

CARACTERIZAÇÃO E EVOLUÇÃO DE HEDENBERGUITA-HASTINGSITA-BIOTITA-GRANADA ORTOGNAISSE NA REGIÃO DA ZONA DE PALEO-SUTURA DE ALTEROSA, PORÇÃO SUL DO ORÓGENO BRASÍLIA MERIDIONAL

CHARACTERIZATION AND EVOLUTION OF HEDENBERGITE-HASTINGSITE-BIOTITE-GARNET ORTHOGNEISS IN THE REGION OF THE ALTEROSA PALEO-SUTURE ZONE, SOUTHERN PORTION OF SOUTHERN BRASÍLIA OROGEN

Thaís Güitzlaf LEME¹, Guillermo Rafael Beltran NAVARRO², Antenor ZANARDO², Filipe Goulart LIMA³, Cibele Carolina MONTIBELLER¹

¹Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Departamento de Geologia, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro. E-mail: thaís.g.leme@unesp.br; cibele.cm@outlook.com

²Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Departamento de Geologia, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro. guillermo.navarro@unesp.br; antenor.zanardo@unesp.br

³Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Campus de Monte Carmelo. E-mail: filipe.lima@ufu.br

Introdução
Contexto Geológico Regional
Métodos Analíticos
Resultados e Discussões
Aspectos de Campo
Petrografia e Química Mineral
Geoquímica
Termobarometria
Idade Modelo
Metamorfismo e Evolução
Considerações Finais
Agradecimentos
Referências

RESUMO - No sudoeste do estado de Minas Gerais, região do distrito de Santa Cruz do Prata, inserido num contexto de rochas de alta pressão atribuídas ao Grupo Araxá, na porção sul do Orógeno Brasília Meridional, foi registrada a ocorrência de um corpo de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse, cuja associação mineral é pouco comum. Neste trabalho são apresentados dados de petrografia, química mineral, geoquímica, geotermobarometria e idade modelo da ocorrência. O ortognaisse configura um corpo lenticular, orientado segundo a direção E-W, paralelo à direção das zonas de cisalhamento regionais. Apresenta estrutura isotrópica a anisotrópica, podendo exibir domínios bem mais foliados e orientados, em consequência do maior grau de deformação. A associação mineral presente nas porções menos deformadas (andesina + ortoclásio + quartzo + granada + hedenberguita), as feições texturais e petrológicas em consonância com os dados químicos e isotópicos, sugerem um protólito de origem ígnea de idade paleoproterozoica, metamorfozido em fácies granulito (alta pressão). As condições de pressão e temperatura calculadas (em torno 11,0-10,5 kbar e 750-700°C) correspondem ao reequilíbrio metamórfico regional. Os dados geoquímicos indicam características semelhantes à de rochas geradas em arcos magmáticos.

Palavras-chave: Faixa Brasília, Grupo Araxá, Cinturão de Cisalhamento Campo do Meio, Fácies granulito.

ABSTRACT - In the southwest of Minas Gerais state, Santa Cruz do Prata district region, inserted in a context of high-pressure rocks attributed to the Araxá Group, in the southern portion of the Southern Brasília Orogen, an occurrence of hedenbergite-hastingsite-biotite-garnet orthogneiss body was recorded, whose mineral association is uncommon. This paper presents petrography, mineral chemistry, geochemistry, geothermobarometry, and model age data of the occurrence. The orthogneiss configures a lenticular body, oriented according to the E-W direction, parallel to the direction of the regional shear zones. It has isotropic to anisotropic structure and it can show much more foliated and oriented domains, as result of the greater degree of deformation. The mineral association present in the less deformed portions (andesine + orthoclase + quartz + garnet + hedenbergite), the textural and petrological features in line with the chemical and isotopic data, suggest a paleoproterozoic igneous protolith, metamorphosed into granulite facies (high pressure). The calculated pressure and temperature conditions (around 11.0-10.5 kbar and 750-700°C) correspond to the regional metamorphic re-equilibration. Geochemical data indicate characteristics similar to rocks generated in magmatic arcs.

Keywords: Brasília Belt, Araxá Group, Campo do Meio Shear Belt, Granulite facies.

INTRODUÇÃO

Orógenos colisionais são resultantes de processos tectônicos que sujeitam as rochas da crosta continental a metamorfismo, anatexia e deformação. As raízes de antigos orógenos são importantes registros de processos colisionais, e podem ser utilizadas como as principais fontes de informação de porções profundas da crosta para a compreensão da evolução geológica em regimes de margens convergentes (Pauly et al., 2016).

Rochas de alta pressão (*High Pressure - HP*) são normalmente descritas em zonas internas de orógenos colisionais, e ocorrem em equilíbrio com elevadas condições de pressão e temperatura. Essas rochas representam remanescentes de zonas de espessamento crustal em ambientes de zonas de subdução e arcos continentais ou de duplicação crustal em uma colisão continental, compatíveis com o ambiente de crosta continental profunda (Harley, 1989, 1998; Bohlen, 1991; O'Brien & Rötzler, 2003; Carswell & Compagnoni, 2003; Chopin, 2003; Kelsey, 2008; Brown, 2009, 2014; Liou et al., 2009, 2014; Pauly et al., 2016; Zheng & Chen, 2017).

No sudoeste do estado de Minas Gerais, região do distrito de Santa Cruz do Prata, foi descrita uma faixa de rochas de alta pressão

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A área de estudo está localizada no sudoeste do estado de Minas Gerais, a nordeste de Santa Cruz do Prata, distrito do município de Guaranésia. Situa-se na porção sul da Província Estrutural Tocantins (Almeida, 1967), na parte sul da Faixa Brasília Meridional (Almeida, 1977), próximo ao contato entre o Complexo Guaxupé (a sul), e rochas correlacionadas ao Grupo Araxá (a norte), na região do Cinturão de Cisalhamento Campo do Meio (Cavalcante et al., 1979; Zanardo, 1992; Morales, 1993) (Figura 1).

Nesta região são reconhecidas unidades litoestratigráficas que compõem dois blocos crustais justapostos, a norte o Cráton do São Francisco, e a sul, o Bloco ou Placa Paranapanema, amalgamados durante a orogênese brasileira no Neoproterozoico (Almeida et al., 1980; Haralyi & Hasui, 1982; Haralyi et al., 1985; Hasui, 2010; Valeriano, 2017).

Os limites dos blocos são definidos por grandes descontinuidades gravimétricas (anomalias tipo *Bouguer*) e correspondem a uma faixa de deformação intensa, que define a Zona de Paleo-Sutura de Alterosa, representada por litotipos atribuídos ao Grupo Araxá (Almeida et al., 1980; Haralyi & Hasui, 1982; Haralyi et al., 1985; Zanardo, 1992; Morales, 1993; Malagutti Filho et al., 1996; Zanardo et al., 1996, 2006; Hasui, 2010; Valeriano, 2017).

O Grupo Araxá nessa região, atribuído por outros autores, como Cavalcante et al. (1979) ao Complexo Campos Gerais e por Trouw et al. (1984) ao Grupo Andrelândia, aflora como uma faixa estruturada segundo a direção E-W a WNW-ESE, a norte da exposição do Complexo Guaxupé

atribuídas ao Grupo Araxá (Zona de Paleo-Sutura de Alterosa), na porção sul da Faixa Brasília Meridional (Zanardo, 1992, 2003; Del Lama, 1993; Del Lama et al., 1994; Zanardo et al., 2006; Leme, 2019; Leme et al., 2019). Inserido neste contexto, foi registrada a ocorrência de um corpo de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse (Leme, 2016), cuja associação mineral é pouco comum.

Neste trabalho são apresentados dados de petrografia, química mineral, geoquímica, geotermobarometria e idade modelo da ocorrência de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse, com o objetivo de caracterizar a ocorrência e contribuir para as discussões acerca da evolução da Zona de Paleo-Sutura de Alterosa (Zanardo et al., 2006).

(porção norte da *Nappe* Socorro-Guaxupé, Campos Neto & Caby, 1999, 2000; Campos Neto et al., 2011) e a sul da exposição do Complexo Barbacena.

Essa faixa de rochas é constituída por metassedimentos pelíticos a psamo-pelíticos, com intercalações de ortognaises e granitoides, e intercalações de rochas metamáficas e metaultramáficas, metamorfisados em condições de fácies anfíbolito a granulito/eclogito, no campo de estabilidade da cianita (Zanardo, 1992, 2003; Del Lama, 1993; Del Lama et al., 1994; Zanardo et al., 1996, 2006; Leme, 2019; Leme et al., 2019).

A sequência metassedimentar é composta predominantemente por xistos e xistos feldspáticos com ou sem granada e cianita; muscovita e/ou biotita quartzitos e quartzo-xistos com ou sem granada e cianita; e por granada e/ou biotita gnaises quartzosos a aluminosos com ou sem cianita. As intercalações de ortognaises e granitoides incluem corpos tabulares a lenticulares com dimensões que podem variar de alguns metros a até 2,0 km, de composição sienogranítica a tonalítica, predominando monzogranitos, cujos minerais máficos dominantes são biotita e anfíbólio (Zanardo, 1992; 2003; Morales, 1993; Del Lama, 1993; Zanardo et al., 1996, 2006; Godoy et al., 1999). As rochas metamáficas e metaultramáficas tendem a concentrar-se na porção norte do Grupo Araxá, e são atribuídas a uma sequência ofiolítica, que ocorre sob a forma de corpos lenticulares, intensamente tectonizados (Soares et al., 1990; Zanardo, 1992, 2003; Zanardo et al., 1996; Lima, 2014). De acordo com Zanardo (1992, 2003),

pode ser reconhecido um zoneamento metamórfico, com aumento de temperatura e pressão para sul, delimitado pelas zonas de cisalhamento.

Na porção mais meridional dessa faixa de rochas atribuídas ao Grupo Araxá, logo a norte da Zona de Cisalhamento Varginha, foram descritas ocorrências de rochas granulíticas de alta pressão (Zanardo, 1992; Del Lama, 1993; Del Lama et al., 1994; Leme, 2019; Leme et al., 2019), constituídas

dominantemente por granada, clinopiroxênio, plagioclásio e anfibólio, às vezes com texturas simplectíticas e coroníticas, interpretadas como retroeclogitos (Leme, 2019; Leme et al., 2019). No contexto dessas rochas de HP, foi registrada a ocorrência de um corpo de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse, cuja associação mineral é pouco comum e representa o objeto de estudo deste trabalho.

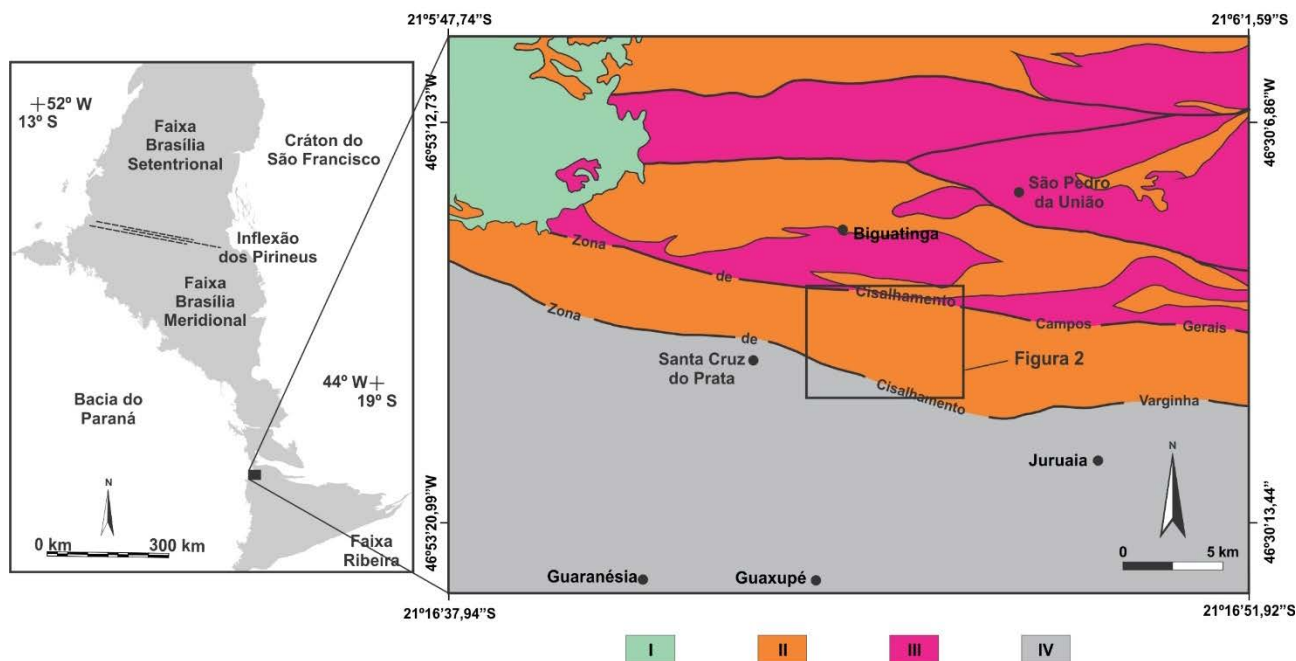


Figura 1 – Mapa geológico da região da área de estudo, com destaque para a localização da área de estudo na Faixa Brasília. I) Depósitos sedimentares e rochas básicas fanerozoicas atribuídas a Bacia do Paraná. Grupo Araxá: II) Sequência metassedimentar psamo-pelítica. III) Ortognaises e granitoides de composição sienogranítica a tonalítica. IV) Complexo Guaxupé (ortopiroxênio gnaisses, quartzo mangeritos, gnaisses charnockíticos e mais raramente gnaisses graníticos) (Compilado de Zanardo, 1992; Zanardo et al., 2006).

MÉTODOS ANALÍTICOS

Amostras de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse foram selecionadas para análise petrográfica, análises de química mineral, geoquímica de rocha total, cálculos geotermobarométricos e análise isotópica Sm/Nd para idade modelo em rocha total.

As análises de química mineral foram realizadas no Laboratório de Microsonda Eletrônica do Departamento de Geologia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Unesp - Campus de Rio Claro, por meio de microsonda eletrônica da marca JEOL modelo JXA-8230 *superprobe*. As condições analíticas foram de aceleração de 15 kV, corrente de 20,4 nA e diâmetro do feixe de 10 µm, para a realização de análises pontuais e em perfis em cristais de granada, plagioclásio, feldspato potássico, clinopiroxênio, anfibólio e biotita, escolhidos por critérios petrográficos de acordo

com a paragênese de interesse.

Os cálculos da atividade mineral das fases analisadas e das fórmulas estruturais dos minerais foram realizados pelo programa AX (disponível em: <http://www.ccp14.ac.uk/ccp/web-mirrors/crush/astaff/holland/ax.html>) desenvolvido por Tim Holland e pelo programa *MINPET* versão 2.02 (Richard, 1995). Os cálculos termobarométricos foram realizados utilizando-se o *software THERMOCALC 3.26*, modo *Average-PT* (Powell & Holland, 1994).

