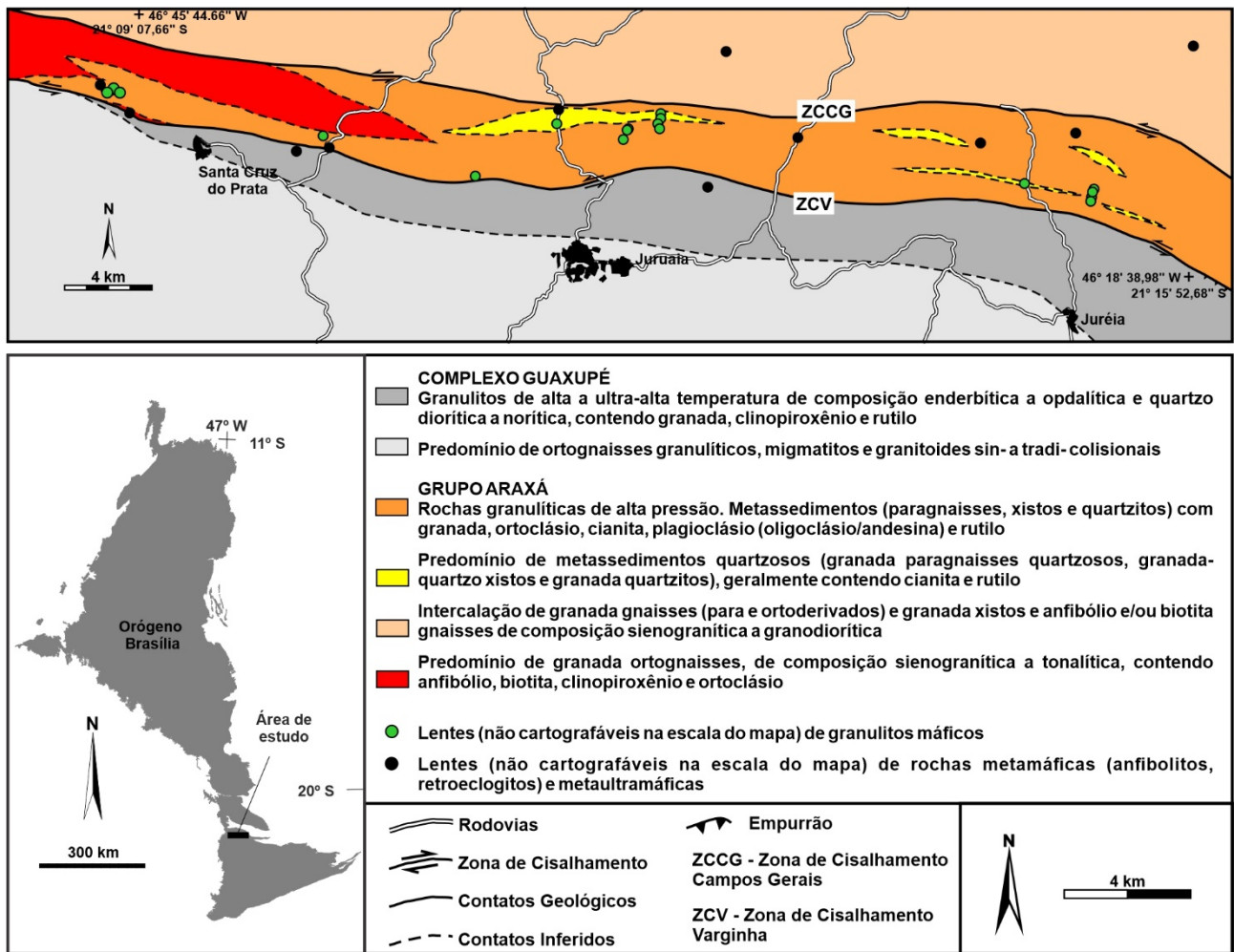


Figura 1 - Mapa geológico simplificado mostrando as litologias que ocorrem entre as zonas de cisalhamento Varginha e Campos Gerais, indicando a localização das ocorrências de granulitos máficos. Modificado de Leme (2023), Leme et al. (2023).

Eletrônica, do Departamento de Geologia, do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP, campus de Rio Claro.

As lâminas foram polidas e metalizadas com carbono em câmara de vácuo e então analisadas. Foram realizadas análises em cristais de granada, piroxênio, anfibólio, plagioclásio, biotita e escapolita, sob condições de aceleração de 15 kV, corrente de 20 nA, diâmetro do feixe de 10

µm, com padrões de óxidos naturais e sintéticos para calibração de rotina.

O tempo de contagem para os elementos maiores foi de 10 segundos no pico e 5 segundos em cada *background*. Para os elementos menores o tempo de contagem foi de 20 segundos no pico e 10 segundos para cada *background*. As análises químicas representativas são apresentadas nas tabelas do Apêndice.

GEOLOGIA LOCAL

Na área de estudo, os granulitos máficos ocorrem como leitos ou bandas descontínuas, muitas vezes com formas lenticulares, de espessura decimétrica, métrica a raramente decamétrica, intercaladas nas faixas/camadas de metassedimentos. São concordantes em relação às rochas encaixantes e apresentam contatos abruptos. Em escala de afloramento podem mostrar-se boudinadas. Frequentemente essas rochas mostram coloração verde escuro a cinza esverdeado escuro, com grau variado de anisotropia (Figura 2).

A estrutura geral dessas rochas é marcada por foliação principal (Sn) de direção EW a WNW, com ângulo de mergulho médio a alto, paralela ao bandamento composicional, com feições anastomosadas, constituindo tectonitos “S” a “SL”. A estrutura varia de maciça pouco orientada a termos com estrutura gnáissica descontínua a contínua, e xistosa. São constituídas basicamente por clinopiroxênio, granada, anfibólio e plagioclásio, com diferenças texturais e de conteúdo mineralógico modal de um afloramento para outro.

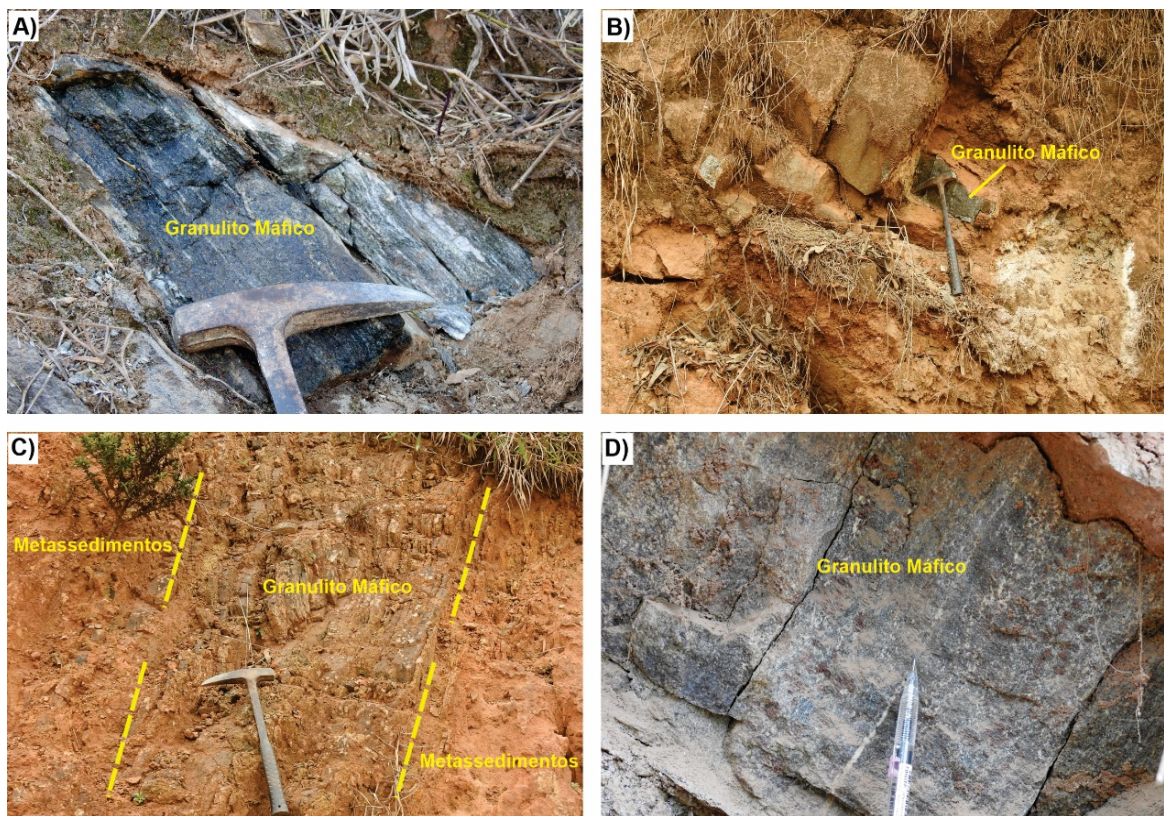


Figura 2 - Aspectos mesoscópicos dos granulitos máficos que ocorrem na área de estudo. A, B, C, D) Lentes e camadas descontínuas de granulitos máficos intercalados em metassedimentos.

PETROGRAFIA E QUÍMICA MINERAL

Os granulitos máficos apresentam bandamento gnáissico difuso contínuo a comumente descontínuo, representado pela intercalação de leitos constituídos predominantemente por granada, clinopiroxênio e anfibólio, e leitos constituídos por plagioclásio. A textura desses litotipos é granoblástica inequigranular com leitos descontínuos subordinados de textura nematoblástica inequigranular (Figura 3A, B, C). Nos termos mais ricos em granada, a textura pode exibir domínios porfiroblásticos difusos (Figura 3D).

A mineralogia principal dessas rochas é constituída por granada (15-65%), clinopiroxênio (15-50%), anfibólio (5-40%), plagioclásio (10-35%), escapolita (0-20%), quartzo (<1-10%), epidoto/clinozoisita (0-10%), titanita (0-5%), biotita (0-5%), minerais opacos (<3%), rutilo (<3%), apatita (<1%), além de traços de zircão e clorita.

A granada ocorre sob a forma de cristais subédricos e anédricos, com bordas ameboides e dimensões que variam de inferiores a 0,1 mm e podem alcançar até 2,0 cm de diâmetro. Os cristais são comumente poiquiloblásticos, com inclusões de clinopiroxênio (sahlita), anfibólio (hornblenda), plagioclásio (andesina), epidoto, escapolita (meionita), minerais opacos, rutilo,

titanita e zircão (Figura 4A, B). É comum os cristais mostrarem-se substituídos por biotita e hornblenda (Figura 4B). Em alguns termos ocorrem acículas de rutilo orientadas de acordo com a estrutura interna da granada, resultado de exsolução (Figura 4C, D).