As análises geoquímicas de rocha total foram feitas pelo Laboratório Acme (Analytical Laboratories LTD, Vancouver, Canadá) e foram realizadas por meio de Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-AES), após fusão utilizando metaborato/tetraborato de lítio e digestão em ácido nítrico diluído, e a perda ao fogo (LOI) determinada por

método termogravimétrico a 1.000°C por quatro horas, e por Espectrometria de Massa em Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS), após fusão utilizando metaborato/tetraborato de lítio e digestão em ácido nítrico. Para a manipulação dos dados geoquímicos e elaboração de diagramas foi utilizado o programa *MINPET* versão 2.02.

Os estudos isotópicos Sm/Nd para determinação de Idade Modelo (TDM) em rocha total foram realizados no Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos (LAGIR), da Faculdade de Geologia, da

Universidade Estadual do Rio de Janeiro, utilizando-se o método de Valeriano et al. (2009).

As leituras das razões foram feitas em Espectrômetro de Massa por ionização termal (TIMS) da marca *Finnigan TRITON-TI*. A razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ foi normalizada pelo padrão de La Jolla ($^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de 0,7219). A idade modelo T_{DM} foi calculada utilizando-se o modelo de De Paolo (1981).

As abreviações minerais utilizadas neste trabalho seguem a proposta de Whitney & Evans (2010).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Aspectos de Campo

A área de estudo está localizada a norte da Zona de Cisalhamento Varginha, na porção meridional da faixa de rochas atribuídas ao Grupo Araxá, na região do Cinturão de Cisalhamento Campo do Meio. A localização do corpo de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse e das amostras estudadas é apresentada na figura 2.

O hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse ocorre sob a forma de um corpo lenticular, com aproximadamente 4,0 km de extensão, orientado próximo à direção E-W (Figura 2), paralelo a subparalelo à direção das zonas de cisalhamento regionais (E-W a WNW-ESE), e aflora principalmente sob a forma de blocos isolados com dimensões que variam de 0,5 a 2,0 m de diâmetro (Figuras 3A, B).

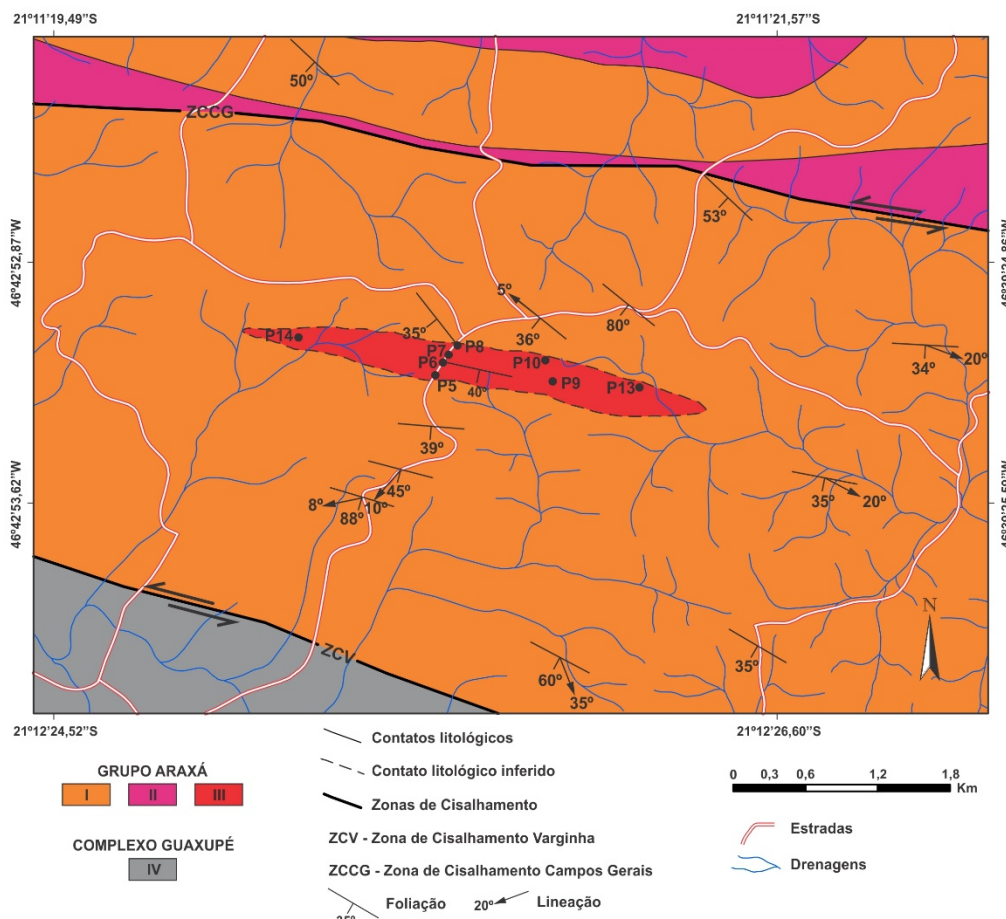


Figura 2 – Detalhe do mapa geológico mostrando o corpo de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse e a localização das amostras estudadas. Grupo Araxá: I) Sequência metassedimentar psamo-pelítica; II) Ortognaises e granitoides de composição sienogranítica a tonalítica; III) Corpo de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse de composição monzogranítica a granodiorítica. IV) Complexo Guaxupé (ortopiroxênio gnaisses, quartzo mangeritos, gnaisses charnockíticos e mais raramente gnaisses graníticos) (Compilado de Zanardo 1992; Zanardo et al., 2006; Modificado de Leme, 2016).

Este corpo de ortogneisse ocorre encaixado em metassedimentos psamo-pelíticos com granada, cianita, ortoclásio e rutilo (cianita-granada gnaisses, cianita-granada gnaisses quartzosos, cianita-granada xistos, cianita-granada quartzitos, granada quartzitos e granada gnaisses), entre as zonas de cisalhamento Varginha (a sul) e Campo Gerais (a norte) (Figura 2).

As relações de contato entre o ortogneisse e as rochas encaixantes não foram observadas em campo.

O ortogneisse apresenta coloração cinza claro,

é leucocrático e mostra diferentes graus de anisotropia, com predomínio de estrutura isotrópica (Figura 3C) e textura granular hipidiomórfica/alotriomórfica a granoblástica, de granulação média a grossa nas porções centrais do corpo, tendendo a termos mais anisotrópicos (Figura 3D) e textura granoblástica inequigranular de granulação média a fina para as bordas do corpo. A anisotropia da rocha é marcada por bandamento gnáissico descontínuo submilimétrico, constituído pela alternância de leitos descontínuos de minerais félsicos e minerais máficos orientados.

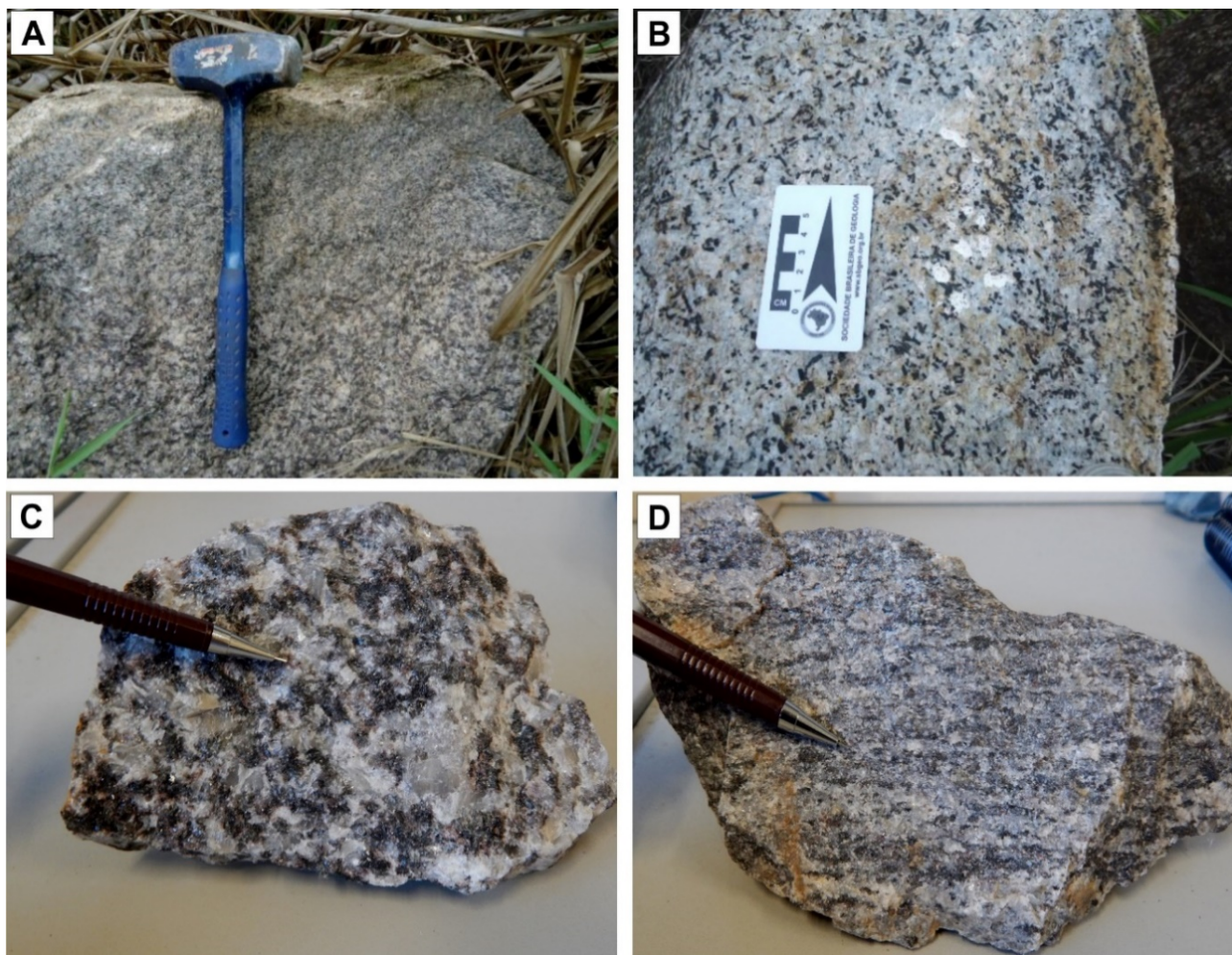


Figura 3 - Aspectos macroscópicos do hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortogneisse. **A)** e **B)** Tipo principal de ocorrência na forma de matações do ortogneisse; **C)** Estrutura isotrópica do ortogneisse representada nas porções centrais do corpo; **D)** Estrutura anisotrópica com bandamento gnáissico submilimétrico descontínuo representada principalmente em direção às bordas do corpo de ortogneisse.

Petrografia e Química Mineral

Nesta seção são descritos os principais aspectos microscópicos e mineralógicos das amostras estudadas. Baseado nas feições texturais e mineralógicas, cinco amostras do corpo de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortogneisse foram selecionadas para análise de química mineral de elementos maiores. Os resultados representativos das

análises de química mineral e o respectivo conteúdo de átomos por unidade de fórmula (*a.p.u.f*) são apresentados nas tabelas suplementares - Apêndice (Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5).

As rochas que constituem o corpo de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortogneisse apresentam grau variado de anisotropia, resultando em estrutura gnáissica com diferentes estágios de desenvolvimento, devido à variação

do grau de deformação. A estrutura da rocha é marcada por fraca orientação dos cristais de feldspato potássico e plagioclásio, e por orientação mais pronunciada dos cristais de quartzo e dos agregados constituídos por granada, anfibólio, biotita e clinopiroxênio. A textura é predominantemente granoblástica inequigranular poligonal a lobulada, com domínios descontínuos inequigranulares constituídos por granada, biotita e anfibólio. Localmente preserva textura primária granular hipidiomórfica a alotriomórfica.

A mineralogia das rochas que compõem o

corpo de ortogneisse em estudo é constituída por plagioclásio (30-35%), quartzo (20-25%), feldspato potássico (15-20%), granada (5-10%), biotita (5-10%), anfibólio (5-7%), e clinopiroxênio (0-5%), com ilmenita, titanita, apatita, zircão, allanita como minerais acessórios (<1%), além de traços de epidoto e carbonato.

O plagioclásio (An_{12,30-35,26}) (Figura 4A) ocorre em leitos irregulares descontínuos granoblásticos associados ao quartzo e ao feldspato potássico. Os cristais são predominantemente subédricos a anédricos, com dimensões que podem atingir até 5,0 mm.

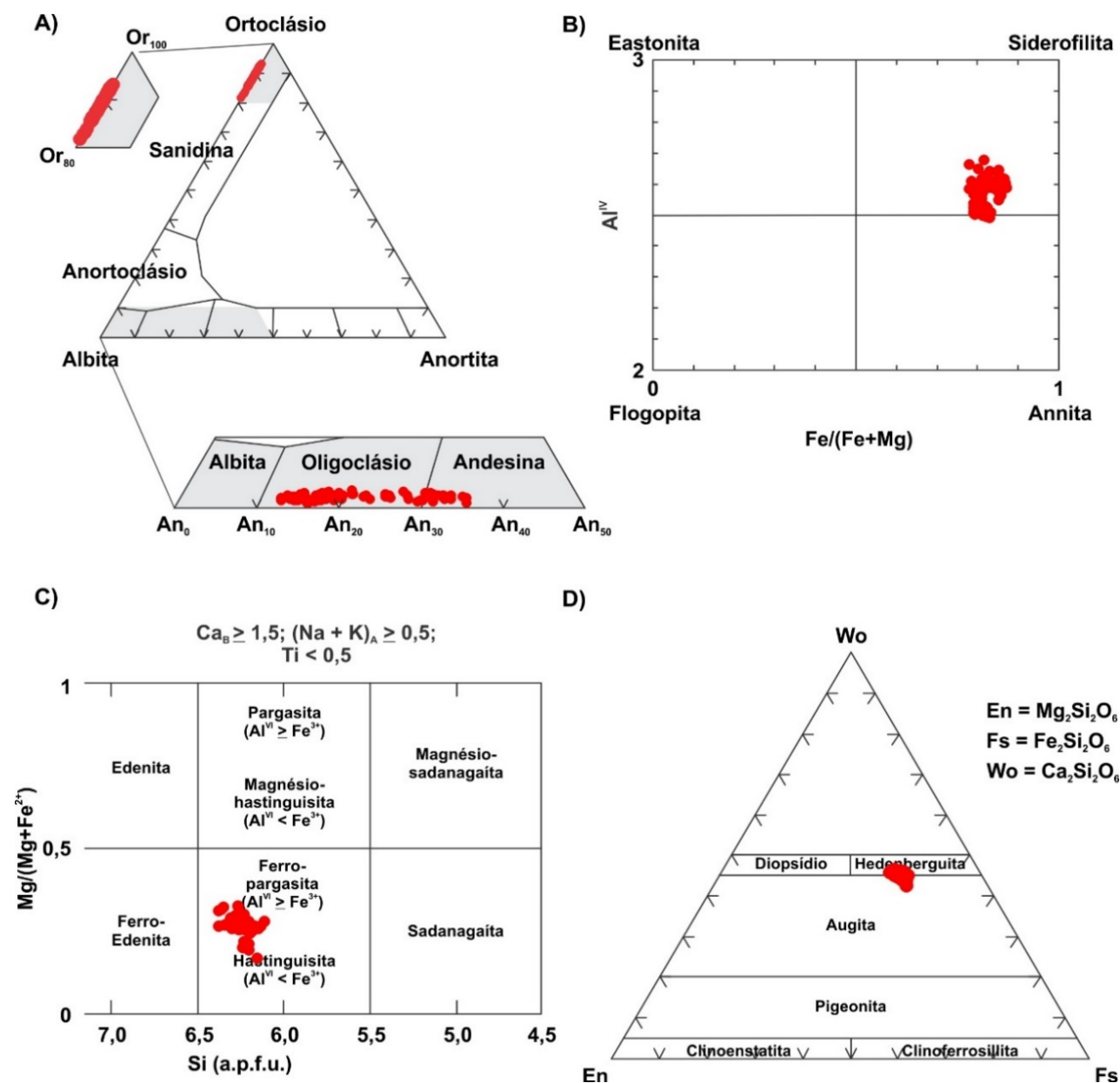


Figura 4 – Gráficos de classificação mineral. **A)** Diagrama ternário de classificação de feldspatos; **B)** Diagrama de classificação de biotita; **C)** Diagrama de classificação de anfibólios cálcicos (Modificado de Leake et al., 1997); **D)** Diagrama ternário Ca-Mg-Fe para classificação de piroxênios (Morimoto, 1988).

Exibem textura antipertítica e mirmequítica (Figuras 5A, B), e podem apresentar bordas mais sódicas. Alguns cristais apresentam inclusões de

quartzo (quartzo em gotas), e podem mostrar-se corroídos por feldspato potássico. Em algumas porções, o plagioclásio forma agregados

granulares com contatos poligonais, concentrados em domínios (Figuras 5C, D) e envolvidos por textura reliquiar ígnea. O feldspato potássico (ortoclásio e microclínio), assim como o plagioclásio, ocorre concentrado em domínios descontínuos. Os cristais são anédricos a predominantemente subédricos, podem atingir dimensões de

até 5,5 mm, e apresentam textura pertítica (Figura 5E) a mesopertítica.

Localmente exibem extinção ondulante. Alguns cristais apresentam geminação reticulada em xadrez (combinação das maclas de albíta e da periclina) difusa, sugerindo triclinização dos cristais de ortoclásio.

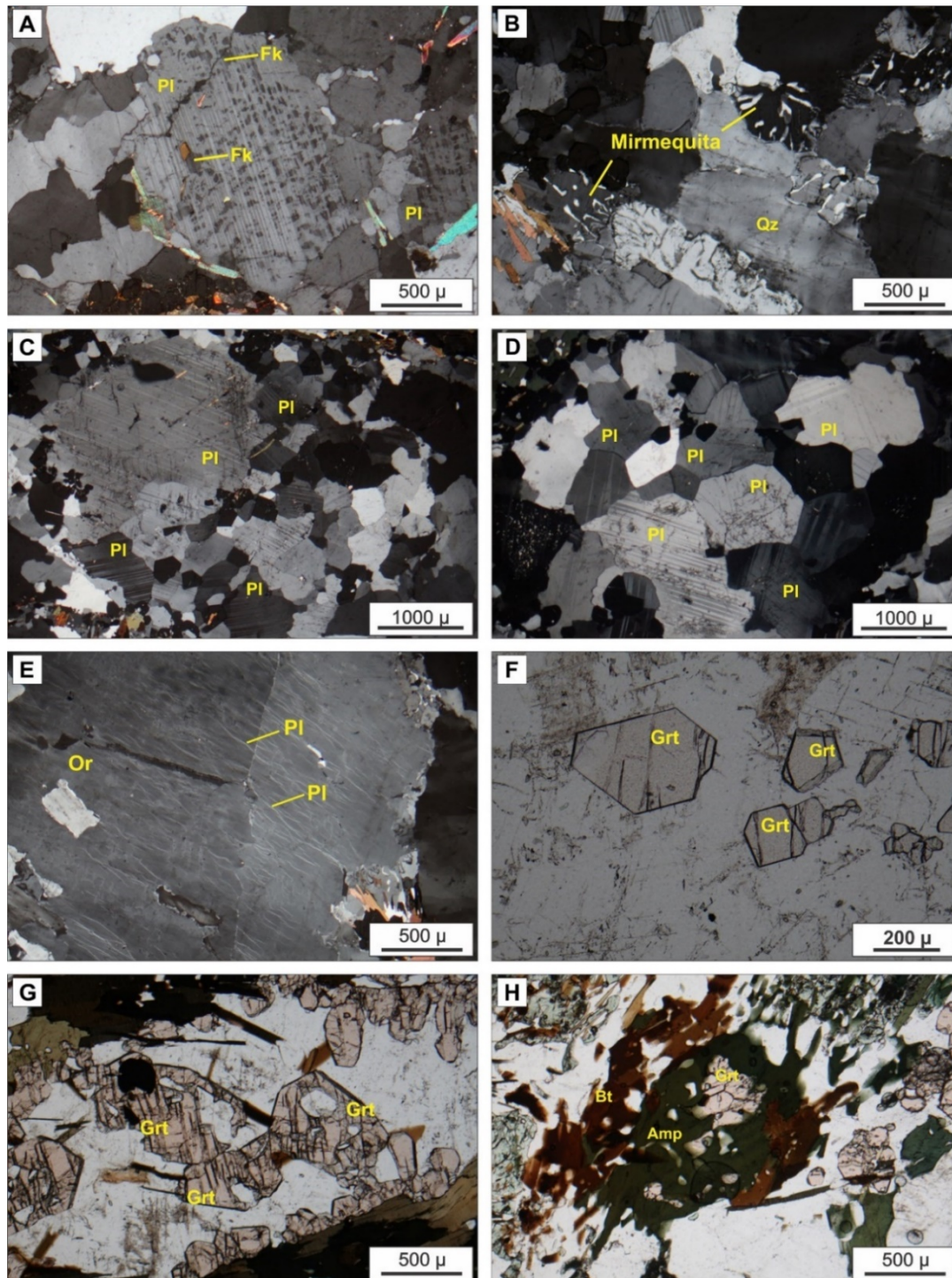


Figura 5 - Aspectos petrográficos do hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortogneisse. **A)** Cristal de plagioclásio antipertítico (Polarizadores cruzados); **B)** Cristal de plagioclásio com intercrescimento venular de quartzo (textura mirmequítica) (Polarizadores cruzados); **C e D)** Agregados granulares de cristais de plagioclásio com contatos poligonais (Polarizadores cruzados); **E)** Cristal de ortoclásio pertítico (Polarizadores cruzados); **F)** Cristais euédricos de granada isolados com contatos poligonais (Polarizadores paralelos); **G)** Cristais anédricos de granada com bordas lobuladas (Polarizadores paralelos); **H)** Cristal de granada parcialmente substituído por anfibólio e biotita (Polarizadores paralelos). Amp: anfibólio, Bt: biotita, Fk: feldspato potássico, Grt: Granada, Or: ortoclásio, Pl: plagioclásio, Qz: quartzo.

O feldspato potássico mostra composição semelhante em todas as amostras, e varia em cerca de 10% na concentração de ortoclásio ($Or_{82,98-93,33}$) (Figura 4A).

O quartzo ocorre sob a forma de cristais anédricos, com dimensões que podem atingir 5,0 mm. Ocorre em domínios lenticulares a irregulares (associado aos feldspatos), e exibe contatos predominantemente lobulados a engrenados. Os cristais apresentam extinção

ondulante leve a moderada, recristalização, recuperação e deformação em bandas.

A granada ocorre como cristais subédricos a euédricos isolados (Figura 5F) e/ou sob a forma de cristais e agregados anédricos a arredondados (Figura 5G), com dimensões que variam de 0,4 mm a 3,0 mm. Pode apresentar-se corroída por biotita e anfibólio (Figura 5H), e localmente forma coroas na borda de cristais de plagioclásio (Figura 6A).

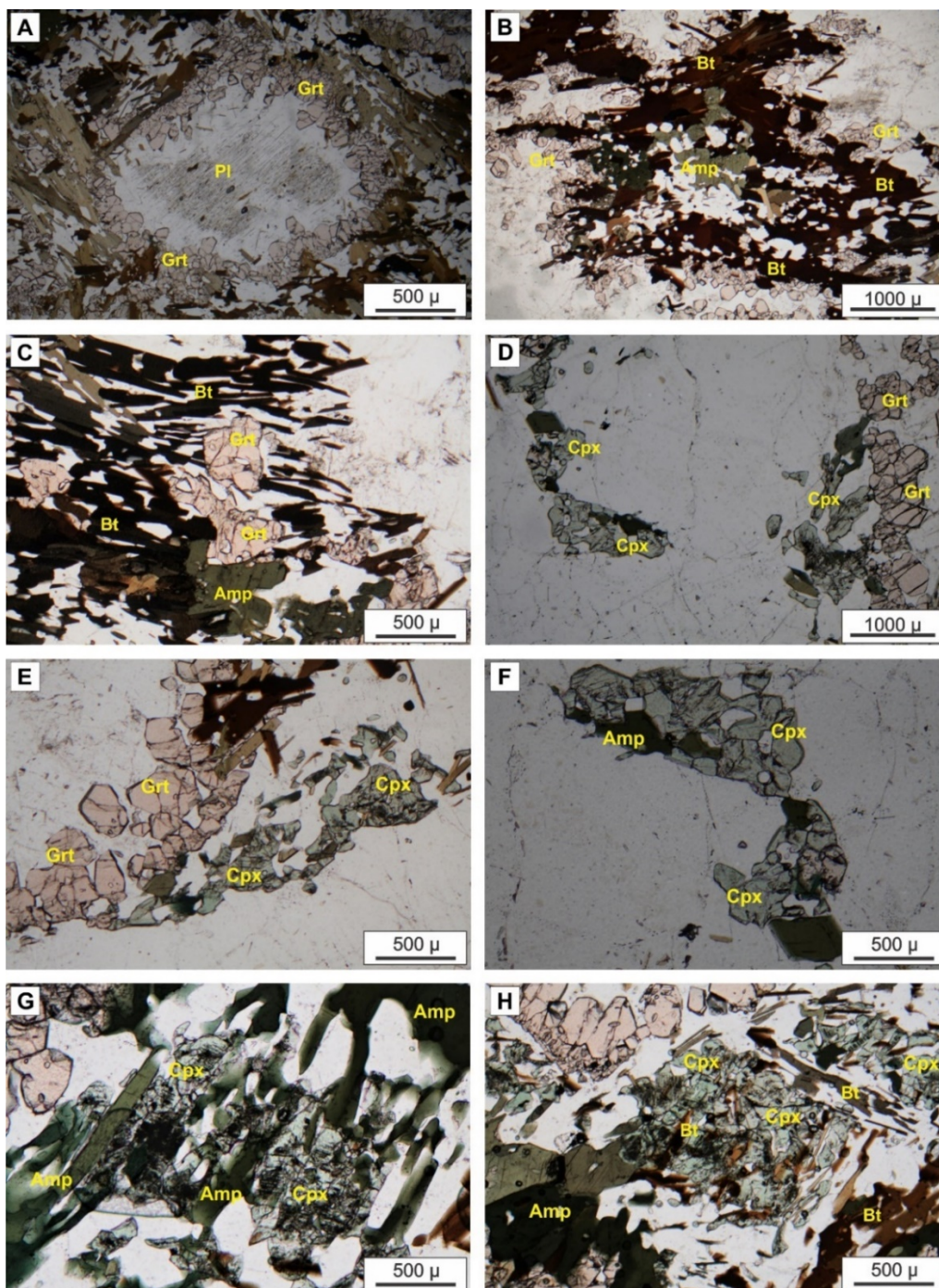


Figura 6 - Aspectos petrográficos do hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortogneisse. **A**) Cristal de plagioclásio exibindo coroa de cristais de granada (Polarizadores paralelos); **B** e **C**) Cristais de biotita substituindo cristais de granada e de anfibólio (Polarizadores paralelos); **D** e **E**) Cristais de clinopiroxênio associados a cristais de granada (Polarizadores paralelos); **F** e **G**) Cristais de clinopiroxênio parcialmente substituídos por anfibólio (Polarizadores paralelos); **H**) Cristais de clinopiroxênio parcialmente substituídos por biotita (Polarizadores paralelos). Amp: anfibólio, Bt: biotita, Cpx: clinopiroxênio, Grt: Granada, Pl: plagioclásio.

A composição da granada é dominada pela molécula de almandina ($Alm_{59,42-72,46}$), seguida por proporções intermediárias de grossulária ($Grs_{7,93-28,57}$), e menores proporções de piropo ($Prp_{2,48-5,67}$), andradita ($Adr_{<1,00-13,00}$) e espessartita ($Sps_{1,07-2,82}$).

A composição química mostra perfis composicionais quase planos (retos) e homogêneos, marcados por sutil zoneamento químico, definido por leve diminuição de Fe^{2+} e Mg e fraco aumento de Ca em direção às bordas dos cristais (Figura 7).

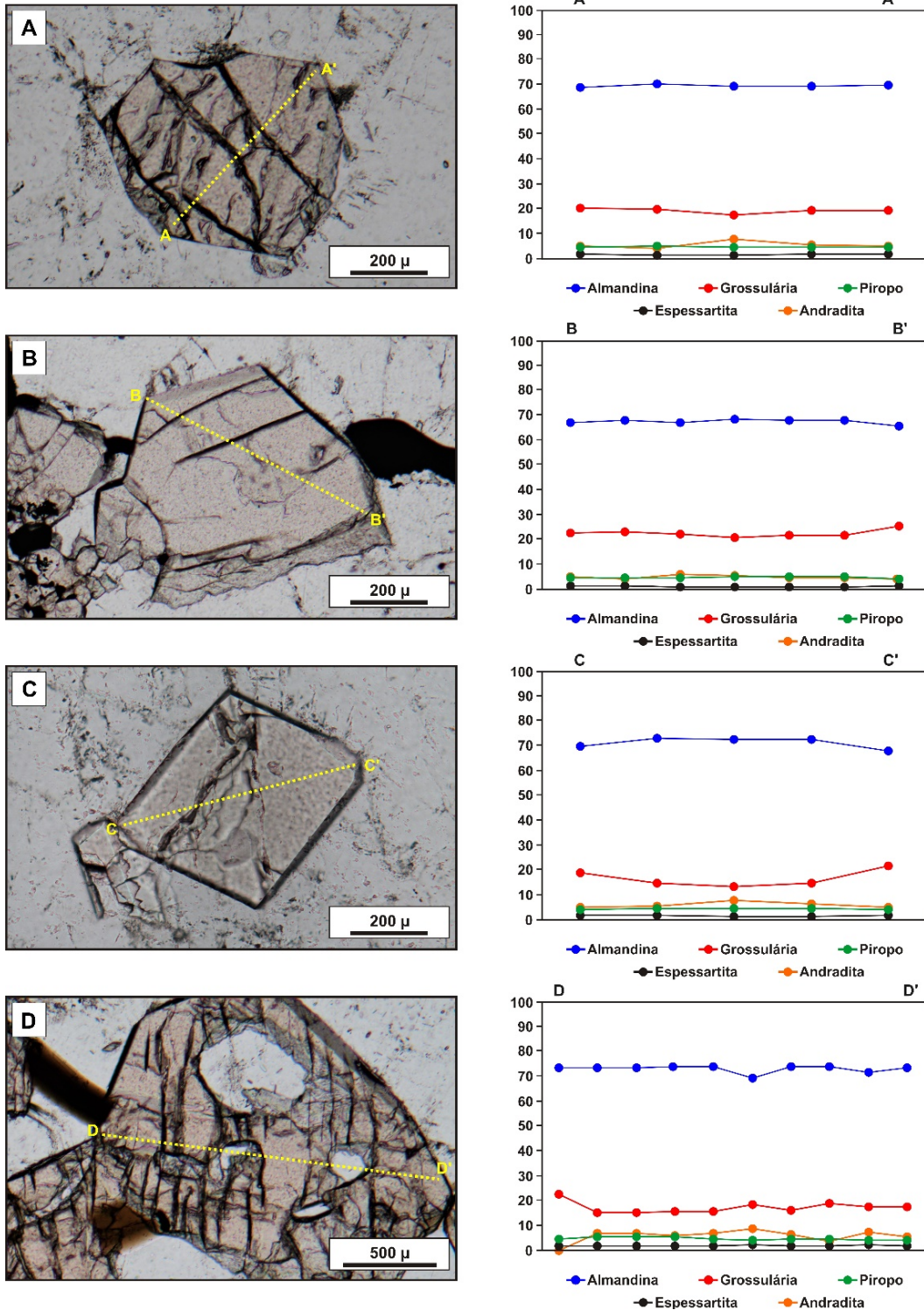


Figura 7 - Perfis composicionais de cristais de granada analisados.