Nos granulitos máficos, a granada apresenta composição dominada pelas moléculas de almandina (Alm_{36-44}) e piropo (Prp_{31-39}), seguida por proporções intermediárias de grossulária (Gr_{S14-22}) e conteúdos inferiores de andradita (Adr_{3-8}) e espessartita (Sps_{1-2}). Em raras amostras, a granada exibe composição predominada por almandina (Alm_{41-43}) e grossulária (Gr_{32-34}), com menores proporções de piropo (Prp_{9-12}), andradita (And_{6-9}) e espessartita (Sps_{6-9}).

Os perfis composicionais mostram-se geralmente planos (homogêneos), exibindo fraco zoneamento químico em direção às bordas, marcado pelo enriquecimento de almandina e diminuição de piropo (Figura 5A, B). Alguns cristais, com dimensões próximas de 2,0 cm de diâmetro, apresentam zoneamento composicional definido do núcleo para a borda, pelo enriquecimento em piropo e diminuição dos teores de almandina e grossulária, além de leve aumento de andradita (Figura 5C).

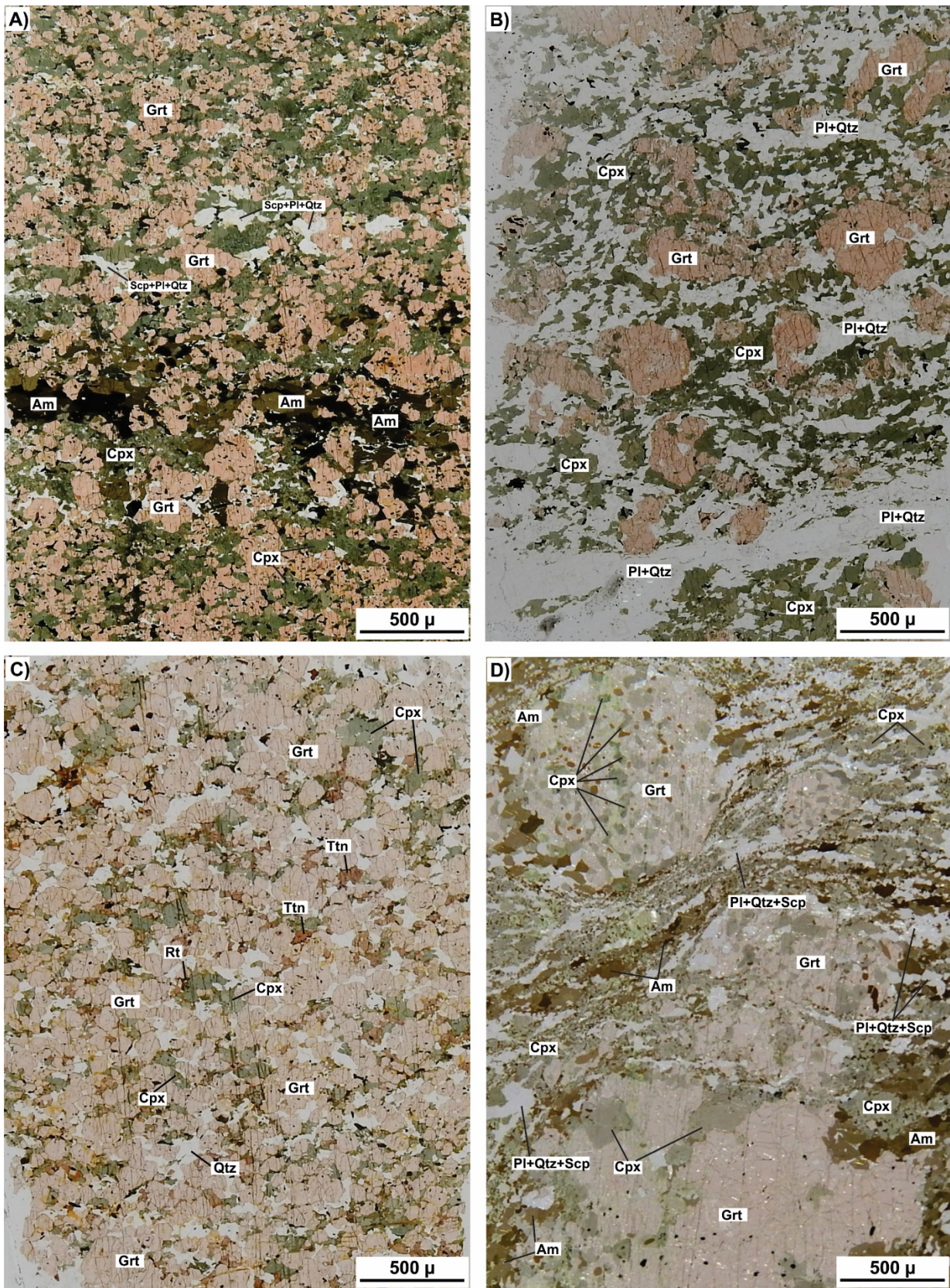


Figura 3 - Aspectos microscópicos dos granulitos máficos com destaque para a textura dessas rochas. A) Textura granoblástica inequigranular constituída por granada, clinopiroxênio, plagioclásio e escapolita com leitos descontínuos de textura nematoblástica constituídos por anfibólio; B) Textura granoblástica inequigranular, marcada por leitos descontínuos constituídos por clinopiroxênio intercalados a leitos granoblásticos constituídos por plagioclásio e domínios porfiroblásticos constituídos por granada; C) Textura granoblástica inequigranular constituída por granada, clinopiroxênio, plagioclásio e titanita; D) Textura granoblástica inequigranular marcada por leitos anastomosados com destaque para domínios porfiroblásticos constituídos por granada. Os leitos granoblásticos se amoldam em torno dos porfiroblastos de granada. Am: anfibólio, Cpx: clinopiroxênio, Grt: granada, Pl: plagioclásio, Qtz: quartzo, Rt: rutilo, Scp: escapolita, Ttn: titanita.

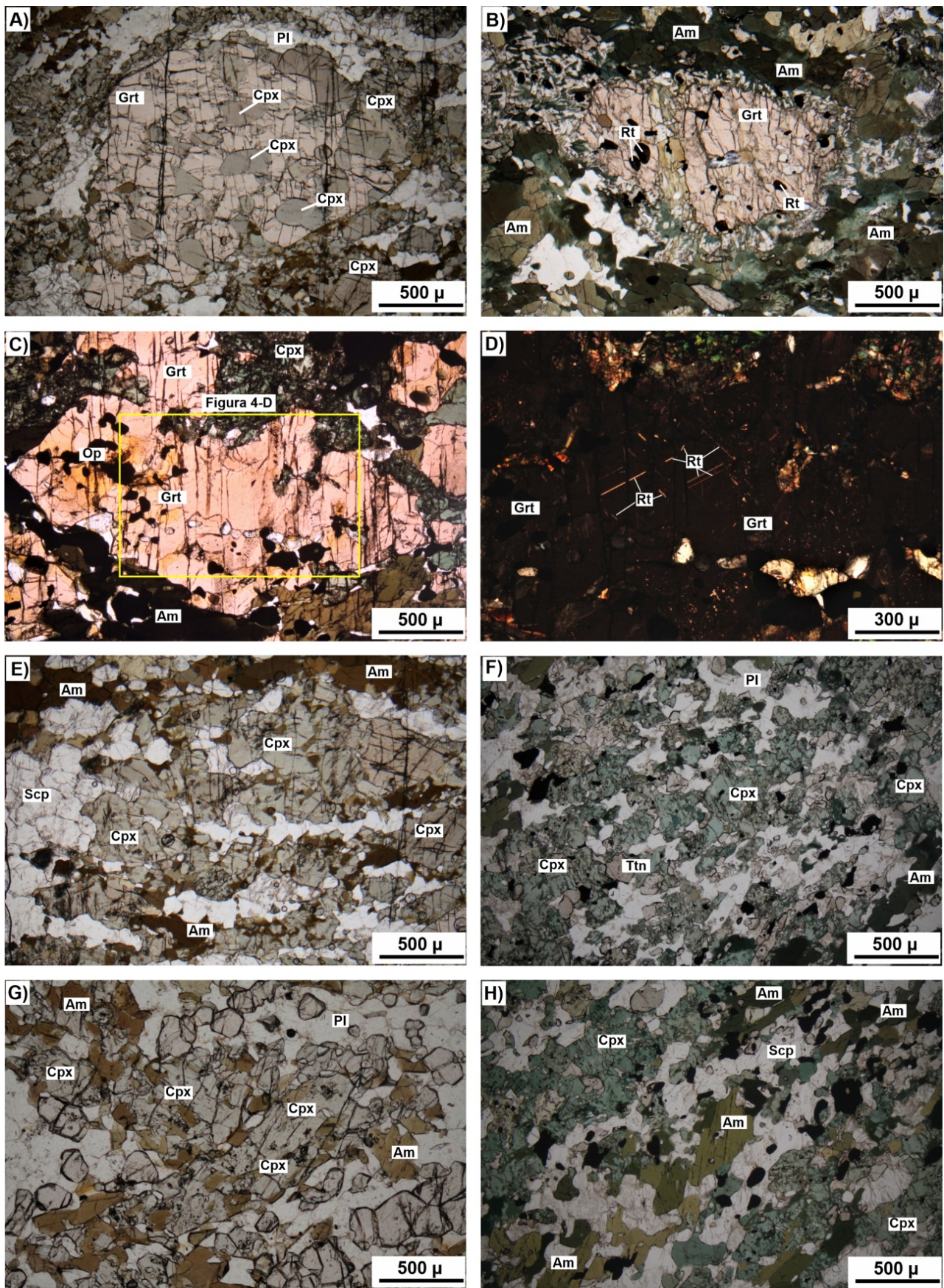


Figura 4 - Fotomicrografias de granulitos máficos. A) Cristal de granada poiquiloblástico com inclusões de clinopiroxênio (Polarizadores paralelos); B) Cristal de granada com inclusões de rutilo, envolto por anfibólio (Polarizadores paralelos); C, D) Destaque para acículas de rutilo organizadas preferencialmente em duas direções em cristal de granada (Polarizadores paralelos em C e polarizadores cruzados em D); E, F, G, H) Leitões granoblásticos descontínuos constituídos por cristais de clinopiroxênio, com destaque para cristais de clinopiroxênio corroídos por anfibólio (Polarizadores paralelos). Am: anfibólio, Cpx: clinopiroxênio, Grt: granada, Op: minerais opacos, Pl: plagioclásio, Rt: rutilo, Scp: escapolita, Ttn: titanita.

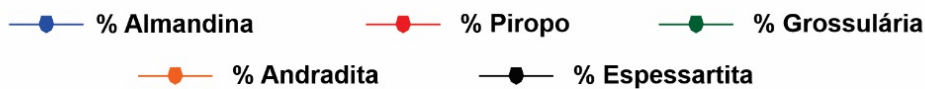
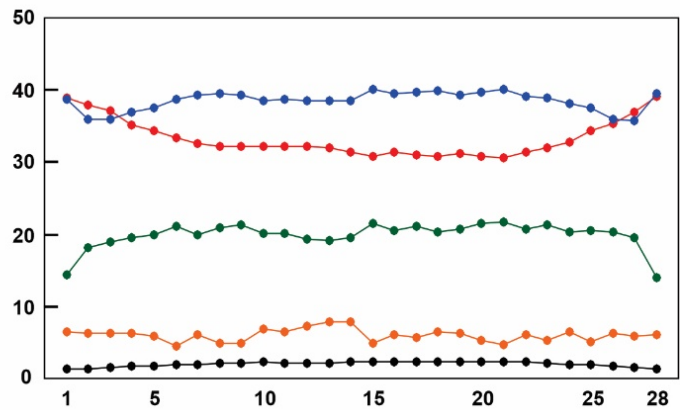
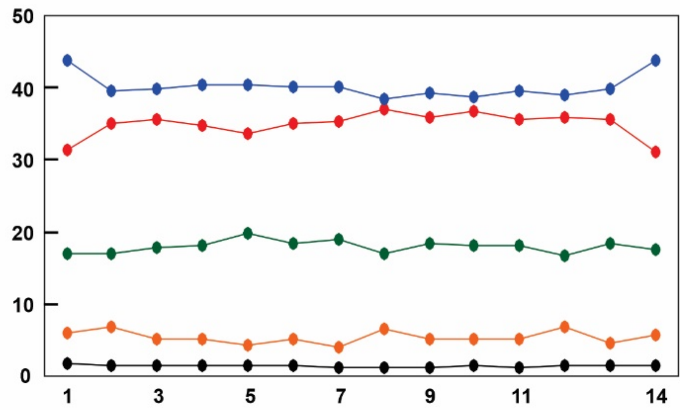
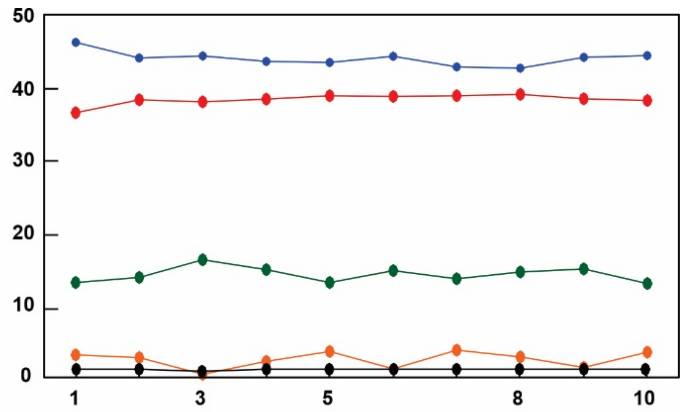
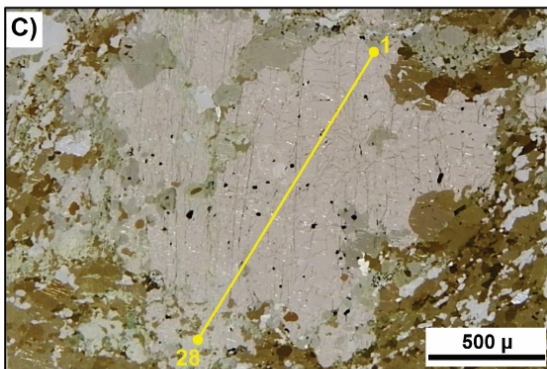
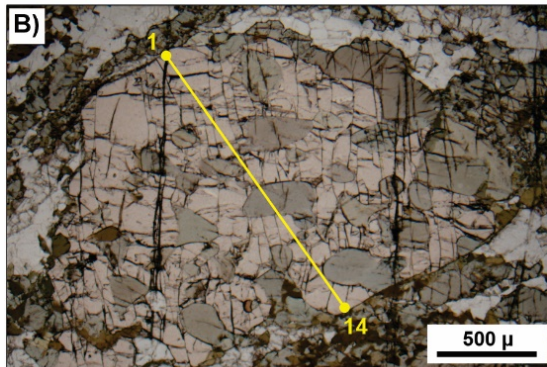
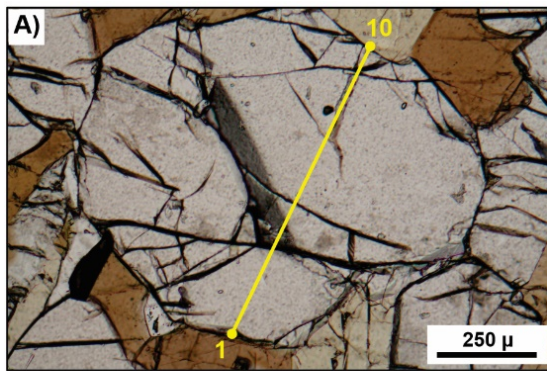


Figura 5 - Perfis composicionais representativos de cristais de granada de granulitos máficos da área de estudo.

O clinopiroxênio exibe pleocroísmo incipiente a nítido em tons de verde pálido, verde a verde azulado. Os cristais são subédricos prismáticos a anédricos granulares, com contatos retos a predominantemente lobulados e dimensões que variam de 0,2 mm a 4,0 mm. Em geral, os cristais ocorrem parcialmente corroídos por hornblenda (Figura 4E, F, G, H), podem se apresentar envolvidos por coroas de hornblenda ou ainda formar textura simplectítica com hornblenda. Em algumas amostras ocorre parcialmente alterado por epidoto + clinozoisita.

O clinopiroxênio é quimicamente classificado como sahlita (Figura 6A) e os cristais analisados não apresentam zoneamento químico. Exibem

teores relativamente elevados de Al, variando de 0,09 a 0,44 átomos por unidade de fórmula (a.p.u.f.) e de Na entre 0,03 e 0,17 a.p.u.f. (Figura 6B). O teor de jadeíta varia entre 1 a 12.

O anfibólio (hornblenda) apresenta coloração verde escuro amarronzado a verde escuro azulado. Os cristais são predominantemente anédricos a subédricos prismáticos, com dimensões que variam de 0,2 a 7,0 mm de comprimento e contatos retos a lobulados. Também ocorre sob a forma de agregados de cristais euédricos prismáticos e pseudo-rômnicos com contatos poligonais (textura de equilíbrio). Frequentemente, a hornblenda ocorre corroendo/consumindo os cristais de sahlita. Ocorrem cristais simplectíticos com epidoto. Em

alguns casos, a hornblenda envolve cristais de granada e localmente mostra-se corroída por biotita. Localmente os cristais podem mostrar extinção ondulante leve. No diagrama de Leake et al. (1997), o anfibólio é classificado predominantemente como magnésio-hastingsita e

subordinadamente como edenita e ferro pargasita (Figura 6C). Os cristais apresentam conteúdos de álcalis (Na + K no sítio A) relativamente altos, variando entre 0,24 e 0,62 a.p.u.f. e de 0,02 a 0,42 a.p.u.f. de Na e K, respectivamente. Os teores de Ti variam entre 0,04 e 0,36 a.p.u.f.

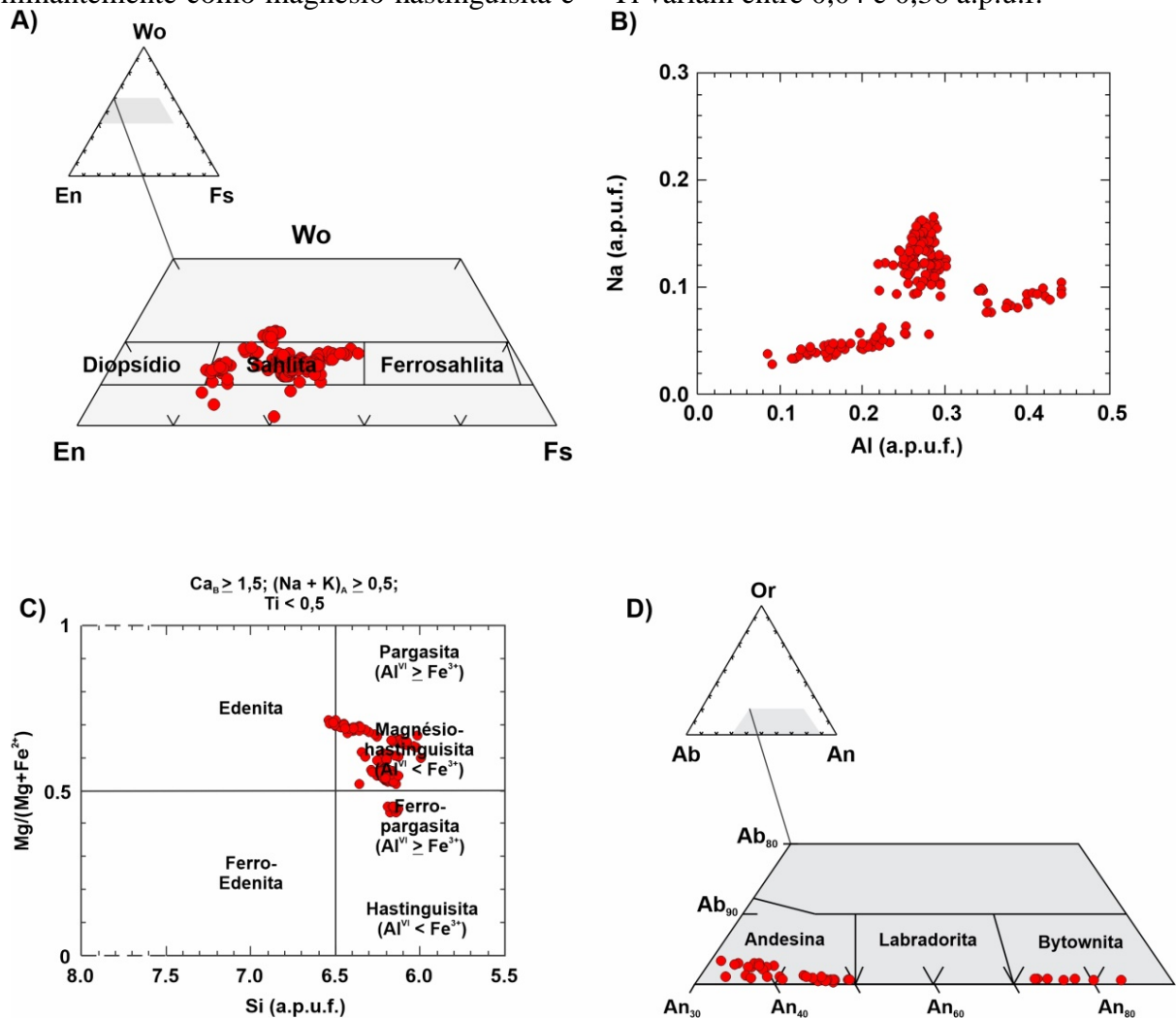


Figura 6 – Diagramas de classificação de química mineral. A) Diagrama ternário Ca-Mg-Fe para classificação de piroxênios; B) Diagrama binário Al (em a.p.u.f.) x Na (em a.p.u.f.) para cristais de piroxênio de amostras de granulitos máficos; C) Diagrama de classificação de anfibólios cálcicos (Modificado de Leake et al., 1997); D) Diagrama ternário de classificação de feldspatos.