A biotita é quimicamente classificada como siderofilita (Figura 4B), ocorre como pequenas palhetas anédricas e exibe pleocroísmo predominantemente marrom amarelado - marrom escuro - castanho claro. Mostra-se na

borda de cristais de anfibólio e granada e indica ser produto de substituição metamórfica destes minerais (Figuras 5H, 6B, C). Os cristais apresentam conteúdo de X_{Mg} variando de 0,129 a 0,210, teor de Al^{IV} relativamente alto, entre 2,490

e 2,729 *a.p.u.f.*, assim como o conteúdo de Ti, que varia entre 0,290 e 0,614 *a.p.u.f.* e conteúdo de Al^{VI}, entre 0,053 e 0,527 *a.p.u.f.*

O anfibólio apresenta composição cálcica ($Ca_B \geq 1,5$, $Na_A + K_A \geq 0,5$, $Ti \leq 0,5$ e $Si < 6,5$) e é classificado como hastingsita/ferro pargasita no diagrama de Leake et al. (1997) (Figura 4C). Ocorre sob a forma de cristais euédricos a anédricos associados principalmente ao clinopiroxênio, e sugerem ser produto de substituição desse mineral (Figuras 6D, F, G). O anfibólio pode constituir coroas quase a totalmente completas em torno dos cristais de granada e de clinopiroxênio. Localmente ocorre alterado para biotita. Quimicamente, os cristais apresentam composição relativamente homogênea em todas as amostras, com razão Mg/(Mg+Fe) variando entre 0,131 a 0,241, conteúdo de Al^{IV} entre 1,441 e 1,761 *a.p.u.f.*, de Al^{VI} entre 0,427 a 0,847 *a.p.u.f.*, e de Ti variando entre 0,027 e 0,271 *a.p.u.f.*

O clinopiroxênio é classificado como hedenberguita ($W_{0,42,64-46,45}En_{15,57-18,78}Fs_{35,51-40,40}$) (Figura 4D) e ocorre sob a forma de cristais subédricos a anédricos, com dimensões que variam da ordem de 0,5 a 1,5 mm. Apresenta bordas corroídas, em geral associado aos cristais de granada (Figuras 6D, E), e ocorre parcialmente substituído por anfibólio (Figuras 6F, G) e mais raramente por biotita (Figura 6H). Os cristais apresentam conteúdos de Mg variando de 0,302 a 0,381 *a.p.u.f.* e de Fe²⁺ de 0,693 a 0,807 *a.p.u.f.* Os teores de Ca variam entre 0,808 e 0,931 *a.p.u.f.*, e 0,031 a 0,139 *a.p.u.f.* de Al.

Os cristais de titanita possuem dimensões médias de 0,2 mm, são anédricos e ocorrem predominantemente associados à biotita; localmente formam coroas em opacos. Os minerais opacos, zircão, apatita e allanita, ocorrem sob a forma de cristais subédricos a anédricos, dispersos pela lâmina, com dimensões inferiores a 0,3 mm. A allanita ocorre associada ao epidoto. O epidoto e o carbonato ocorrem como minerais secundários, produto de alteração do clinopiroxênio e plagioclásio.

Geoquímica

Foram selecionadas sete amostras para análise geoquímica de rocha total correspondentes ao corpo de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse. As amostras analisadas e os resultados das análises são apresentados na tabela 1.

As amostras do ortognaisse apresentam pequena variação no conteúdo de elementos

maiores (SiO₂ – 67,94 a 70,13%, TiO₂ – 0,58 a 0,82%, Al₂O₃ – 12,63 a 13,81%, Fe₂O_{3T} – 5,66 a 7,77%, CaO – 2,01 a 2,85%, Na₂O – 2,44 a 2,80%, K₂O – 3,70 a 4,47%, P₂O₅ – 0,18 a 0,25%), com baixos conteúdos de MnO (0,07 a 0,09%) e MgO (0,37 a 0,53%). Nos diagramas binários tipo Harker para elementos maiores, as amostras mostram-se dispersas no grupo de elementos analisados (Figura 8).

As rochas que compõem o corpo de hedenberguita-hastingsita-biotita granada ortognaisse são ácidas, apresentam composição subalcalina no diagrama de classificação Na₂O+K₂O vs SiO₂ (Figura 9A), e cálcio-alcalina no diagrama Na₂O+K₂O-Ca vs SiO₂ (Figura 9B), com razão molecular A/CNK próxima de 1,0 (0,93 a 1,13), mostrando caráter meta-luminoso e peraluminoso (Figura 9C). De acordo com o diagrama discriminante R1 vs R2, as rochas são classificadas no limite dos campos do granodiorito e granito (Figura 9D).

O padrão de distribuição dos elementos incompatíveis normalizado pelo manto primitivo de Sun & McDonough (1989), indica que as amostras são enriquecidas em Cs, Rb, Ba, K, Zr e Hf em relação a Th, U, Ta, Nb, Sr, P, Ti, Y e elementos terras raras pesados (ETRP), com discretas a fortes anomalias negativas de Th, U, Ta, Nb, Sr, P e Ti (Figura 10A).

O conteúdo total de ETR é baixo, variando de 124,73 a 223,36 ppm, com predomínio de valores em torno de 145 ppm. Os elementos terras raras leves (ETRL), normalizados pelo manto primitivo (Sun & McDonough, 1989), apresentam concentrações entre 10,06 e 55,90 vezes acima deste, enquanto os ETRP mostram concentrações entre 4,05 a 14,41 vezes acima (Figura 10B).

O padrão de distribuição de ETR das amostras analisadas apresenta enriquecimento em ETRL em relação à ETRP (razões La_N/Eu_N = 2,92 a 4,14, Gd_N/Lu_N = 1,85 – 2,30, La_N/Lu_N = 7,21 a 10,81), exibindo fracas anomalias positivas e negativas de európio (Eu* = 0,93 a 1,22).

Uma amostra (amostra P-5Cf) apresenta maiores conteúdos de ETR, um enriquecimento mais acentuado de ETRL em relação a ETRP (razões La_N/Eu_N = 5,56, Gd_N/Lu_N = 2,13, La_N/Lu_N = 8,27) e anomalia negativa de európio mais pronunciada (Eu* = 0,56). Estas variações composicionais em relação aos ETR e Eu*, descrita nesta amostra, que exhibe domínios mais deformados, provavelmente estão relacionadas às variações petrográficas resultantes de

transformações metamórficas, como recristalização de fases minerais preexistentes, consumo de fases minerais anteriores e formação de novas fases minerais.

Nos diagramas discriminantes de ambientes

geotectônicos de Pearce et al. (1984), Harris et al. (1986) e De La Roche et al. (1980), as rochas exibem composição química semelhante à de rochas geradas em arcos magmáticos (Figuras 11A, B, C, D, E, F).

Tabela 1 - Elementos maiores (%), menores e traços (ppm) e elementos terras raras (ppm) de amostras do hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse.

Elementos	P-5	P-5Cf	P-5A	P-6A	P-7B	P-9A	P-13	*MP	
SiO ₂	68,94	68,35	68,62	67,94	67,95	70,13	68,88	1300	
TiO ₂	0,61	0,82	0,67	0,67	0,69	0,58	0,65		
Al ₂ O ₃	13,81	12,63	13,39	13,81	13,76	13,23	13,07		
Fe ₂ O ₃ T	6,19	7,77	7,19	6,98	6,96	5,66	7,26		
MnO	0,08	0,09	0,09	0,08	0,09	0,07	0,08		
MgO	0,41	0,53	0,46	0,39	0,42	0,37	0,42		
CaO	2,49	2,85	2,71	2,01	2,63	2,16	2,22		
Na ₂ O	2,78	2,64	2,78	2,44	2,80	2,71	2,71		
K ₂ O	4,29	3,70	3,82	4,09	3,83	4,47	4,21		250
P ₂ O ₅	0,18	0,25	0,20	0,19	0,21	0,17	0,20		95
Total	99,68	99,73	99,64	99,64	99,61	99,65	99,6		
Rb	87,2	97,5	90,7	100,1	85,4	99,6	101,3	0,635	
Cs	1,2	1,8	0,9	1,4	1	0,6	1,1	0,0079	
Sr	263,2	236,2	269,9	247,8	280,4	258,8	257,5	7,26	
Ba	1795	1277	1862	1964	1990	1962	2216	6,989	
Y	15,5	30	21,5	29,3	19	19,8	22,2	4,55	
Zr	447,1	435,9	670,4	613,9	737,8	521,7	626,1	11,2	
Hf	12,1	11,8	15,9	14,4	17,6	12,6	14,8	0,309	
Nb	11,9	13,8	15,1	15,3	16,6	12,9	15,5	0,713	
Ta	0,6	0,8	0,9	0,8	0,8	0,7	1	0,041	
Pb	1,7	1,9	2	2,8	2,7	1,6	1,8	0,071	
Th	1,5	4,8	1,5	1,4	1,1	0,9	0,9	0,085	
U	0,6	0,9	0,7	0,7	0,6	0,5	0,7	0,21	
La	27,5	38,4	31,8	31,9	24,1	30,1	29,1	0,687	
Ce	59	90	55,2	54,5	45,4	57,1	53,9	1,775	
Pr	6,92	11,45	7,42	7,72	5,94	7,17	7,36	0,276	
Nd	26,8	47,1	29,7	33,8	27	29,7	32,7	1,354	
Sm	4,85	9,68	5,9	6,31	5,36	5,73	6,48	0,444	
Eu	1,95	1,69	1,88	2,15	2,02	1,89	1,92	0,168	
Gd	4,87	8,59	5,5	6,81	5,47	5,56	5,9	0,596	
Tb	0,65	1,17	0,76	0,94	0,68	0,76	0,8	0,108	
Dy	3,51	6,46	4,05	5,04	3,42	3,96	4,26	0,737	
Ho	0,64	1,22	0,79	0,99	0,68	0,72	0,81	0,164	
Er	1,84	3,48	2,23	2,71	1,92	2,12	2,39	0,48	
Tm	0,27	0,49	0,31	0,39	0,28	0,29	0,34	0,074	
Yb	1,85	3,13	2,2	2,49	2,1	1,97	2,31	0,493	
Lu	0,32	0,5	0,37	0,43	0,36	0,3	0,38	0,074	
La _N /Eu _N	3,45	5,56	4,14	3,63	2,92	3,89	3,71	1	
Gd _N /Lu _N	1,89	2,13	1,85	1,97	1,89	2,30	1,93	1	
La _N /Lu _N	9,26	8,27	9,26	7,99	7,21	10,81	8,25	1	
Eu*	1,22	0,56	0,99	1,00	1,13	1,01	0,93	1	

*MP: Manto Primitivo (Sun & McDonough, 1989). Teores em ppm.

Termobarometria

A partir dos resultados de química mineral, foram realizados cálculos termobarométricos por meio do *software THERMOCALC 3.26*, modo *Average P-T* (Powell & Holland, 1994). A

assembleia mineral utilizada para o cálculo e os resultados das condições de pressão e temperatura são apresentados na tabela 2. Para os cálculos, utilizou-se atividade de CO₂ (α_{CO_2}) igual a 0,7.

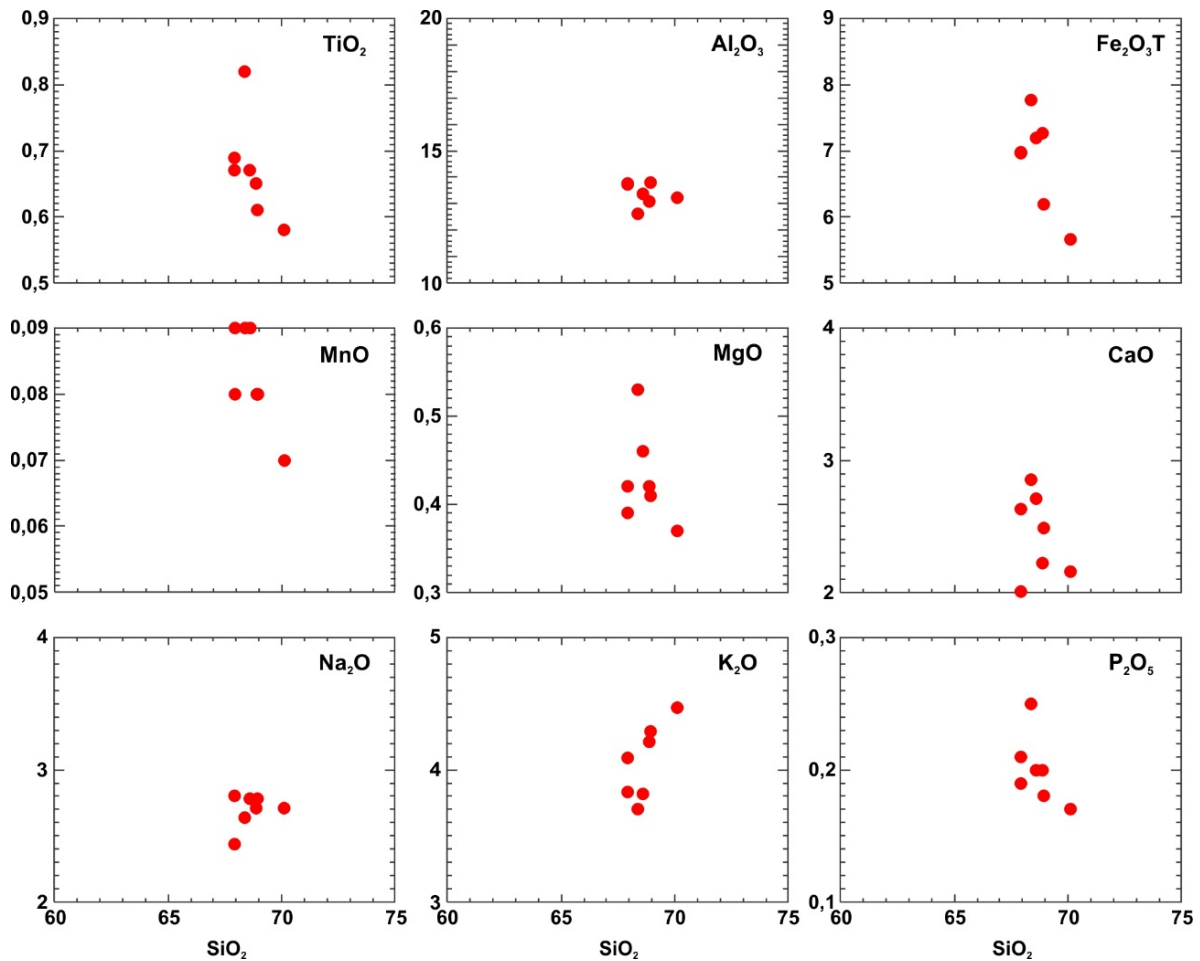


Figura 8 - Padrão de distribuição dos diagramas binários TiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$, MgO , CaO , Na_2O , K_2O e P_2O_5 vs SiO_2 .