O plagioclásio é classificado como andesina (An₃₃₋₄₉) e mais raramente como bytownita (An₇₃₋₈₄) (Figura 6D). Ocorre como cristais subédricos tabulares a anédricos, com dimensões que variam de 0,1 a 2,5 mm. Geralmente ocorre como agregados com contatos poligonais, apresentando textura de equilíbrio bem definida (Figura 7A, B). Menos frequentemente os cristais exibem contatos lobulados. Os agregados podem ser lentiformes, constituindo domínios descontínuos na trama da rocha. Apresentam geminação polissintética (Lei da Albita) nítida a difusa, e mais raramente geminação periclina-albita. Os cristais mostram sinais de recristalização, recuperação e extinção ondulante em diferentes

graus.

O quartzo ocorre como cristais anédricos, alongados, com contatos lobulados, dimensões que podem alcançar até 3,5 mm e tamanhos médios da ordem de 0,4 mm. Mostram sinais de recristalização, recuperação, extinção ondulante em diferentes graus e formação de subgrãos. Também ocorre como inclusões em cristais de hornblenda.

A escapolita apresenta composição de meionita (Me₇₀₋₇₉), com teores de SO₃ que variam entre 0,64 e 6,58 porcentagem em peso. Os cristais ocorrem sob formas euédricas e subédricas prismáticas a anédricas, com dimensões que variam de 0,1 mm a 6,0 mm e tamanhos médios

da ordem de 1,5 mm. Mostram contatos retos (poligonais) entre si e contatos predominantemente lobulados com os outros minerais (Figura 7D, E,

F, G). Quando presente, a meionita forma agregados lenticulares, frequentemente associados aos leitos mais ricos em sahlita.

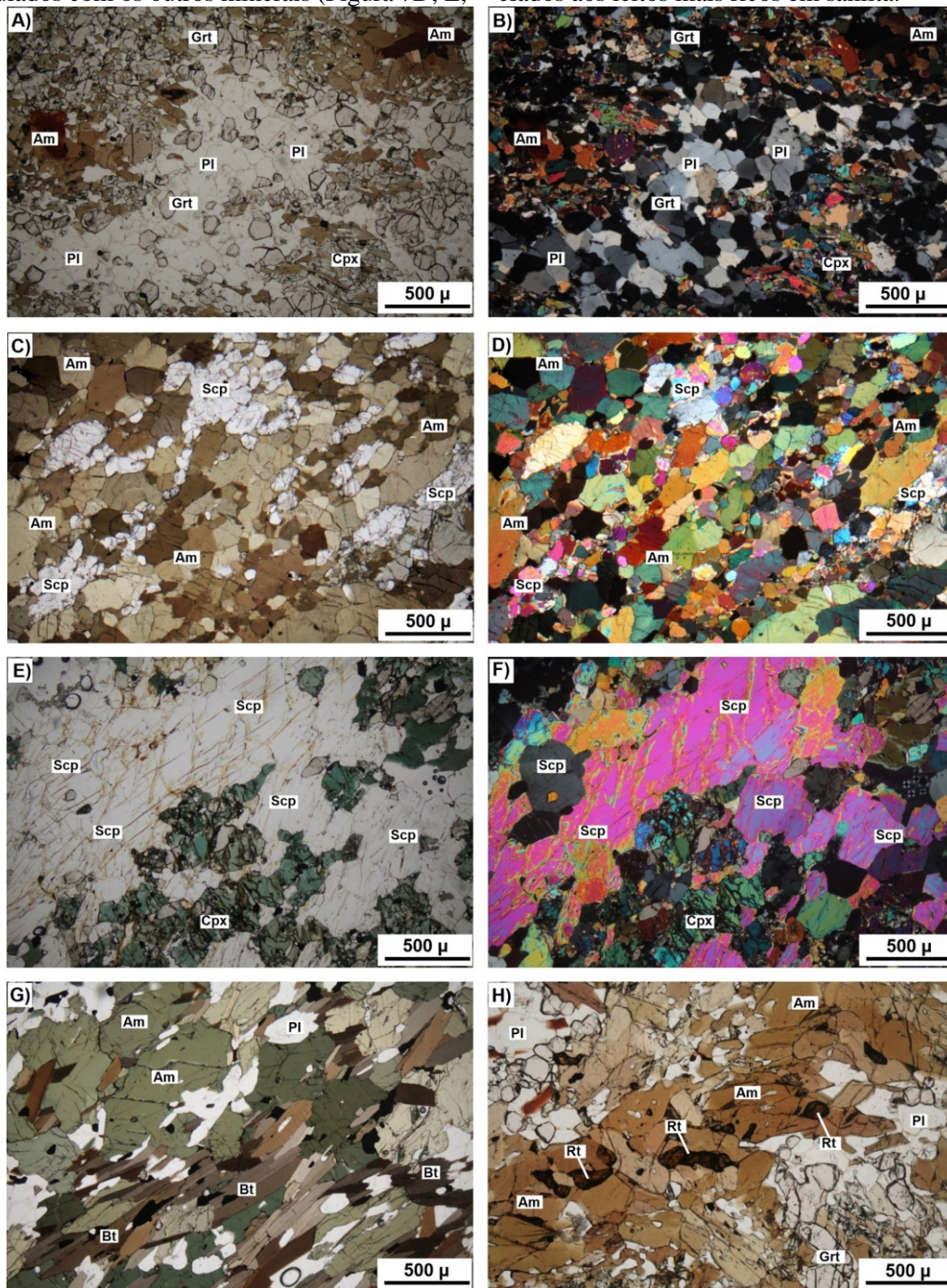


Figura 7 - A, B) Agregados de cristais subédricos de plagioclásio mostrando contatos poligonais e textura de equilíbrio (Polarizadores paralelos em A e polarizadores cruzados em B); C, D) Leitões descontínuos granoblásticos constituídos por agregados de cristais de escapolita (Polarizadores paralelos em C e polarizadores cruzados em D); E, F) Cristais de escapolita mostrando contatos predominantemente retos com outros cristais de escapolita e contatos predominantemente lobulados com outros minerais (Polarizadores paralelos em E e polarizadores cruzados em F); G) Cristais tabulares de biotita fortemente orientados corroendo cristais de anfibólio (Polarizadores paralelos); H) Rutilo associado a cristais de anfibólio (Polarizadores paralelos). Am: anfibólio, Bt: biotita, Cpx: clinopiroxênio, Grt: granada, Pl: plagioclásio, Rt: rutilo, Scp: escapolita.

O epidoto ocorre sob a forma de cristais subédricos tabulares a anédricos granulares, com dimensões médias da ordem de 0,5 mm. Os contatos são retos a lobulados. Ocorre associado principalmente à alteração da sahlita e hornblenda, geralmente formando texturas simplectíticas com esses minerais.

A titanita constitui cristais com formas subédricas, anédricas a arredondadas, exibindo hábitos tabular, subprismático e granular, com dimensões que variam de 0,1 mm a 2,0 mm. Os cristais ocorrem associados aos minerais máficos, principalmente sahlita e hornblenda. Também ocorre associada aos minerais opacos, muitas vezes, formando coroas em torno destes. Localmente forma coroas em cristais de rutilo.

A biotita ocorre associada aos leitos mais ricos em hornblenda sob a forma de cristais tabulares a subtabulares com dimensões que variam de 0,5 a 3,0 mm, e pleocroísmo em tons de amarelo-ocre a castanho/marrom escuro. A biotita corrói os cristais de hornblenda (Figura 7G). Localmente mostra inclusões de finas acículas de rutilo. Quimicamente, a biotita analisada é classificada como eastonita e secundariamente como flogopita. O teor de X_{Mg} varia de 0,66 a

0,73, com conteúdos de Ti variando entre 0,29 e 0,64 a.p.u.f., de Al^{IV} entre 2,45 e 2,57 a.p.u.f. e de Al^{VI} de 0,16 a 0,53 a.p.u.f.

Os minerais opacos são representados predominantemente por ilmenita e menos frequentemente por magnetita. Os cristais são anédricos, com dimensões que variam de inferiores a 0,1 mm a 2,5 mm. Em algumas amostras são representados por cristais com bandas ou lamelas de exsolução entre ilmenita e ilmenorutilo. O rutilo ocorre sob a forma de cristais prismáticos a anédricos, com dimensões que variam de inferiores a 0,1 mm até 0,8 mm. Ocorre associado principalmente a granada, hornblenda e sahlita. Pode estar incluso em cristais de hornblenda (dimensões da ordem de 0,15 mm) (Figura 7H) e granada ou envoltos por titanita. A apatita ocorre sob a forma de cristais prismáticos a granulares, dispersa pela rocha ou inclusa em outros minerais. Frequentemente exibe dimensões inferiores a 0,2 mm, localmente alcançando dimensões de 0,6 mm. O zircão é predominantemente arredondado, com dimensões inframilimétricas. Ocorre disperso ou associado aos leitos constituídos por hornblenda. A clorita ocorre localmente, geralmente associada à alteração de cristais de granada.

DISCUSSÕES

As texturas e microestruturas observadas nos granulitos máficos indicam que a foliação principal (Sn) foi desenvolvida após o pico metamórfico. As paragêneses do pico do metamorfismo desses litotipos são constituídas por granada + sahlita + andesina/bytownita + quartzo + rutilo ± meionita e são típicas de fácies granulito de alta pressão, indicando condições de temperaturas mínimas da ordem de 800°C e pressões dentro do campo da estabilidade da cianita (acima do campo de estabilidade do ortopiroxênio) (Green & Ringwood, 1967; O'Brien & Rötzler, 2003; Zhao, 2021; entre outros).

As paragêneses do pico metamórfico foram sobrepostas por reequilíbrio metamórfico generalizado. As reações retrometamórficas de reequilíbrio ocorreram em contexto de deformação progressiva dúctil não coaxial, que deu origem a foliação principal (Sn), marcada por feições anastomosadas e lenticularizadas, em condições de alto grau metamórfico.

As reações metamórficas de reequilíbrio são representadas principalmente por substituição de clinopiroxênio (sahlita) por hornblenda; substituição de hornblenda por biotita, em muitos casos

com geração de titanita; formação de rutilo a partir de hornblenda de coloração verde amarronzada; formação de biotita com conteúdo relativamente elevado de Ti e Al, muitas vezes formando rutilo; substituição de bordas de granada por hornblenda, podendo formar coroas; exsolução de finas acículas de rutilo em granada (composição de almandina rica em piropo); além de recristalização de plagioclásio e meionita.

As reações retrógradas indicam que o reequilíbrio metamórfico das associações minerais ocorreu em fácies granulito a anfíbolito superior, corroborado pelas reações metamórficas, texturas e microestruturas observadas nas amostras.

As características químicas dos minerais analisados também indicam condições de alto grau metamórfico. Os cristais de sahlita analisados apresentam teores relativamente altos de Al e de Na e mostram correlação positiva entre essas concentrações. Essas características indicam que ocorreram substituições acopladas nos sítios M1 e M2 do tipo $Ca^{2+} + (Mg^{2+} \text{ e/ou } Fe^{2+}) = Al^{3+} + Na^+$, sugerindo equilíbrio em condições de alto grau metamórfico (Deer et al., 1997; O'Brien & Rötzler, 2003; Vinograd et al., 2007).

A hornblenda observada nas amostras ocorre como resultado de substituição do clinopiroxênio. A composição química da hornblenda apresenta conteúdos relativamente elevados de Al^{IV} , Al^{VI} , de Ti e de álcalis (Na + K) no sítio A, que indicam condições metamórficas de alto grau (Laird & Albee, 1981; Robinson et al., 1982; Spear, 1993). O conteúdo de Na + K no sítio A é relativamente sensível às mudanças de temperatura devido à troca edenítica ($Si = NaAlIV$). A presença de Na no sítio A é favorecida em condições de pressões mais elevadas. Os teores de Al no sítio octaédrico são favorecidos por condições metamórficas de aumento de pressão (Spear, 1993).

A granada é um mineral comum nos granulitos máficos que ocorrem entre as zonas de cisalhamento Varginha e Campos Gerais. Embora a composição da química mineral da granada seja controlada pela composição de rocha total, os cristais de granada exibem características químicas gerais semelhantes em todos os perfis composicionais analisados. Na maioria das amostras analisadas, os perfis composicionais são mais retos e homogêneos nas porções centrais, com pequenas modificações químicas em direção às bordas dos cristais. A ausência de zoneamento composicional químico nítido tem sido atribuída à homogeneização por difusão intragranular em condições de alto grau metamórfico ($T > 750^{\circ}C$), o que reduz o zoneamento químico do mineral (Tracy et al., 1976; Yardley, 1977; Spear, 1993; Carlson & Schwarze, 1997; entre outros).

O plagioclásio apresenta extinção ondulante e feições de recristalização (poligonização) e recuperação. Em alguns termos mais deformados, o plagioclásio ocorre lenticularizado e alongado na trama da rocha, indicando que os cristais foram recristalizados e que ocorreu migração dos limites e dissolução durante a deformação. As feições texturais observadas são comuns em condições de altas temperaturas, em fácies anfibolito superior a granulito ($> 700^{\circ}C$) (Olsen & Kohlstedt, 1985; Pryer, 1993; Kruse & Stünitz, 1999; Passchier & Trouw, 2005).

A escapolita (meionita) exhibe feições texturais de recristalização com poligonização (textura de equilíbrio), sugerindo que estava presente na paragênese do pico metamórfico, associada ao plagioclásio. A presença de escapolita cálcica em equilíbrio mineralógico com plagioclásio é comum em condições de altas temperaturas e pressões em fácies anfibolito superior a granulito

(Lovering & White, 1969; Goldsmith et al., 1974; Newton & Goldsmith, 1975; Goldsmith & Newton, 1977; Rebert & Rice, 1997; Deer et al., 2004). O elevado teor de SO_3 observado em muitos cristais de escapolita analisados, que em algumas amostras apresentam conteúdos superiores a 6% peso, é frequentemente associado a condições de elevado grau metamórfico (Goldsmith et al., 1974).

A biotita, quando presente, é produto de reações retrometamórficas, entretanto a composição química do mineral apresenta altos teores de XMg, Al^{IV} e Ti, que é congruente com condições de alto grau metamórfico (Guidotti, 1984).

É comum ocorrer quartzo nos granulitos máficos da área de estudo. O quartzo exhibe feições de recristalização e recuperação, com forte migração de limites, formas alongadas, frequentemente formando *ribbons*, com limites lobulados e variados graus de extinção ondulante, indicando condições de temperaturas mínimas da ordem de $700^{\circ}C$ (Hirth & Tullis, 1992; Stipp et al., 2002; Passchier & Trouw, 2005; entre outros). A presença de quartzo é comum em paragêneses de granulitos máficos de alta pressão (associado com granada + clinopiroxênio) (Zhao, 2021).

Vários estudos associam a ocorrência de acículas/lamelas de rutilo em granada (orientadas segundo sua estrutura) como produto de exsolução, indicativo de condições de metamorfismo de ultra alta pressão. A ocorrência deste tipo de textura foi descrita em algumas rochas submetidas a condições metamórficas de alta a ultra alta pressão, e também em rochas mantélicas, como peridotitos e piroxenitos (Zhang & Liou, 1999; Zhang et al., 2003; Hwang et al., 2007; Ague & Eckert Jr, 2012). A presença de acículas de rutilo em granada arrançadas nos planos cristalográficos do mineral indica reações de exsolução durante os estágios de reequilíbrio a partir de condições de pressões mais altas. Esta textura também foi descrita em rochas metassedimentares que ocorrem entre as zonas de cisalhamento Varginha e Campos Gerais (Leme, 2023; Leme et al., 2023).

As condições $P-T$ calculadas por geotermobarometria otimizada (média $P-T$ no *THERMOCALC*) e por geotermometria de elementos traços (termômetros Zr-em-rutilo e Ti-em-quartzo) para rochas metassedimentares, ortoderivadas quartzo-feldspáticas e metamáficas que ocorrem entre as zonas de cisalhamento Varginha e Campos Gerais (Leme, 2019, 2023) se distribuem dentro

do campo das fácies granulito a anfibolito superior (Figura 8), no campo de estabilidade da cianita, balizadas entre 700-850°C e 10-13,5 kbar, indicando condições metamórficas mínimas que essas rochas atingiram (associadas ao estágio de reequilíbrio metamórfico). Condições P - T entre 850-900°C e 14,0-15,0 kbar sugerem maior proximidade do pico metamórfico para área de estudo, em fácies granulito de alta pressão (Leme, 2019, 2023), congruentes com as paragêneses, características químicas e microtexturas

descritas nos granulitos máficos deste trabalho.

Os dados apresentados para os granulitos máficos da porção meridional da PSA também são compatíveis com as condições termobarométricas calculadas por Del Lama (1993) e Del Lama et al. (1994), que indicaram temperaturas da ordem de 830-900°C e pressões de 12,5-15 kbar no auge metamórfico e reequilíbrio em torno de 700-750°C e 11,8-12,1 kbar; e também com as condições P - T mínimas estimadas por Zanardo (1992) para essa faixa de rochas (Figura 8).

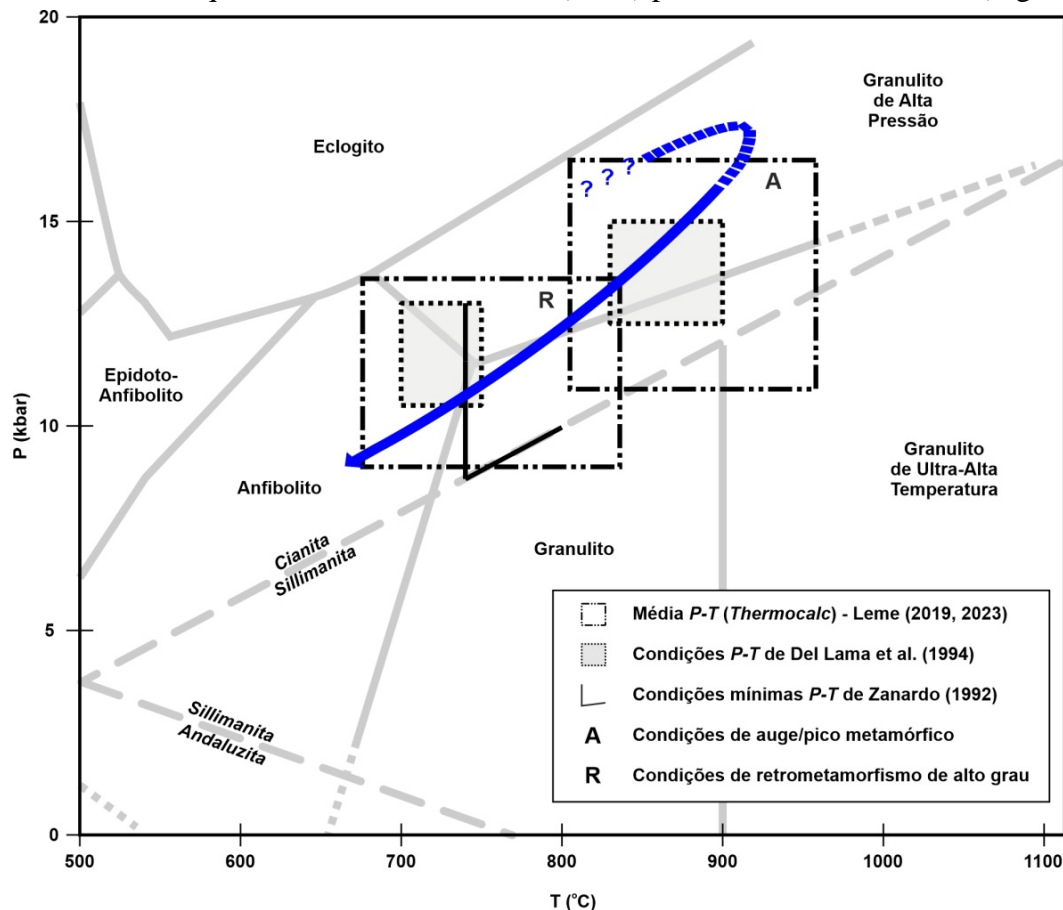


Figura 8 - Diagrama P - T mostrando os intervalos das condições de pressão e temperatura de rochas que ocorrem na Paleozona de Sutura de Alterosa. A seta indica trajetória metamórfica horária. Grades petrogenéticas com fácies metamórficas segundo Oh e Liou (1998). Os campos de estabilidade dos polimorfos Al_2SiO_5 seguem Holdaway (1971).