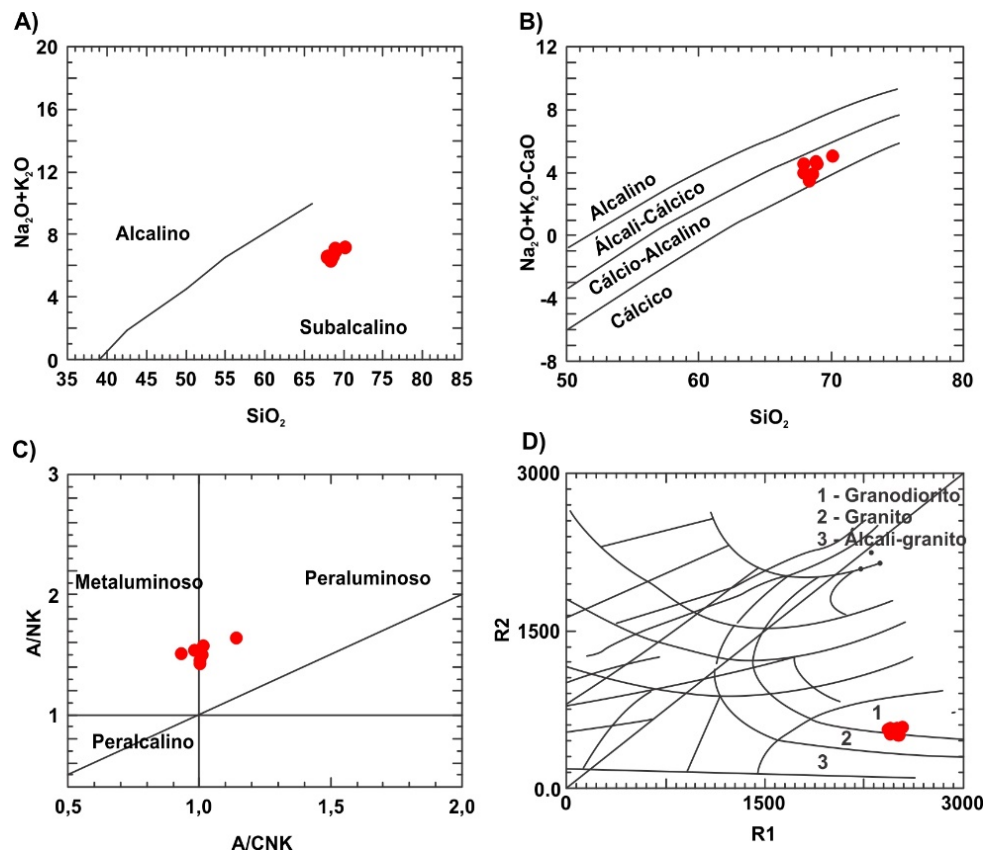


Figura 9 - Gráficos de classificação geoquímica. A) Gráfico de classificação $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ vs SiO_2 (Irvine & Baragar, 1971); B) $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ vs SiO_2 (Frost et al., 2001); C) Gráfico A/NK - A/CNK (Shand, 1943); D) Diagrama R1 [$4\text{Si}-11(\text{Na}+\text{K})-2(\text{Fe}+\text{Ti})$] vs R2 [$\text{Al}+2\text{Mg}+6\text{Ca}$] de classificação para rochas plutônicas (De La Roche et al., 1980).

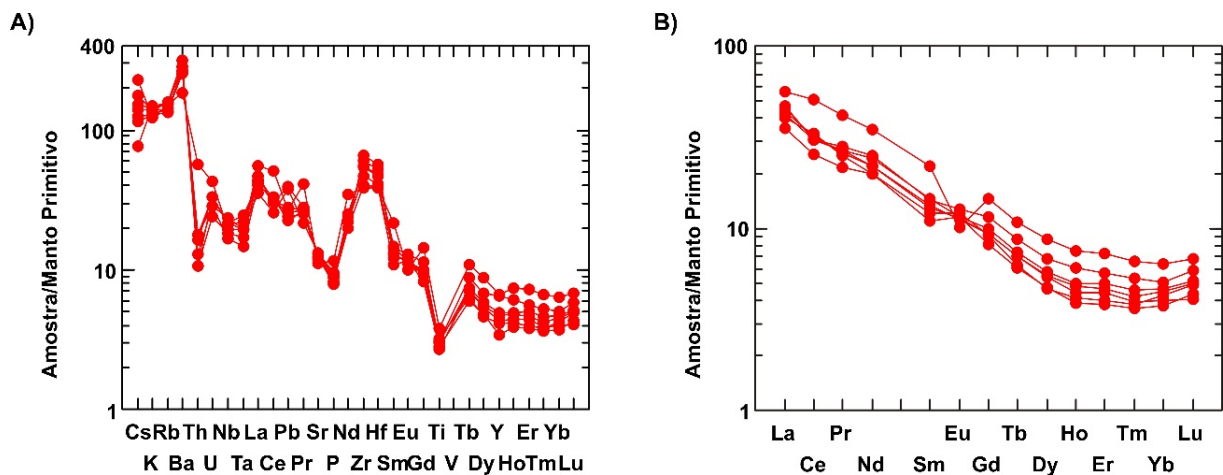


Figura 10 – Diagramas de distribuição de elementos incompatíveis e ETR. **A)** Diagrama de distribuição para elementos menores, traços e ETR (normalizados pelo Manto Primitivo, Sun & McDonough, 1989); **B)** Diagrama de distribuição dos elementos terras raras (normalizados pelo Manto Primitivo, Sun & McDonough, 1989).

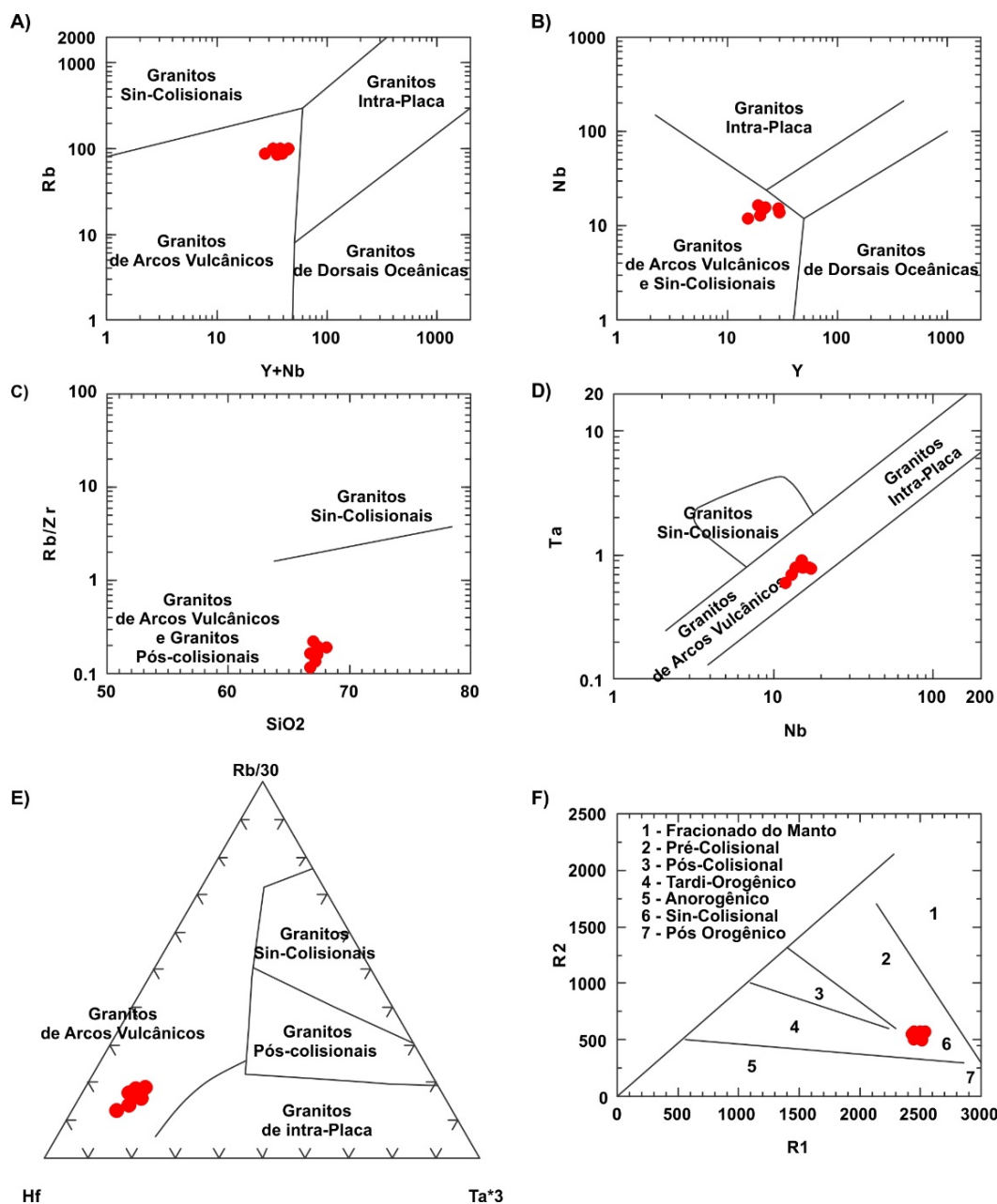


Figura 11 - Gráficos discriminantes de ambientes tectônicos. **A)** Gráfico Rb vs Y+Nb (Pearce et al., 1984); **B)** Gráfico Nb vs Y (Pearce et al., 1984); **C)** Gráfico Rb/Zr vs SiO₂ (Harris et al., 1986); **D)** Gráfico Ta vs Nb (Harris et al., 1986); **E)** Gráfico Rb/30 vs Hf vs Ta*3 (Harris et al., 1986); **F)** Gráfico R1 [4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)] vs R2 [Al+2Mg+6Ca] (De La Roche et al., 1980).

Tabela 2 – Condições *P-T* calculadas pelo software *THERMOCALC* (Average *P-T*).

Assembleia Mineral	P (Kbar)/T (°C)
Pl+Or+Qtz+Amp+Bt+Cpx	7,0 ±0,5 / 666 ±29
Pl+Or+Qtz+Amp+Bt+Cpx	8,8 ±0,7 / 635 ±34
Pl+Or+Qtz+Amp+Bt+Cpx	11,2 ±0,7 / 698 ±29
Pl+Or+Qtz+Amp+Bt+Cpx	9,3 ±0,7 / 619 ±33
Pl+Or+Qtz+Amp+Bt	10,6 ±0,7 / 786 ±45
Pl+Or+Qtz+Amp+Bt	10,0 ±1,1 / 706 ±68
Pl+Or+Qtz+Amp+Bt	10,1 ±0,7 / 771 ±49

As condições de pressão e temperatura calculadas com assembleia mineral constituída por andesina + almandina + quartzo + ortoclásio + siderofilita + hastingsita/ferro-pargasita + hedenberguita variam de 7,0 ±0,5 a 11,2 ±0,7 kbar e 619 ±33 a 698 ±29°C (Figura 12, Tabela 2). Nas porções mais deformadas, nas quais a hedenberguita não está presente na associação mineral do ortognaisse (andesina/oligoclásio + almandina + quartzo + ortoclásio + siderofilita + hastingsita/ferro-pargasita), as condições variam de 10,0 ±1,1 a 10,6 ±0,7 kbar e 706 ±68 a 786 ±45°C (Figura 12, Tabela 2). Quando o anfibólio e a biotita são excluídos da associação mineral, não é possível quantificar as condições de

pressão e temperatura, sugerindo que uma ou mais fases estão em desequilíbrio.

Idade Modelo

Uma amostra do corpo de hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse foi selecionada para análise isotópica Sm/Nd. A idade modelo $T_{DM(Nd)}$ foi calculada segundo o modelo de De Paolo (1981). Os resultados da análise são apresentados na tabela 3.

As razões isotópicas $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ e $^{143}\text{Nd}/^{147}\text{Nd}$ obtidas para amostra apresentam $T_{DM(Nd)}$ de 2,2 Ga, ϵ_{Nd} de -21,7 (Figura 13), e razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ de 0,12 e de $^{143}\text{Nd}/^{147}\text{Nd}$ de 0,511526. O valor de ϵ_{Nd} sugere que a rocha teve elevado tempo de residência crustal.

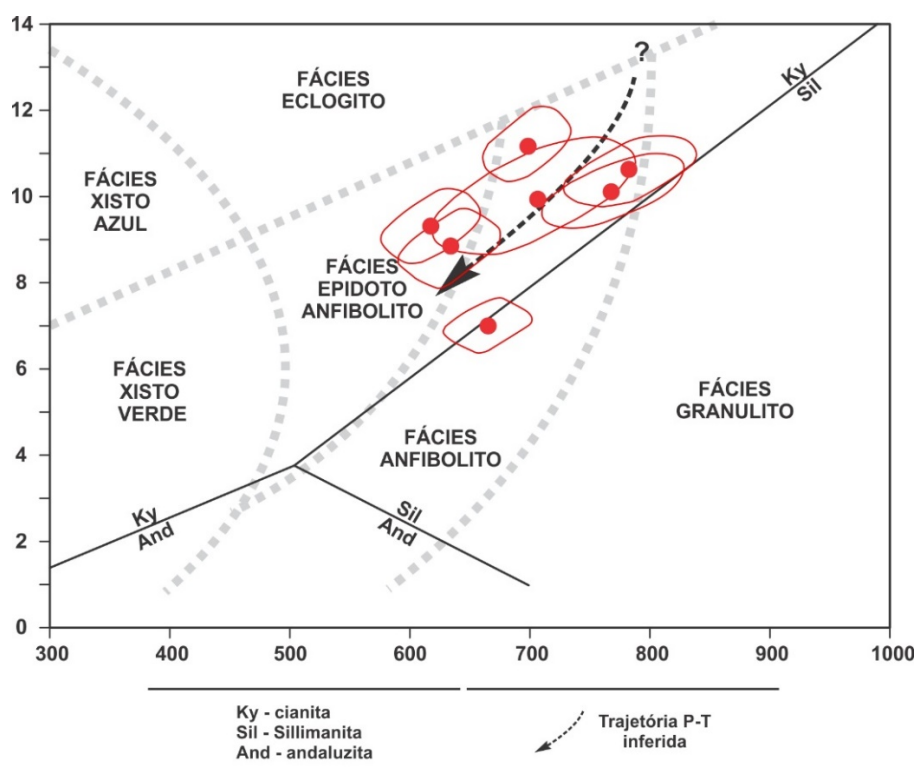


Figura 12 – Diagrama *P-T* mostrando as condições de pressão e temperatura calculadas pelo software *THERMOCALC* (Average *P-T*). Diagrama de fácies metamórfica extraído de Spear (1993).

Tabela 3 – Análise isotópica Sm/Nd.

Amostra	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	ϵ_{Nd}	$T_{DM(Nd)}$ (Ga)
P-5A – hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse	5,9	29,7	0,12	0,511526	-21,7	2,2

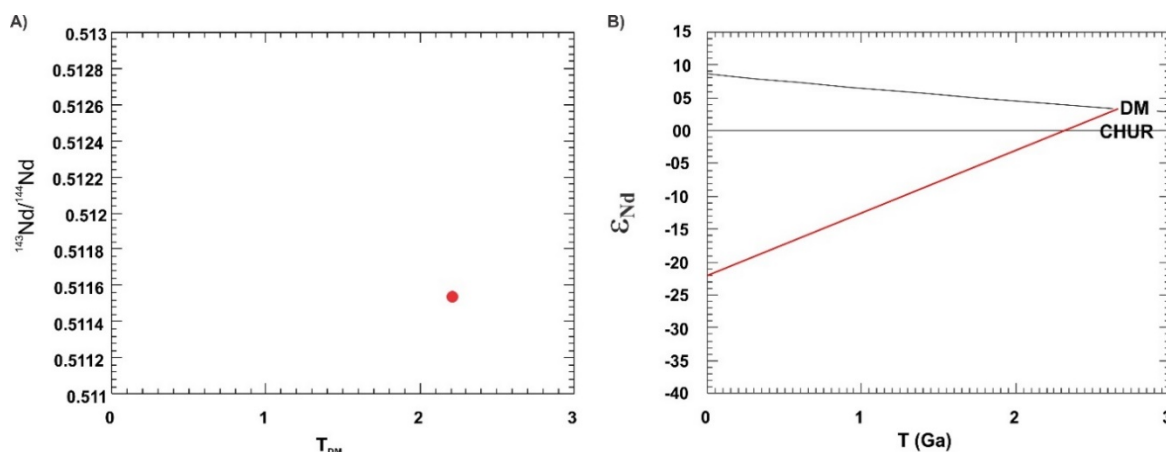


Figura 13 – Resultados da análise isotópica Sm/Nd. **A)** Diagrama mostrando variação da razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ versus idade modelo ($T_{\text{DM}}\text{Nd}$); **B)** Diagrama de evolução de ϵ_{Nd} com o tempo mostrando valor fortemente negativo para a amostra analisada (linha vermelha).

Metamorfismo e Evolução

As feições mineralógicas e texturais, assim como a associação mineral presente no ortognaisse (plagioclásio, ortoclásio, quartzo, granada, clinopiroxênio rico em Ca e Fe), indicam auge metamórfico em condições de fácies granulito, com temperaturas mínimas da ordem de 800°C, no campo de estabilidade da cianita, acima da isógrada do ortoclásio.

Em todas as amostras do corpo de ortognaisse, tanto nos termos mais isotrópicos como nos mais deformados, observam-se reações retrometamórficas em consequência do reequilíbrio metamórfico regional, que ocorreram com grau variado nas rochas, indicando que o processo foi penetrativo, embora com intensidade variada. As reações retrógradadas indicam reequilíbrio das associações minerais em fácies anfíbolito superior a médio e são marcadas principalmente por substituição de clinopiroxênio por anfibólio; passagem de ortoclásio para microclínio; passagem de anfibólio para biotita e em muitos casos com geração de titanita e opacos; cristais de granada com bordas de anfibólio e biotita; além da presença de mirmequitas.

As características químicas da granada, biotita e anfibólio analisados, corroboram condições de metamorfismo de alto grau. As análises de química mineral da granada mostram perfis composicionais quase retos e com sutis variações composicionais em direção às bordas dos cristais, características comuns em condições de alto grau metamórfico, uma vez que em condições de altas temperaturas (acima de 700°C), ocorre redução do zoneamento composicional, representando a homogeneização da composição, seguida de pouca modificação durante o resfriamento, marcado pelas sutis variações composicionais em

direção às bordas dos cristais (Tracy et al., 1976; Woodsworth, 1977; Yardley, 1977; Spear, 1993; Carlson & Schwarze, 1997; Cooke et al., 2000). Os altos conteúdos de X_{Mg} , Al^{IV} , Ti e baixos teores de Al^{VI} na composição da biotita, indicam características típicas de alto grau metamórfico (Guidotti, 1984), assim como os teores relativamente altos de Na_A e K_A e de Al^{IV} , Al^{VI} e Ti na composição do anfibólio, que também sugerem condições de temperatura mais elevadas (Zakrutkin & Grigorenko, 1967; Kotyuk & Sobolev, 1969; Robinson et al., 1982; Deer et al., 1997).

As condições de pressão e temperatura calculadas na termobarometria para a associação mineral com hedenberguita são inferiores ao esperado, considerando as características mineralógicas, texturais e químicas das amostras analisadas, além das rochas encaixantes ao ortognaisse e o contexto geológico regional. As menores condições de pressão e temperatura calculadas e a pouca homogeneidade nos resultados são provavelmente explicadas devido ao desequilíbrio de uma ou mais fases minerais com o sistema químico calculado. Quando a hedenberguita é excluída da assembleia mineral para os cálculos termobarométricos, as condições P - T são mais realistas e coerentes com as condições de pressão e temperatura do reequilíbrio metamórfico regional estimado para a área de estudo (condições de P - T entre 770 a 700°C e 13,5 a 10,0 kbar) (Zanardo, 1992, 2003; Del Lama, 1993; Del Lama et al., 1994; Leme, 2016, 2019; Leme et al., 2019).

Os dados mineralógicos, petrográficos e químicos em congruência com os dados de geotermobarometria e idade modelo sugerem um protólito ígneo para o litotipo estudado, formado

a partir de fusão de rochas paleoproterozoicas, cuja mineralogia era constituída provavelmente por ortoclásio, andesina, granada, hedenberguita e quartzo, que esteve em equilíbrio com as condições do auge metamórfico da área de estudo (fácies granulito de alta pressão).

Posterior ao auge metamórfico, durante a implantação das zonas de cisalhamento, o litotipo foi afetado por deformação diferencial progressiva em condições ainda dúcteis, em diferentes graus de intensidade, que catalisou transformações minerais retrogressivas, dando origem a mineralogia hidratada (anfíbólio e biotita) e apagando as feições reliquias nas porções mais deformadas. As condições termo-barométricas estimadas neste estágio registram condições *P-T* em torno de 11,0-10,5 kbar e 750-700°C, e são condizentes com as estimadas para o reequilíbrio metamórfico regional.

Os dados obtidos neste trabalho, em concordância com as condições de pressão e

temperatura do metamorfismo regional estimado para a área de estudo, sugerem trajetória metamórfica com sentido horário, compatíveis com zonas de colisão continental.

A mineralogia pouco comum, que associa clinopiroxênio rico em Ca e Fe e granada em sistemas de composição granítica/granodiorítica originada a partir de produto de fusão, foi sugerida por Patiño Douce (2005) por meio de experimentos de fusão de assembleias tonalíticas (biotita+ anfíbólio + plagioclásio + quartzo) mostrando que a associação mineral pode ser formada em sistemas ígneos estáveis em temperaturas mínimas da ordem de 900°C e pressões acima de 15 kbar. Essas condições são congruentes com as estimadas para o auge metamórfico da porção mais meridional da faixa de rochas atribuídas ao Grupo Araxá (Zanardo, 1992, 2003; Del Lama, 1993; Del Lama et al., 1994; Zanardo et al., 2006; Leme, 2019; Leme et al., 2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O hedenberguita-hastingsita-biotita-granada ortognaisse configura um corpo lenticular, orientado segundo a direção E-W, paralelo a subparalelo à direção das zonas de cisalhamento regionais, e está inserido no contexto de rochas de alta pressão atribuídas ao Grupo Araxá. As rochas que constituem o corpo de ortognaisse apresentam estrutura isotrópica a anisotrópica, podendo exibir domínios bem mais foliados e orientados, em consequência do maior grau de deformação. Nas porções centrais do corpo, a estrutura é predominantemente isotrópica com textura granular hipidiomórfica/alotriomórfica a granoblástica, de granulação média a grossa, tendendo a termos mais anisotrópicos com textura granoblástica inequigranular de granulação média a fina nas bordas do corpo.

As análises geoquímicas mostram que são rochas de tendência cálcio-alcálica e com razão A/CNK próximo de 1,0. O padrão de distribuição dos elementos traços e ETR sugerem que o ortognaisse em estudo apresenta características geoquímicas semelhantes à de rochas geradas em arcos magmáticos.

A idade modelo $T_{DM(Nd)}$, calculada a partir de dados isotópicos Sm/Nd, indica elevado tempo

de residência crustal.

As observações mineralógicas, texturais e petrológicas em consonância com os dados químicos e isotópicos sugerem um protólito ígneo de idade paleoproterozoica, constituído provavelmente por ortoclásio, andesina, granada, hedenberguita e quartzo.

A associação mineral constituída por andesina + ortoclásio + quartzo + granada + hedenberguita, observada nas porções menos deformadas do corpo de ortognaisse, sugere que esta esteve em equilíbrio com as condições de *P-T* durante o auge metamórfico (fácies granulito de alta pressão). Posterior ao auge metamórfico, o ortognaisse foi afetado por deformação diferencial progressiva em condições ainda dúcteis, em diferentes graus de intensidade, que catalisou transformações minerais retrogressivas. As condições de pressão e temperatura calculadas (em torno de 11,0-10,5 kbar e 750-700°C), são congruentes com o reequilíbrio metamórfico regional, e não indicam as condições do auge metamórfico. Os dados obtidos indicam trajetória metamórfica com sentido horário, compatível com zonas de colisão continental.