CONCLUSÕES

Os aspectos mineralógicos e texturais, associados aos resultados de química mineral apresentados para os granulitos máficos, indicam pico metamórfico em fácies granulito de alta pressão, cujas paragêneses foram desenvolvidas anteriormente à foliação principal (S_n), relacionadas à duplicação crustal durante a colisão continental (entre o paleocontinente Paranapanema e do cráton do São Francisco).

As paragêneses de pico metamórfico foram progressivamente superpostas por associações minerais do reequilíbrio metamórfico, que catalisou reações regressivas em condições de fácies

granulito a anfibolito superior durante o desenvolvimento da foliação principal. Essa foliação (S_n) é representada por intensa deformação dúctil, com lenticularização dos minerais, forte achatamento, recristalização e orientação dos minerais (em níveis crustais intermediários a profundos). O desenvolvimento da foliação principal é acompanhado por descompressão quase isotérmica, que parece ter sido dominante no início do processo, e na sequência ocorreu diminuição conjunta de temperatura e pressão, dentro do campo de estabilidade da cianita. A “intensidade” das reações regressivas do reequilíbrio meta-

mórfico aparenta ser diferente de amostra para amostra, dependente da mobilidade química de cada elemento envolvido no processo da reação metamórfica e da partição da deformação.

Os dados metamórficos sugerem trajetória metamórfica com sentido horário, compatíveis com regime *P-T* típico de zonas de espessamento crustal (colisão continental).

A presença predominante de rochas metassedimentares com intercalações de rochas metamáficas, rochas ortoderivadas quartzo-feldspáticas, com lentes de rochas metaultramáficas, intensamente deformadas, sugere a hipótese que esta faixa que ocorre entre as zonas de cisalhamento Varginha e Campos Gerais corresponda a parte de uma *mélange* tectônica.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- AGUE, J.J. & ECKERT JR, J.O. Precipitation of rutile and ilmenite needles in garnet: Implications for extreme metamorphic conditions in the Acadian Orogen, USA. **American Mineralogist**, v. 97, n. 5-6, p. 840-855, 2012.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; DAVINO, A.; HARALYI, N.L.E. Informações geofísicas sobre o oeste mineiro e seu significado geofísico. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 52, n. 1, p. 49-60, 1980.
- BRAGA, I.F. & EBERT, H.D. Análise estrutural e deformacional em zonas de cisalhamento de baixo mergulho e transcorrentes associadas a Zona de Sutura Alterosa, na região de Cristina e Itajubá-MG. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n. 3, p. 413-425, 2006.
- BROWN, M. Metamorphic conditions in orogenic belts: a record of secular change. **International Geology Review**, v. 49, n. 3, p. 193-234, 2007.
- CARLSON, W. & SCHWARZE, E. Petrological significance of prograde homogenization of growth zoning in garnet: an example from the Llano Uplift. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 15, n. 5, p. 631-644, 1997.
- CAVALCANTE, J.C.; CUNHA, H.C.; CHEREGATI, L.A.; KAEFER, L.Q.; ROCHA, J.M.; DAITX, E.C.; COUTINHO, M.G.N.; HAMA, M.; YAMAMOTO, K.; DRUMOND, J.B.V.; ROSA, D.B.; RAMALHO, R. **Projeto Sapucaí: Relatório Final – Geologia** – Vol. 1. Brasília: DNPM/CPRM, 615 p., 1977.
- CHETTY, T.R.K. **Proterozoic orogens of India: A critical window to Gondwana**. India: Elsevier, 405 p., 2017.
- CHETTY, T.R.K.; SANTOSH, M.; TSUNOGAE, T. Suture zones and geodynamic processes. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 42, n.3, p. 155-157, 2011.
- CHETTY, T.R.K.; YELLAPPA, T.; SANTOSH, M. Crustal architecture and tectonic evolution of the Cauvery Suture Zone, southern India. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 130, p. 166-191, 2016.
- CHOPIN, C. Ultrahigh-pressure metamorphism: tracing continental crust into the mantle. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 212, n. 1-2, p. 1-14, 2003.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. **Rock-forming minerals. Single-chain silicates** – vol. 2A. 2 ed. London: The Geological Society Publishing House, 668 p., 1997.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. **Rock-forming minerals. Framework silicates: silica minerals, feldspathoids and the zeolites** – vol. 4B. Londres: The Geological Society Publishing House, 982 p., 2004.
- DEL LAMA, E.A. **Petrologia das rochas metamórficas de alto grau do Complexo Campos Gerais e correlação com as do Complexo Varginha-Guaxupé: Estudos termobarométricos**. Rio Claro, 1993. 132 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- DEL LAMA, E.A.; OLIVEIRA, M.A.F.; ZANARDO, A. Geotermobarometria em rochas do Complexo Campos Gerais ao norte da Zona de Cisalhamento Varginha. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 4, p. 1-7, 1994.
- EBERT, H.D. & HASUI, Y. Transpressional tectonics and partitioning during oblique collision between three plates in Pré-cambrian of southeast Brazil. In: HOLDSWORTH, R.E.; STRACHAN, R.A.; DEWEY, J.F. (Editors). **Continental transpressional and transtensional tectonics**. London: Geological Society, p. 231-252, 1998.
- FONSECA, M.J.G.; SILVA, Z.C.G.; CAMPOS, D.A.; TOSATTO, P. **Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo – Folhas Rio de Janeiro (SF.23), Vitória (SF.24) e Iguape (SG.23)**. Texto Explicativo. Brasília: MME/DNPM, 240 p., 1979.
- GOLDSMITH, J.R. & NEWTON, R.C. Scapolite-plagioclase stability relations at high pressures and temperatures in the system NaAlSi₃O₈-CaAl₂Si₂O₈-CaCO₃-CaSO₄. **American Mineralogist**, v. 62, n. 11-12, p. 1063-1081, 1977.
- GOLDSMITH, J.R.; NEWTON, R.C.; MOORE, P.B. Silicate-nitrate compounds: High-pressure synthesis and stability of a nitrate scapolite. **American Mineralogist**, v. 59, n. 7-8, p. 768-774, 1974.
- GREEN, D.H. & RINGWOOD, A.E. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 31, n. 5, p. 767-833, 1967.
- GUIDOTTI, C.V. Micas in metamorphic rocks. In: BAILEY, S.W. (Editor). **Micas**. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Mineralogical Society of America, Washington, D.C., v. 13, n. 1, p. 357-467, 1984.
- HARALYI, N.L.E. & HASUI, Y. The gravimetric information and the Archean-Proterozoic structural framework of Eastern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 12, n. 1-3, p. 160-166, 1982.
- HARALYI, N.L.E.; HASUI, Y.; MIOTO, J.A.; HAMZA, V.M.; RODRIGUES, C.R.V. Ensaio sobre a estruturação crustal do Estado de Minas Gerais com base na informação geofísica e geológica. Contribuições à Geologia e à Petrologia. **Boletim Especial...** Sociedade Brasileira de Geologia -MG, p. 71-93, 1985.
- HIRTH, G. & TULLIS, J.A.N. Dislocation creep regimes in quartz aggregates. **Journal of Structural Geology**, v. 14, n. 2, p. 145-159, 1992.
- HWANG, S.L.; YUI, T.F.; CHU, H.T.; SHEN, P.; SCHERTL, H.P.; ZHANG, R.Y.; LIU, J.G. On the origin of oriented rutile needles in garnet from UHP eclogites. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 25, n. 3, p. 349-362, 2007.
- KRUSE, R.; STÜNITZ, H. Deformation mechanisms and phase distribution in mafic high-temperature mylonites from the Jotun Nappe, southern Norway. **Tectonophysics**, v. 303, n. 1-4, p.

- 223-249, 1999.
- LAIRD, J. & ALBEE, A.L. Pressure, temperature, and time indicators in mafic schist; their application to reconstructing the polymetamorphic history of Vermont. **American Journal of Science**, v. 281, n. 2, p. 127-175, 1981.
- LEAKE, B.E., WOOLLEY, A.R.; ARPS, C.E.S.; BIRCH, W.; GILBERT, M.C.; HAWTHORNE, F.C.; GRICE, J.D.; KATO, A.; KISCH, H.; KRIVOVICHEV, V.; LINTHOUT, K.; LAIRD, J.; MANDARINO, J.A.; MARESCH, W.; NICKEL, E.; ROCK, N.M.S.; SCHUMACHER, J.C.; SMITH, D. C.; STEPHENSON, N.C.N.; UNGARETTI, E.J.W.; YOUZHI, G. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. **The Canadian Mineralogist**, v. 35, p. 219-246, 1997.
- LEME, T.G. **Petrografia e geoquímica da ocorrência de (clinopiroxênio)- hastingsita-biotita-granada ortognaisse na região de Santa Cruz Do Prata – MG**. Rio Claro, 2016. 87 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- LEME, T.G. **Geotermobarometria das rochas do Grupo Araxá e do Complexo Guaxupé na região de Guaxupé-Nova Resende, MG**. Rio Claro, 2019. 175 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- LEME, T.G. **A Paleozona de Sutura de Alterosa entre as zonas de cisalhamento Varginha e Campos Gerais (SW do estado de Minas Gerais): Metamorfismo de fácies granulito de alta pressão**. Rio Claro, 2023. 360 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- LEME, T.G.; NAVARRO, G.R.B.; ZANARDO, A.; MONTIBELLER, C.C. Petrografia, química mineral e geotermobarometria de retroeclogito no Grupo Araxá na região da Zona de Cisalhamento Varginha, sudoeste de Minas Gerais. **Geociências**, v. 38, n. 2, p. 279-313, 2019.
- LEME, T.G.; NAVARRO, G.R.B.; ZANARDO, A.; LIMA, F.G.; MONTIBELLER, C.C. Caracterização e evolução de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse na região da Zona de Paleozona de Alterosa, porção sul do Orógeno Brasília Meridional. **Geociências**, v. 39, n. 3, p. 585-608, 2020.
- LEME, T.G.; ZANARDO, A.; NAVARRO, G.R.B. Características petrográficas dos metassedimentos do Grupo Araxá na região da Paleozona de Sutura de Alterosa: cinturão granulítico de alta pressão. **Geociências**, v. 42, n. 4, p. 377 - 396, 2023.
- LIMA, F.G. **Evolução petrogenética das rochas máficas/ultramáficas na área ao sul do Craton São Francisco, entre as cidades de Fortaleza de Minas e Jacuí-MG**. 2014. 102 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- LOVERING, J.F. & WHITE, A.J.R. Granulitic and eclogitic inclusions from basic pipes at Delegate, Australia. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 21, n. 1, p. 9-52, 1969.
- MÖLLER, C.; MAJKA, J.; JANÁK, M.; VAN ROERMUND, H. High-and ultrahigh-pressure rocks—keys to lithosphere dynamics. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 36, n. 5, p. 511-515, 2018.
- MORALES, N. **Evolução tectônica do Cinturão de Cisalhamento Campo do Meio na sua porção ocidental**. Rio Claro, 1993. 2 v. Tese (Doutorado em Geologia Regional) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- NEWTON, R.C. & GOLDSMITH, J.R. Stability of the scapolite meionite ($3\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot \text{CaCO}_3$) at high pressures and storage of CO_2 in the deep crust. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 49, n. 1, p. 49-62, 1975.
- O'BRIEN, P.J. & RÖTZLER, J. High-pressure granulites: formation, recovery of peak conditions and implications for tectonics. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 21, n. 1, p. 3-20, 2003.
- OLSEN, T.S. & KOHLSTEDT, D.L. Natural deformation and recrystallization of some intermediate plagioclase feldspars. **Tectonophysics**, v. 111, n. 1-2, p. 107-131, 1985.
- PASSCHIER, C.W. & TROUW, R.A.J. **Microtectonics**. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 366 p., 2005.
- PRYER, L.L. Microstructures in feldspars from a major crustal thrust zone: the Grenville Front, Ontario, Canada. **Journal of Structural Geology**, v. 15, n. 1, p. 21-36, 1993.
- REBBERT, C.R. & RICE, J.M. Scapolite-plagioclase exchange: Cl-CO_3 scapolite solution chemistry and implications for peristerite plagioclase. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 61, n. 3, p. 555-567, 1997.
- ROBINSON, P.; SPEAR, F.S.; SCHUMACHER, J.C.; LAIRD, J.; KLEIN, C.; EVANS, B.W.; DOOLAN, B.L. Phase relations of metamorphic amphiboles: Natural occurrences and theory. In: VEBLEN, D.R.; RIBBE, P.H. (eds.). **Reviews in Mineralogy**. v. 9B, p. 1-227, 1982.
- ROIG, H.L. **Caracterização da “Zona de Sutura” Jacuí-Conceição da Aparecida, MG – Limite norte do Cinturão Alto Rio Grande: Implicações geotectônicas e metalogenéticas**. 1993. 141 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- SOARES, P.C.; FIORI, A.P.; CARVALHO, S.G. Tectônica colisional oblíqua entre o Bloco Paraná e a margem sul do Cráton São Francisco, no Maciço de Guaxupé. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, n. 36, 1990, Natal, RN. **Anais...Natal: Sociedade Brasileira de Geologia**, 1990. v. 6, p. 2723-2734.
- SOARES, P.C.; CARVALHO, S.G.; FIORI, A.P. Evolução tectônica dos terrenos máfico-ultramáficos na margem sul do Cráton do São Francisco. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, n. 3, 1991, Rio Claro, SP. **Boletim...Rio Claro: Sociedade Brasileira de Geologia**, 1991, p. 66-68.
- SPEAR, F.S. **Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths**. Washington: Mineralogical Society of America, 789 p., 1993.
- STIPP, M.; STÜNITZ, H.; HEILBRONNER, R.; SCHMID, S.M. Dynamic recrystallization of quartz: correlation between natural and experimental conditions. Geological Society, London, **Special Publications**, v. 200, n. 1, p. 171-190, 2002.
- TRACY, R.J.; ROBINSON, P.; THOMPSON, A.B. Garnet composition and zoning in the determination of temperature and pressure of metamorphism, central Massachusetts. **American Mineralogist**, v. 61, p. 762-775, 1976.
- VINOGRAD, V. L.; GALE, J. D.; WINKLER, B. Thermodynamics of mixing in diopside-jadeite, $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ - $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$, solid solution from static lattice energy calculations. **Physics and Chemistry of Minerals**, v. 34, p. 713-725, 2007.
- YARDLEY, B.W.D. An empirical study of diffusion in garnet. **American Mineralogist**, v. 62, n. 7-8, p. 793-800, 1977.
- ZANARDO, A. **Análise petrográfica, estratigráfica e microestrutural da região de Guaxupé-Passos-Delfinópolis - (MG)**. Rio Claro, 1992. 288 p. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- ZANARDO, A. **Pesquisa Geológica e de matérias primas cerâmicas do centro nordeste do Estado de São Paulo e vizinhanças – Sistematização crítica da produção Técnico - Científica**. 2003. 304 p. Tese (Livre Docência). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

- ZANARDO, A.; DEL LAMA, E.A.; MORALES, N.; OLIVEIRA, M.A.F. Geologia da porção limítrofe em os blocos São Paulo e Brasília. **Geociências**, v. 15, n. esp., p. 143-168, 1996.
- ZANARDO, A.; MORALES, N.; OLIVEIRA, M.A.F.; DEL LAMA, E.A. Tectono-lithologic associations of the Alterosa Paleo Suture Zone – Southeastern Brazil. **Revista UnG – Geociências**, v. 5, n. 1, p. 103-117, 2006.
- ZHANG, R.Y. & LIOU, J.G. Exsolution lamellae in minerals from ultrahigh-pressure rocks. **International Geology Review**, v. 41, n. 11, p. 981-993, 1999.
- ZHANG, R.Y.; ZHAI, S.M.; FEI, Y.W.; LIOU, J.G. Titanium solubility in coexisting garnet and clinopyroxene at very high pressure: the significance of exsolved rutile in garnet. **Earth Planetary Sciences Letter**, v. 216, n. 4, p. 591-601, 2003.
- ZHAO, G. Metamorphism of mafic rocks. In: ALDERTON, D. & ELIAS, S.A. (Eds). **Encyclopedia of Geology (2a Ed.)**. Oxford: Academic Press, p. 457-464, 2021.

*Submetido em 20 de fevereiro de 2024
Aceito para publicação em 15 de março de 2024*

Apêndice

Tabela A.1 - Análises químicas representativas por microsonda eletrônica de cristais de granada e proporção molecular dos cristais analisados. Os átomos por unidade de fórmula (a.p.u.f.) foram calculados na base de 24 oxigênios.

Análise	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
SiO ₂	39,08	39,37	39,84	39,40	39,43	39,47	39,34	39,44	39,72	39,20
TiO ₂	0,06	0,09	0,09	0,09	0,09	0,06	0,10	0,08	0,09	0,07
Al ₂ O ₃	22,05	22,33	22,46	22,28	22,36	22,05	22,29	22,33	22,11	22,26
Cr ₂ O ₃	0,10	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,06	0,06	0,10
Fe ₂ O ₃	1,10	0,96	0,15	0,78	1,29	0,40	1,36	1,00	0,48	1,24
FeO	21,59	20,77	21,12	20,52	20,45	20,93	20,10	20,11	20,94	20,80
MnO	0,53	0,55	0,50	0,48	0,52	0,51	0,50	0,48	0,54	0,48
MgO	9,56	10,13	10,15	10,15	10,26	10,27	10,23	10,32	10,22	10,05
CaO	5,89	6,06	6,17	6,25	6,11	5,84	6,34	6,37	6,02	5,99
Na ₂ O	0,02	0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03	0,01
K ₂ O	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Total	99,97	100,34	100,57	100,04	100,62	99,60	100,38	100,20	100,20	100,19
Si ⁴⁺	5,95	5,94	5,99	5,96	5,93	5,99	5,93	5,95	6,00	5,93
Al ^{IV}	0,05	0,06	0,01	0,04	0,07	0,01	0,07	0,05	0,00	0,07
Soma	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Al ^{VI}	3,91	3,92	3,97	3,93	3,90	3,94	3,89	3,92	3,93	3,90
Cr ³⁺	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Fe ³⁺	0,13	0,11	0,02	0,09	0,15	0,05	0,15	0,11	0,05	0,14
Ti ⁴⁺	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Soma	4,06	4,05	4,01	4,04	4,07	4,01	4,06	4,05	4,00	4,06
Mg ²⁺	2,17	2,28	2,27	2,29	2,30	2,32	2,3	2,32	2,3	2,27
Fe ²⁺	2,75	2,62	2,66	2,6	2,57	2,66	2,53	2,54	2,64	2,63
Ca ²⁺	0,96	0,98	0,99	1,01	0,99	0,95	1,02	1,03	0,97	0,97
Mn ²⁺	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,06	0,07	0,06
Na ⁺	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
K ⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Soma	5,95	5,95	5,98	5,97	5,94	6,00	5,92	5,95	5,99	5,93
% Alm	46	44	44	44	44	44	43	43	44	44
% Prp	37	38	38	38	39	39	39	39	39	38
% Grs	13	14	16	15	13	15	14	15	15	13
% Sps	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2
% And	3	3	1	2	4	2	4	3	1	4

Tabela A.2 - Análises químicas representativas por microsonda eletrônica de cristais de piroxênio. Os átomos por unidade de fórmula (a.p.u.f.) foram calculados na base para seis oxigênios.

Análise	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
SiO ₂	52,39	48,89	48,94	49,38	50,30	50,13	51,13	50,28	50,37	49,82	49,22	50,01
TiO ₂	0,13	0,27	1,01	0,87	0,50	0,57	0,50	0,51	0,53	0,57	0,61	0,62
Al ₂ O ₃	2,84	4,11	7,85	5,77	5,96	6,61	6,28	6,32	5,42	6,56	6,07	6,21
FeOT	6,61	12,87	6,99	7,84	10,25	10,86	10,35	9,72	11,00	11,33	9,44	9,85
Cr ₂ O ₃	0,26	0,03	0,05	0,08	0,01	0,03	0,01	0,00	0,02	0,01	0,06	0,06
MnO	0,07	0,28	0,09	0,08	0,05	0,06	0,06	0,06	0,08	0,10	0,03	0,06
MgO	14,64	9,86	11,87	12,11	10,34	10,21	10,30	10,75	10,36	9,28	11,74	11,22
CaO	22,38	22,11	21,36	22,41	20,07	18,79	19,59	20,83	20,73	19,51	20,75	20,73
Na ₂ O	0,51	0,65	1,35	0,88	1,86	1,78	2,11	1,72	1,66	2,13	1,32	1,40
K ₂ O	0,00	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	*	0,02	0,01
Total	99,83	99,07	99,51	99,45	99,35	99,06	100,35	100,20	100,16	99,31	99,26	100,17
Si	1,93	1,87	1,81	1,84	1,88	1,89	1,89	1,86	1,88	1,87	1,84	1,86
Al	0,07	0,13	0,19	0,16	0,12	0,11	0,11	0,14	0,12	0,13	0,16	0,14
Soma	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
M1Al	0,06	0,05	0,15	0,09	0,15	0,18	0,17	0,14	0,12	0,16	0,11	0,13
M1Ti	0,00	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
M1Fe ³⁺	0,03	0,11	0,08	0,08	0,08	0,03	0,07	0,09	0,10	0,09	0,12	0,08
M1Fe ²⁺	0,10	0,27	0,09	0,13	0,19	0,20	0,19	0,16	0,20	0,22	0,11	0,15
M1Cr	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M1Mg	0,81	0,56	0,66	0,67	0,58	0,57	0,57	0,59	0,58	0,52	0,65	0,62
M2Fe ²⁺	0,08	0,04	0,05	0,04	0,06	0,11	0,07	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07
M2Mn	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
M2Ca	0,89	0,91	0,85	0,90	0,81	0,76	0,78	0,83	0,83	0,79	0,83	0,82
M2Na	0,04	0,05	0,10	0,06	0,14	0,13	0,15	0,12	0,12	0,16	0,10	0,10
M2K	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Soma	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00

Tabela A.3 - Análises químicas representativas por microsonda eletrônica de cristais de anfibólio. Os átomos por unidade de fórmula (a.p.u.f.) foram calculados na base de 23 oxigênios.