AGRADECIMENTOS

Os autores externam seus agradecimentos à FAPESP (processo 2013/04235-2), pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.F.M. O cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977.
- ALMEIDA, F.F.M. Origem e evolução da plataforma brasileira. **Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia**. Rio de Janeiro: DNPM, n. 241, 1967. 36p.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; DAVINO, A.; HARALYI, N.L.E. Informações geofísicas sobre o oeste mineiro e seu significado geotectônico. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 52, n. 1, p. 49-60, 1980.
- BOHLEN, S.R. On the formation of granulites. **Journal of Metamorphic Geology**, n. 9, p. 223-229, 1991.
- BROWN, M. Metamorphic patterns in orogenic systems and the geological record. In: CAWOOD, P.A. & KRÖNER, A. (Eds), **Earth Accretionary Systems in Space and Time**. Geological Society, London, Special Publications, v. 318, n. 1, p. 37-74, 2009.
- BROWN, M. The contribution of metamorphic petrology to understanding lithosphere evolution and geodynamics. **Geoscience Frontiers**, v. 5, p. 553-569, 2014.
- CAMPOS NETO, M.C. & CABY, R. Neoproterozoic High-Pressure Metamorphism and Tectonic Constraint from the Nappe System South of the São Francisco Craton, Southeast Brazil. **Precambrian Research**, n. 97, p. 3-26, 1999.
- CAMPOS NETO, M.C. & CABY, R. Terrane Accretion and Upward Extrusion of High-Pressure Granulites in the Neoproterozoic Nappes of Southeast Brazil: Petrologic and Structural Constraints. **Tectonics**, n. 19, n. 4, p. 669-687, 2000.
- CAMPOS NETO, M.C.; BASEI, M.A.S.; JANASI, V.A.; MORAES, R. Orogen migration and tectonic setting of the Andrelândia Nappe system: An Ediacaran western Gondwana collage, south of São Francisco craton. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 32, n. 4, p. 393-406, 2011.
- 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.
- CARSWELL, D.A. & COMPAGNONI, R. Introduction with review of the definition, distribution and geotectonic significance of ultrahigh pressure metamorphism. In: CARSWELL, D.A. & COMPAGNONI, R. (Eds.), **Ultra-high pressure metamorphism**. Eötvös University Press, Budapest. European Mineralogical Union Notes Mineral, v. 5, p. 1-7, 2003.
- CAVALCANTE, J.C.; CUNHA, H.C.; CHIEREGATI, L.A.; KAEFER, L.Q.; ROCHA, J.M.; DAITX, E.C.; COUTINHO, M.G.N.; YAMAMOTO, K.; DRUMOND, J.B.V.; ROSA, D.B.; RAMALHO, R. **Projeto Sapucaí - Estados de São Paulo e Minas Gerais (Relatório Final de Geologia)**. DNPM/CPRM, Brasília, 1979, 299 p.
- CHOPIN, C. Ultrahigh-pressure metamorphism: tracing continental crust into the mantle. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 212, p. 1-14, 2003.
- COOKE, R.A.; O'BRIEN, P.J.; CARSWELL, D.A. Garnet zoning and the identification of equilibrium mineral compositions in high-pressure-temperature granulites from the Moldanubian Zone, Austria. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 18, n. 5, p. 551-569, 2000.
- DE LA ROCHE, H.; LETERRIER, J.T.; GRANDCLAUDE, P.; MARCHAL, M. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1 vs R2-diagram and major-element analyses its relationships with current nomenclature. **Chemical Geology**, v. 29, n. 1-4, p. 183-210, 1980.
- DE PAOLO, D.J. A neodymium and strontium isotopic study of the Mesozoic calc alkaline granitic batholiths of the Sierra Nevada and Peninsular Ranges, California. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, p. 10470-10488, 1981.
- DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. **Rock-forming minerals. Double-chain silicates - v. 2A**. 2 ed. The Geological Society Publishing House, London, Inglaterra, 1997, 764 p.
- 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) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- DEL LAMA, E.A. **Terrenos granulíticos de Guaxupé: Evolução petrológica de um segmento da crosta inferior**. Rio Claro, 1998. 188 p. Tese (Doutorado) - 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.
- FROST, B.R.; BARNES, C.G.; COLLINS, W.J.; ARCULUS, R.J.; ELLIS, D.J.; FROST, C.D.A. Geochemical Classification for Granitic Rocks. **Journal of Petrology**, v. 42, n. 11, p. 2033-2048, 2001.
- GODOY, A.M.; OLIVA, A.; MORALES, N.; ZANARDO, A. Geologia e geoquímica das rochas graníticas da Zona de Sutura Alterosa, região de São Pedro da União-MG. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 417-437, 1999.
- GUIDOTTI, C.V. Micas in metamorphic rocks. In: BAILEY, S.W. (Ed). **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. 1-2-3, 1982, p. 160-166.
- HARALYI, N.L.E.; HASUI, Y.; MIOTO, J.A.; HANZA, 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 a Petrologia**. Boletim Especial. Sociedade Brasileira de Geologia, 1985, p. 71-93.
- HARLEY, S.L. On the occurrence and characterization of ultrahigh-temperature crustal metamorphism. In: TRELOAR, P.J. & O'BRIEN, P.J. (Eds), **What Drives Metamorphism and Metamorphic Reaction?** Geological Society, London. Special Publications, v. 138, p. 81-107, 1998.
- HARLEY, S.L. The origins of granulites: a metamorphic perspective. **Geological Magazine**, v. 126, p. 215-247, 1989.
- HARRIS, N.B.W.; PEARCE, J.A.; TINDLE, A.G.; Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. **Geological Society Special Publications**, v. 19, n. 1, p. 67-81, 1986.
- HASUI, Y. A grande colisão pré-cambriana do sudeste brasileiro e a estruturação regional. **Geociências**, v. 29, n. 2, p. 141-169, 2010.
- IRVINE, T.N.J. & BARAGAR, W.R.A.F. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 8, n. 5, p. 523-548, 1971.
- KELSEY, D.E. On ultrahigh-temperature crustal metamorphism. **Gondwana Research**, v. 13, p. 1-29, 2008.
- KOSTYUK, E.A. & SOBOLEV, V.S. Paragenetic types of calciferous amphiboles of metamorphic rocks. **Lithos**, v. 2, p. 67-81, 1969.
- 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 - 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) - 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. 297-313, 2019.
- LIMA, F.G. **Evolução petrogenética das rochas máficas/ultramáficas na área ao sul do Cráton São Francisco, entre as cidades de Fortaleza de Minas e Jacuí-MG.** 2014. 104p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- LIOU, J.G.; ERNST, W.G.; ZHANG, R.Y.; TSUJIMORI, T.; JAHN, J.G. Ultrahigh-pressure minerals and metamorphic terranes – the view from China. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 35, p. 199–231, 2009.
- LIOU, J.G.; TSUJIMORI, T.; YANG, J.S.; ZHANG, R.Y.; ERNST, W.G. Recycling of crustal materials through study of ultrahigh-pressure minerals in collisional orogens, ophiolites, and mantle xenoliths: a review. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 96, p. 386–420, 2014.
- MALAGUTTI FILHO, W.; EBERT, H.D.; HASUI, Y.; HARALYI, N.L.E.; STURARO, J.R. Gravimetria e compartimentação crustal do sul de Minas Gerais. **Geociências**, v. 15, n. 1, p. 199-217, 1996.
- MORALES, N. **Evolução tectônica do cinturão de cisalhamento Campo do Meio na sua porção ocidental.** Rio Claro, 1993. 2v. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- MORIMOTO, N. Nomenclature of pyroxenes. **Mineralogy and Petrology**, v. 39, n. 1, p. 55-76, 1988.
- 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.
- PATIÑO DOUCE, A.E. Vapor-absent melting of tonalite at 15–32 kbar. **Journal of Petrology**, v. 46, n. 2, p. 275-290, 2005.
- PAULY, J.; MARSCHALL, H.R.; MEYER, H.P.; CHATTERJEE, N.; MONTELEONE, B. Prolonged Ediacaran–Cambrian metamorphic history and short-lived high-pressure granulite-facies metamorphism in the HU Sverdrupfjella, Dronning Maud Land (East Antarctica): evidence for continental collision during Gondwana assembly. **Journal of Petrology**, v. 57, n. 1, p. 185-228, 2016.
- PEARCE, J.A.; HARRIS, N.B.W.; TINDLE, A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. **Journal of Petrology**, v. 25, n. 4, p. 956-983, 1984.
- POWELL, R. & HOLLAND, T.J.B. Optimal geothermometry and geobarometry. **American Mineralogist**, v. 79, p. 120-133, 1994.
- RICHARD, L.R. **Mineralogical and Petrological Data Processing System.** MINPET for Windows. Version 2.02. Copyright 1988-1995, 1995.
- ROBINSON, P.; SPEAR, F.S.; SCHUMACHER, J.C.; LAIRD, J.; KLEIN, C.; EVANS, B.W.; DOOLAN, B.L. Phase relations of metamorphic amphiboles: Natural occurrence and theory. In: VEBLEN, D.R. & RIBBE, P.H. (Eds). **Amphiboles: Petrology and Experimental Phase Relations.** Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, Washington, v. 9B, p. 1-227, 1982.
- SHAND, S.J. **Eruptive Rocks: Their genesis, composition, and classification, with a chapter on meteorites.** J. Wiley & Sons, New York, 1943, 444 p.
- SOARES, P.C.; FIORI, A.P.; CARVALHO, S.G. de. Tectônica colisional oblíqua entre o Bloco Paraná e a margem sul do cráton do São Francisco, no Maciço Guaxupé. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, n. 36., 1990, Natal, RN. **Anais...** Natal: SBG, 1990, v. 6, p. 2723-2734.
- SPEAR, F.S. **Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths.** Mineralogical Society of America, Washington, 1993. 789 p.
- SUN, S.S. & MCDONOUGH, W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and process. **Geological Society, London, Special Publication**, v. 42, n. 1, p. 313-345, 1989.
- 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.
- TROUW, R.A.J.; RIBEIRO, A.; PACIULLO, F.V.P.; HEILBRON, M. Os Grupos São João del Rei, Carrancas e Andrelândia, interpretados como a continuação dos Grupos Araxá e Canastra. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, 1984, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 1984, p. 3227-3240.
- VALERIANO, C.M. The Southern Brasília Belt. In: HELIBRON, M.; CORDANI, U.G.; ALKMIM, F.F. (Eds). **São Francisco Craton, Eastern Brazil – Tectonic Genealogy of a Miniature Continent.** Regional Geology Reviews, Berlin, Heidelberg, Springer, p. 189-203, 2017.
- VALERIANO, C.M.; MEDEIROS, S.R.; VAZ, G.S.; NETO, C.C. Sm-Nd isotope dilution TIMS analyses of BCR-1, AGV-1 and G-2 USGS rock reference materials: first results from the LAGIR Laboratory at UERJ, Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO 45 ANOS DE GEOCRONOLOGIA NO BRASIL, 1, 2009, São Paulo. **Boletim Resumos...** São Paulo, 2009, p. 146-148.
- WHITNEY, D.L. & EVANS, B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. **American mineralogist**, v. 95, n. 1, p. 185-187, 2010.
- WOODSWORTH, G.J. Homogenization of zoned garnets from pelitic schists. **The Canadian Mineralogist**, v. 15, n. 2, p. 230-242, 1977.
- YARDLEY, B.W.D. An empirical study of diffusion in garnet. **American Mineralogist**, v. 62, p. 793-800, 1977.
- ZAKRUTKIN, V.V. & GRIGORENKO, M.W. Titanium and alkalis in amphiboles in metamorphism. **Doklady of the Academy of Sciences of the USSR, Earth Science Section**, v. 173, p. 917-918, 1967.
- ZANARDO, A. **Análise petrográfica, estratigráfica e microestrutural da região de Guaxupé-Passos-Delfinópolis (MG).** Rio Claro, 1992. 288p. Tese (Doutorado) - 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.** Rio Claro, 2003. 304 p. Tese (Livro 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 entre os blocos São Paulo e Brasília. **Revista Brasileira de 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.
- ZHENG, Y.F. & CHEN, R.X. Regional metamorphism at extreme conditions: implications for orogeny at convergent plate margins. **Journal of Asian Earth Sciences**, v. 145, p. 46-73, 2017.

Submetido em 13 de maio de 2020
Aceito em 11 de agosto de 2020

APÊNDICE - TABELAS SUPLEMENTARES

Tabela 1 – Análises de química mineral representativas de feldspatos (feldspato potássico e plagioclásio). Os átomos por unidade de fórmula foram calculados para 8 oxigênios, considerando todo o ferro presente como Fe₂O₃.

Amostra	P-5				P-5B				P-5Cf				P-9B				P-13			
SiO ₂	64.188	64.452	59.226	59.152	63.902	63.947	58.475	60.021	65.264	64.977	65.430	65.106	64.178	63.992	60.405	59.645	63.915	64.060	63.667	63.213
TiO ₂	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al ₂ O ₃	18.985	19.270	26.148	26.066	18.910	18.851	25.888	24.648	19.013	19.051	22.597	22.662	18.906	18.926	25.202	25.520	18.944	18.923	22.630	22.563
Cr ₂ O ₃	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FeO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ₂ O ₃	0.000	0.000	0.000	0.061	0.001	0.025	0.030	0.048	0.006	0.018	0.006	0.034	0.023	0.014	0.054	0.024	0.006	0.000	0.027	0.009
MnO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
BaO	1.135	0.933	0.000	0.000	0.859	0.873	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.892	0.802	0.033	0.006	0.821	0.702	0.007	0.000
CaO	0.000	0.000	6.940	7.090	0.000	0.000	7.140	5.826	0.000	0.000	2.990	3.436	0.000	0.000	6.040	6.685	0.000	0.000	3.237	3.510
Na ₂ O	0.683	1.504	7.650	7.302	1.144	1.750	7.215	8.139	0.697	0.731	9.618	9.438	0.962	1.048	7.707	7.600	0.922	1.167	9.532	9.357
K ₂ O	14.443	13.596	0.226	0.255	14.153	13.218	0.246	0.206	14.812	14.735	0.182	0.152	14.386	14.367	0.349	0.220	14.483	14.208	0.204	0.186
Total	99.434	99.755	100.190	99.926	98.969	98.664	98.994	98.895	99.792	99.512	100.823	100.828	99.347	99.149	99.790	99.700	99.091	99.060	99.304	98.838
Si	2.981	2.972	2.637	2.639	2.977	2.979	2.635	2.698	2.996	2.991	2.853	2.842	2.980	2.977	2.690	2.664	2.976	2.979	2.826	2.821
Al	1.039	1.048	1.372	1.371	1.039	1.035	1.375	1.306	1.029	1.034	1.162	1.166	1.035	1.038	1.323	1.344	1.040	1.037	1.184	1.187
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ba	0.021	0.017	0.000	0.000	0.016	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.015	0.001	0.000	0.015	0.013	0.000	0.000
Ca	0.000	0.000	0.331	0.339	0.000	0.000	0.345	0.281	0.000	0.000	0.140	0.161	0.000	0.000	0.288	0.320	0.000	0.000	0.154	0.168
Na	0.061	0.134	0.660	0.632	0.103	0.158	0.630	0.709	0.062	0.065	0.813	0.799	0.087	0.095	0.666	0.658	0.083	0.105	0.820	0.810
K	0.856	0.800	0.013	0.015	0.841	0.786	0.014	0.012	0.867	0.865	0.010	0.008	0.852	0.853	0.020	0.013	0.860	0.843	0.012	0.011
Ab	6.71	14.39	65.76	64.12	10.94	16.75	63.72	70.81	6.67	7.01	84.44	82.52	9.23	9.98	68.36	66.44	8.82	11.10	83.21	81.94
Anor	0.00	0.00	32.97	34.41	0.00	0.00	34.85	28.01	0.00	0.00	14.51	16.60	0.00	0.00	29.61	32.30	0.00	0.00	15.62	16.99
Or	93.29	85.61	1.28	1.47	89.06	83.25	1.43	1.18	93.33	92.99	1.05	0.87	90.77	90.02	2.04	1.27	91.18	88.90	1.17	1.07

Tabela 2 – Análises de química mineral representativas de granada e proporção molecular. Os átomos por unidade de fórmula foram calculados para 12 oxigênios.

Amostra	P-5					P-5B							P-5Cf						
Análise	1_5	1_6	1_7	1_8	1_9	5_1	5_2	5_4	5_5	5_7	5_8	5_9	3_1	3_2	3_3	3_4	3_5	3_6	3_7
SiO₂	36.516	36.801	37.093	36.743	36.941	36.590	36.330	36.550	36.410	36.200	36.210	36.310	37.300	37.640	37.030	37.310	37.310	37.220	36.850
TiO₂	0.016	0.043	0.031	0.027	0.009	0.030	0.050	0.040	0.030	0.000	0.030	0.040	0.040	0.050	0.050	0.040	0.070	0.080	0.040
Al₂O₃	19.949	20.162	20.134	19.866	20.245	20.600	20.400	20.560	20.420	20.780	20.680	20.390	20.950	21.040	21.090	20.890	20.980	20.700	20.810
Cr₂O₃	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
Fe₂O₃	2.237	1.528	1.768	1.947	1.904	3.250	3.750	3.130	3.200	3.470	3.620	3.350	1.330	0.450	1.100	0.740	1.080	0.800	1.350
FeO	30.751	31.293	31.256	31.015	30.415	29.220	28.750	28.660	28.750	28.810	28.740	29.170	30.010	30.530	29.620	30.160	29.370	29.610	29.460
MnO	0.862	0.775	0.722	0.797	0.819	0.670	0.640	0.660	0.670	0.680	0.690	0.690	0.600	0.570	0.600	0.750	0.530	0.530	1.000
MgO	1.103	1.176	1.181	1.210	1.098	1.070	1.140	1.040	1.080	1.070	1.110	1.120	1.170	1.260	1.090	0.890	1.220	1.190	0.660
CaO	7.922	7.770	8.069	7.856	8.636	9.290	9.350	9.760	9.510	9.180	9.260	9.030	9.240	9.120	9.450	9.410	9.750	9.560	9.700
Na₂O	0.005	0.000	0.008	0.000	0.000	0.010	0.020	0.010	0.010	0.030	0.010	0.000	0.020	0.010	0.000	0.020	0.030	0.020	0.000
K₂O	0.004	0.000	0.000	0.013	0.009	0.010	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	99.141	99.395	100.085	99.280	99.886	100.740	100.430	100.400	100.090	100.220	100.360	100.100	100.670	100.660	100.040	100.210	100.330	99.690	99.870
Si	2.972	2.985	2.987	2.985	2.978	2.929	2.919	2.932	2.932	2.912	2.909	2.927	2.975	2.997	2.968	2.990	2.978	2.992	2.969
Ti	0.001	0.003	0.002	0.002	0.001	0.002	0.003	0.002	0.002	0.000	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.004	0.005	0.002
Al	1.912	1.926	1.910	1.901	1.922	1.944	1.932	1.944	1.939	1.970	1.960	1.938	1.970	1.975	1.993	1.974	1.974	1.961	1.977
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Fe³⁺	0.137	0.093	0.107	0.119	0.115	0.196	0.227	0.189	0.194	0.210	0.219	0.203	0.080	0.027	0.066	0.045	0.065	0.048	0.082
Fe²⁺	2.093	2.123	2.105	2.107	2.050	1.956	1.932	1.923	1.936	1.938	1.931	1.967	2.001	2.033	1.986	2.022	1.960	1.990	1.985
Mn	0.059	0.053	0.049	0.055	0.056	0.046	0.044	0.045	0.045	0.046	0.047	0.047	0.041	0.038	0.041	0.051	0.036	0.036	0.068
Mg	0.134	0.142	0.142	0.147	0.132	0.128	0.136	0.124	0.129	0.128	0.133	0.134	0.139	0.149	0.130	0.106	0.145	0.142	0.079
Ca	0.691	0.675	0.696	0.684	0.746	0.797	0.805	0.839	0.820	0.791	0.797	0.780	0.789	0.778	0.811	0.808	0.834	0.823	0.838
Na	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.002	0.001	0.001	0.004	0.001	0.001	0.002	0.001	0.000	0.003	0.004	0.002	0.000
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Alm	70.29	70.91	70.32	70.42	68.71	66.83	66.23	65.61	66.08	66.76	66.40	67.18	67.37	67.81	66.91	67.69	65.88	66.53	66.84
Prp	4.49	4.75	4.74	4.90	4.42	4.37	4.66	4.23	4.40	4.41	4.57	4.58	4.68	4.97	4.38	3.55	4.87	4.75	2.66
Sps	2.00	1.78	1.65	1.83	1.87	1.57	1.51	1.54	1.54	1.58	1.62	1.61	1.38	1.27	1.38	1.71	1.21	1.20	2.29
Grs	16.42	17.91	17.92	16.92	19.26	18.07	17.08	19.76	18.85	17.61	17.36	17.16	22.66	24.60	24.12	24.77	24.85	25.13	24.23
Adr	6.78	4.65	5.34	5.93	5.73	9.16	10.51	8.86	9.09	9.63	10.05	9.48	3.90	1.35	3.21	2.23	3.19	2.39	3.98
Uv	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00