Análise	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
SiO ₂	45,37	42,31	41,58	41,10	40,61	40,86	40,46	41,55	41,16	40,99	43,70	43,53
TiO ₂	0,47	0,43	2,43	2,56	2,27	2,81	2,84	2,76	1,60	1,61	1,87	1,71
Al ₂ O ₃	10,59	14,09	12,29	12,36	12,75	13,36	15,18	14,54	13,89	13,93	12,87	12,58
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,13	0,07	0,03	0,03	0,14	0,08	0,02	0,04	0,03	0,17
FeOT	15,40	15,96	14,24	13,97	15,41	14,57	11,65	11,45	15,44	15,44	11,04	11,35
MnO	0,19	0,12	0,02	0,03	0,05	0,04	0,06	0,08	0,24	0,26	0,06	0,02
MgO	11,77	9,83	11,48	11,35	10,19	10,42	11,36	12,14	10,39	10,30	13,47	13,21
CaO	11,60	11,95	11,58	11,47	11,35	11,07	11,55	11,45	11,43	11,48	11,52	11,44
Na ₂ O	1,29	1,40	1,82	1,75	1,99	2,17	2,41	2,54	1,47	1,51	1,44	1,37
K ₂ O	0,16	0,43	1,57	1,87	1,59	1,86	0,89	0,91	1,48	1,52	1,20	1,24
Total	96,85	96,52	97,14	96,54	96,24	97,17	96,53	97,49	97,12	97,08	97,21	96,61
Si	6,75	6,37	6,25	6,23	6,21	6,16	6,04	6,12	6,21	6,19	6,41	6,43
Al ^{IV}	1,25	1,63	1,75	1,77	1,79	1,84	1,97	1,88	1,79	1,81	1,59	1,57
Soma	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al ^{VI}	0,61	0,87	0,43	0,44	0,51	0,54	0,70	0,65	0,68	0,67	0,63	0,62
Ti ⁴⁺	0,05	0,05	0,27	0,29	0,26	0,32	0,32	0,31	0,18	0,18	0,21	0,19
Cr ³⁺	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02
Mg ²⁺	2,61	2,21	2,57	2,56	2,32	2,34	2,53	2,67	2,34	2,32	2,94	2,91
Fe ²⁺	1,70	1,86	1,70	1,70	1,90	1,79	1,43	1,36	1,78	1,79	1,21	1,25
Mn ²⁺	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,00
Soma	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Fe ²⁺	0,22	0,16	0,09	0,07	0,07	0,05	0,03	0,05	0,17	0,16	0,15	0,15
Ca ²⁺	1,78	1,85	1,87	1,86	1,86	1,79	1,85	1,81	1,83	1,84	1,81	1,81
Na ⁺			0,04	0,06	0,07	0,17	0,13	0,14			0,05	0,04
Soma	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Ca ²⁺	0,07	0,08							0,02	0,02		
Na ⁺	0,37	0,41	0,49	0,45	0,52	0,47	0,57	0,59	0,43	0,44	0,37	0,35
K ⁺	0,03	0,08	0,30	0,36	0,31	0,36	0,17	0,17	0,29	0,29	0,23	0,23
Soma	0,47	0,57	0,79	0,81	0,83	0,83	0,74	0,76	0,73	0,75	0,59	0,59

Tabela A.4 - Análises químicas representativas por microsonda eletrônica de cristais de plagioclásio. Os átomos por unidade de fórmula (a.p.u.f.) foram calculados na base de oito oxigênios.

Análise	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
SiO ₂	56,03	55,76	56,65	56,17	58,92	58,85	58,17	57,46	48,47	49,05	49,47	49,10
TiO ₂	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	28,53	28,55	27,93	28,34	26,48	25,90	26,70	26,60	33,31	32,82	32,86	32,91
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	0,06	0,06	0,03	0,07	0,05	0,04	0,06	0,00	0,25	0,20	0,18	0,24
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
BaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,01	0,06	0,03	0,04	0,00
CaO	9,73	10,11	9,31	9,52	7,53	7,21	7,85	8,14	15,64	14,65	14,74	14,99
Na ₂ O	5,95	5,76	6,18	6,08	6,88	7,12	6,80	6,58	2,67	2,97	3,04	2,85
K ₂ O	0,11	0,10	0,09	0,09	0,42	0,54	0,42	0,45	0,04	0,06	0,06	0,05
Total	100,40	100,34	100,19	100,27	100,25	99,70	100,02	99,26	100,45	99,78	100,37	100,16
Si	2,51	2,50	2,54	2,51	2,62	2,64	2,60	2,59	2,21	2,24	2,25	2,24
Al	1,50	1,51	1,47	1,50	1,39	1,37	1,41	1,41	1,79	1,77	1,76	1,77
Soma	4,01	4,01	4,01	4,01	4,01	4,01	4,01	4,01	4,00	4,01	4,01	4,01
Fe ³⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
Ti ⁴⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr ³⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg ²⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mn ²⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ba ²⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca ²⁺	0,47	0,49	0,45	0,46	0,36	0,35	0,38	0,39	0,76	0,72	0,72	0,73
Na ⁺	0,52	0,50	0,54	0,53	0,59	0,62	0,59	0,58	0,24	0,26	0,27	0,25
K ⁺	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Soma	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	1,00	0,99	1,00	1,01	0,99	1,00	1,00
Soma	5,00	5,00	5,00	5,00	4,99	5,00	5,00	5,00	5,01	5,00	5,00	5,00
Ab	52	50	54	53	61	62	60	58	24	27	27	26
An	47	49	45	46	37	35	38	40	76	73	73	74
Or	1	1	0	1	2	3	2	3	0	0	0	0

Tabela A.5 - Análises químicas representativas por microsonda eletrônica de cristais de escapolita. Os átomos por unidade de fórmula (a.p.u.f.) foram calculados para 12 (Si, Al).

Análise	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
SiO ₂	45,97	45,99	45,34	45,52	45,56	44,42	44,88	44,35	44,58	44,50
TiO ₂	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Al ₂ O ₃	26,72	26,65	27,61	27,40	27,35	27,83	27,91	27,86	27,97	27,64
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ₂ O ₃	0,08	0,13	0,13	0,13	0,12	0,07	0,11	0,14	0,14	0,09
MnO	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	0,02	0,03	0,05	0,03	0,05	0,01	0,02	0,02	0,03	0,00
CaO	16,54	16,87	17,88	17,48	17,70	18,29	18,39	18,26	18,52	17,91
Na ₂ O	3,96	3,78	3,29	3,42	3,44	3,01	2,92	2,75	2,84	3,16
K ₂ O	0,03	0,03	0,02	0,05	0,04	0,04	0,06	0,06	0,07	0,06
SO ₃	6,49	6,58	3,46	4,30	4,14	1,13	0,85	0,98	0,64	2,33
Total	93,33	93,50	94,36	94,06	94,29	94,79	95,13	94,40	94,80	95,69
Si	7,14	7,14	7,00	7,04	7,03	6,92	6,95	6,94	6,92	6,94
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	4,89	4,88	5,02	5,00	4,98	5,11	5,09	5,14	5,12	5,08
Cr ²⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe ³⁺	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
Mn ²⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg ²⁺	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Ca ²⁺	2,75	2,81	2,96	2,90	2,93	3,05	3,05	3,06	3,08	3,00
Na ⁺	1,19	1,14	0,99	1,03	1,03	0,91	0,88	0,83	0,86	0,96
K ⁺	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Soma	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
% Me	70	71	75	74	74	77	78	79	78	76

Tabela A.6 - Análises químicas representativas por microsonda eletrônica de cristais de biotita. Os átomos por unidade de fórmula (a.p.u.f.) foram calculados na base de 22 oxigênios.

Análise	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
SiO ₂	35,98	37,04	36,87	36,21	36,33	36,11	36,15	36,65
TiO ₂	3,49	3,07	2,59	5,15	5,31	5,54	5,52	5,68
Al ₂ O ₃	15,70	15,67	16,79	15,33	15,47	15,37	15,50	15,42
Cr ₂ O ₃	0,05	0,06	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
FeO	11,58	11,15	12,76	12,85	12,96	12,97	12,84	12,96
MnO	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
MgO	15,76	16,80	15,03	14,27	14,58	14,33	14,47	14,47
CaO	0,04	0,09	0,01	0,00	0,01	0,04	0,04	0,00
Na ₂ O	0,04	0,06	0,02	0,03	0,02	0,13	0,04	0,02
K ₂ O	9,51	9,51	8,88	9,47	9,57	9,58	9,42	9,59
Cl	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03
Total	92,17	93,50	93,01	93,37	94,31	94,13	94,04	94,84
Si	5,48	5,54	5,55	5,48	5,45	5,43	5,43	5,46
Al ^{IV}	2,52	2,46	2,45	2,52	2,55	2,57	2,57	2,54
Soma	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Al ^{VI}	0,30	0,30	0,53	0,21	0,18	0,16	0,18	0,17
Ti ⁴⁺	0,40	0,35	0,29	0,59	0,60	0,63	0,62	0,64
Cr ³⁺	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Mg ²⁺	3,58	3,74	3,37	3,22	3,26	3,21	3,24	3,21
Fe ²⁺	1,48	1,40	1,61	1,63	1,63	1,63	1,61	1,61
Mn ²⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Soma	5,77	5,80	5,81	5,65	5,67	5,63	5,66	5,64
Ca ²⁺	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Na ⁺	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,04	0,01	0,00
K ⁺	1,85	1,81	1,71	1,83	1,83	1,84	1,81	1,82
Soma	1,87	1,84	1,71	1,84	1,84	1,88	1,82	1,83
Soma	15,63	15,64	15,52	15,48	15,51	15,51	15,48	15,46
X _{Mg}	0,71	0,73	0,68	0,66	0,67	0,66	0,67	0,67