Tabela 2 – continuação

Amostra	P-9B				P-13							
	Análise	10_1	10_2	10_3	10_4	10_1	10_2	10_3	10_4	10_6	10_7	10_8
SiO₂	35.790	36.010	35.860	35.530	36.820	36.560	36.420	36.340	36.310	36.620	36.610	
TiO₂	0.030	0.030	0.030	0.040	0.050	0.050	0.020	0.030	0.030	0.030	0.050	
Al₂O₃	20.240	20.390	20.480	20.340	20.880	20.830	20.960	20.840	20.730	20.760	20.580	
Cr₂O₃	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.010	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	
Fe₂O₃	4.180	4.150	4.670	4.300	3.080	3.120	3.350	3.540	3.620	3.400	3.450	
FeO	29.300	29.690	29.810	29.290	28.140	27.400	27.900	27.860	27.910	28.360	28.070	
MnO	0.660	0.680	0.660	0.610	0.620	0.550	0.720	0.690	0.660	0.830	1.040	
MgO	1.000	1.210	1.350	1.190	1.230	1.150	1.020	1.120	1.170	0.980	0.860	
CaO	8.580	8.180	7.660	8.180	10.160	10.710	10.200	10.040	9.920	10.020	10.140	
Na₂O	0.010	0.010	0.040	0.000	0.020	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.040	
K₂O	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	
Total	99.800	100.360	100.570	99.480	101.010	100.390	100.610	100.470	100.370	101.010	100.830	
Si	2.904	2.904	2.888	2.890	2.928	2.922	2.911	2.909	2.910	2.921	2.926	
Ti	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	
Al	1.936	1.939	1.944	1.951	1.957	1.963	1.975	1.967	1.959	1.952	1.940	
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	
Fe³⁺	0.255	0.252	0.283	0.263	0.184	0.187	0.202	0.213	0.219	0.204	0.208	
Fe²⁺	1.988	2.003	2.008	1.993	1.872	1.831	1.865	1.865	1.871	1.891	1.877	
Mn	0.045	0.047	0.045	0.042	0.042	0.037	0.049	0.047	0.045	0.056	0.070	
Mg	0.121	0.146	0.163	0.144	0.146	0.137	0.121	0.134	0.140	0.117	0.102	
Ca	0.746	0.707	0.661	0.713	0.865	0.918	0.873	0.861	0.852	0.857	0.868	
Na	0.002	0.001	0.006	0.000	0.003	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	0.005	
K	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	
Alm	68.55	69.00	69.79	68.91	64.00	62.64	64.13	64.16	64.34	64.74	64.35	
Prp	4.17	5.03	5.67	4.98	4.99	4.69	4.16	4.61	4.81	4.01	3.50	
Sps	1.55	1.62	1.56	1.45	1.44	1.27	1.69	1.62	1.55	1.92	2.40	
Grs	14.09	12.85	10.27	12.78	20.98	22.67	20.74	19.81	19.24	19.88	20.07	
And	11.64	11.50	12.71	11.88	8.59	8.69	9.28	9.77	10.06	9.46	9.68	
Uv	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	

Tabela 3 – Análises de química mineral representativas de biotita. Os átomos por unidade de fórmula foram calculados em base anidra para 22 oxigênios, considerando todo o ferro presente como FeO.

Amostra	P-5				P-5B				P-5Cf			P-9B				P-13			
SiO ₂	34.359	34.510	34.422	34.172	34.288	34.699	34.243	34.266	34.467	34.123	33.963	34.425	34.311	34.190	34.154	34.635	34.456	34.128	34.337
TiO ₂	5.011	5.103	5.064	5.090	5.187	5.041	4.962	5.035	3.365	3.629	3.684	3.981	4.072	3.922	3.773	4.833	4.815	5.047	4.902
Al ₂ O ₃	14.550	14.214	14.629	14.215	14.542	14.747	14.579	14.759	15.916	15.992	15.919	15.002	14.975	14.900	14.746	14.311	14.514	14.669	14.320
Cr ₂ O ₃	0.007	0.003	0.010	0.000	0.000	0.006	0.013	0.000	0.000	0.006	0.004	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
FeO	29.771	29.531	29.198	29.676	31.859	31.931	31.669	32.389	32.264	32.271	32.436	31.868	32.114	31.313	32.708	31.605	31.623	31.220	32.145
Fe ₂ O ₃	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MnO	0.041	0.043	0.063	0.026	0.034	0.041	0.014	0.025	0.091	0.060	0.018	0.020	0.040	0.052	0.048	0.046	0.045	0.067	0.034
MgO	3.576	3.793	3.844	3.593	3.904	3.942	3.938	3.753	3.063	2.685	2.736	4.094	4.068	4.018	4.206	4.123	4.075	3.893	4.035
CaO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na ₂ O	0.041	0.052	0.060	0.035	0.038	0.047	0.055	0.057	0.055	0.042	0.047	0.025	0.049	0.187	0.054	0.065	0.042	0.047	0.019
K ₂ O	8.775	8.658	8.775	8.802	8.984	8.931	8.887	8.945	8.752	8.758	8.713	8.559	8.798	8.686	8.750	8.751	8.697	8.718	8.801
Total	96.497	96.308	96.422	95.955	96.840	96.740	95.910	95.600	96.790	95.010	93.150	95.430	94.960	95.760	95.410	96.670	96.030	97.360	96.090
Si	5.476	5.503	5.474	5.483	5.375	5.398	5.387	5.359	5.439	5.414	5.397	5.424	5.398	5.428	5.392	5.438	5.416	5.387	5.399
Al ^{IV}	2.524	2.497	2.526	2.517	2.625	2.602	2.613	2.641	2.561	2.586	2.603	2.576	2.602	2.572	2.608	2.562	2.584	2.613	2.601
Al ^{VI}	0.210	0.176	0.217	0.172	0.062	0.102	0.091	0.080	0.401	0.405	0.379	0.211	0.175	0.217	0.136	0.088	0.105	0.117	0.053
Ti	0.601	0.612	0.606	0.614	0.611	0.590	0.587	0.592	0.399	0.433	0.440	0.472	0.482	0.468	0.448	0.571	0.569	0.599	0.580
Cr	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	3.968	3.939	3.883	3.982	4.176	4.154	4.167	4.236	4.258	4.282	4.311	4.200	4.225	4.158	4.318	4.150	4.157	4.122	4.227
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.006	0.006	0.008	0.004	0.005	0.005	0.002	0.003	0.012	0.008	0.002	0.003	0.005	0.007	0.006	0.006	0.006	0.009	0.005
Mg	0.849	0.901	0.911	0.859	0.912	0.914	0.923	0.875	0.720	0.635	0.648	0.961	0.954	0.951	0.990	0.965	0.955	0.916	0.945
Ca	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Na	0.013	0.016	0.019	0.011	0.012	0.014	0.017	0.017	0.017	0.013	0.014	0.008	0.015	0.058	0.017	0.020	0.013	0.014	0.006
K	1.784	1.762	1.780	1.802	1.797	1.772	1.784	1.785	1.762	1.773	1.766	1.721	1.766	1.759	1.762	1.753	1.744	1.756	1.765
Fe/Fe+Mg	0.824	0.814	0.810	0.823	0.821	0.820	0.819	0.829	0.855	0.871	0.869	0.814	0.816	0.814	0.814	0.811	0.813	0.818	0.817
Mg/Mg+Fe	0.176	0.186	0.190	0.177	0.179	0.180	0.181	0.171	0.145	0.129	0.131	0.186	0.184	0.186	0.186	0.189	0.187	0.182	0.183

Tabela 4 – Análises de química mineral representativas de anfibólio. Os átomos por unidade de fórmula foram calculados em base anidra para 23 oxigênios, considerando todo o ferro presente como FeO.

Amostra	P-5				P-5B				P-5Cf				P-9B				P-13			
SiO₂	40.397	40.407	40.602	40.269	40.492	40.477	40.177	40.340	39.260	38.981	39.238	38.762	40.198	39.999	40.283	40.141	39.661	39.482	39.754	39.797
TiO₂	1.858	1.816	1.604	0.564	1.278	1.632	1.800	1.762	1.054	1.149	1.293	1.269	2.117	1.850	1.848	1.999	1.692	2.045	1.871	2.198
Al₂O₃	11.306	11.642	11.649	12.206	11.999	12.020	11.943	11.923	12.710	12.316	12.452	12.593	11.363	10.810	11.486	11.272	12.316	11.998	12.372	11.887
Cr₂O₃	0.017	0.000	0.024	0.002	0.000	0.009	0.006	0.007	0.010	0.006	0.017	0.000	0.020	0.007	0.016	0.009	0.002	0.000	0.002	0.017
FeO	26.572	26.959	26.763	28.136	25.779	25.581	26.309	26.121	26.872	26.595	26.629	26.149	25.831	26.424	26.312	26.278	25.612	26.358	26.218	26.129
Fe₂O₃	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MnO	0.051	0.079	0.062	0.030	0.061	0.068	0.048	0.056	0.127	0.129	0.109	0.128	0.083	0.054	0.049	0.082	0.066	0.084	0.070	0.113
MgO	3.460	3.356	3.687	3.151	3.884	3.752	3.430	3.628	2.800	2.640	2.557	2.486	3.636	3.855	3.604	3.643	3.497	3.460	3.281	3.451
CaO	10.917	10.819	10.865	10.602	11.061	11.047	11.150	11.008	10.920	10.966	10.784	10.977	10.884	10.895	10.791	10.687	11.042	10.591	11.094	10.928
Na₂O	1.522	1.566	1.538	1.566	1.482	1.468	1.545	1.470	1.271	1.355	1.360	1.191	1.545	1.526	1.508	1.638	1.397	1.542	1.289	1.601
K₂O	1.635	1.565	1.542	1.489	1.598	1.550	1.609	1.624	1.614	1.632	1.620	1.718	1.554	1.577	1.587	1.620	1.743	1.741	1.830	1.759
Total	97.735	98.209	98.336	98.015	98.100	98.640	98.620	98.040	98.890	98.080	98.720	98.190	98.060	98.020	97.770	98.050	97.740	98.450	98.770	98.260
Si	6.397	6.372	6.383	6.385	6.386	6.378	6.337	6.356	6.301	6.320	6.331	6.305	6.379	6.391	6.384	6.377	6.307	6.285	6.289	6.295
Al^{IV}	1.603	1.628	1.617	1.615	1.614	1.622	1.663	1.644	1.699	1.680	1.669	1.695	1.621	1.609	1.616	1.623	1.693	1.715	1.711	1.705
Al^{VI}	0.508	0.536	0.543	0.667	0.617	0.611	0.558	0.571	0.706	0.674	0.700	0.720	0.505	0.427	0.530	0.488	0.616	0.537	0.597	0.511
Ti	0.221	0.215	0.190	0.067	0.152	0.193	0.214	0.209	0.127	0.140	0.157	0.155	0.253	0.222	0.220	0.239	0.202	0.245	0.223	0.261
Fe³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.002	0.000	0.003	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.000	0.003	0.001	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002
Mg	0.817	0.789	0.864	0.745	0.913	0.881	0.806	0.852	0.670	0.638	0.615	0.603	0.860	0.918	0.851	0.862	0.829	0.821	0.774	0.813
Fe²⁺_Y	3.452	3.460	3.401	3.521	3.318	3.314	3.421	3.368	3.496	3.548	3.526	3.522	3.380	3.432	3.397	3.410	3.353	3.398	3.407	3.412
Fe²⁺_X	0.067	0.095	0.118	0.210	0.082	0.057	0.049	0.074	0.111	0.058	0.067	0.035	0.048	0.099	0.091	0.082	0.054	0.112	0.062	0.044
Mn	0.007	0.011	0.008	0.004	0.008	0.009	0.006	0.007	0.017	0.018	0.015	0.018	0.011	0.007	0.007	0.011	0.009	0.011	0.009	0.015
Ca	1.852	1.828	1.830	1.801	1.869	1.865	1.884	1.858	1.878	1.905	1.864	1.913	1.851	1.865	1.832	1.819	1.881	1.807	1.881	1.852
Na_A	0.467	0.479	0.469	0.481	0.453	0.449	0.473	0.449	0.396	0.426	0.425	0.376	0.475	0.473	0.463	0.505	0.431	0.476	0.395	0.491
K_A	0.330	0.315	0.309	0.301	0.322	0.312	0.324	0.326	0.330	0.338	0.333	0.357	0.315	0.321	0.321	0.328	0.354	0.354	0.369	0.355
Fe/Fe+Mg	0.809	0.814	0.797	0.825	0.784	0.790	0.809	0.798	0.839	0.848	0.852	0.854	0.797	0.789	0.800	0.798	0.802	0.805	0.815	0.807
Mg/Mg+Fe	0.191	0.186	0.203	0.175	0.216	0.210	0.191	0.202	0.161	0.152	0.148	0.146	0.203	0.211	0.200	0.202	0.198	0.195	0.185	0.193

Tabela 5 – Análises de química mineral representativas de piroxênio. Os átomos por unidade de fórmula foram calculados na base para 6 oxigênios, considerando todo o ferro presente como FeO.

Amostra	P-5					P-5B						P-9B				P-13				
SiO₂	50.054	50.239	49.931	49.783	50.020	48.063	48.243	48.207	48.259	48.066	47.421	47.895	47.124	47.780	47.670	48.131	48.059	46.674	48.373	48.219
TiO₂	0.079	0.138	0.149	0.103	0.074	0.119	0.078	0.116	0.103	0.128	0.141	0.179	0.201	0.114	0.147	0.196	0.203	0.273	0.195	0.180
Al₂O₃	1.256	1.382	1.539	1.328	1.185	1.329	1.243	1.305	1.408	1.528	1.412	1.940	1.847	1.382	1.562	1.956	2.215	2.922	2.063	2.012
Cr₂O₃	0.006	0.006	0.014	0.002	0.000	0.007	0.000	0.000	0.004	0.014	0.000	0.014	0.013	0.002	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005
FeO	21.446	21.963	21.704	22.241	21.869	22.265	21.911	22.488	22.480	23.657	23.418	22.636	23.084	22.840	23.725	22.026	22.051	23.953	22.026	21.811
Fe₂O₃	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MnO	0.123	0.128	0.094	0.121	0.114	0.097	0.083	0.130	0.109	0.120	0.121	0.114	0.100	0.094	0.144	0.098	0.120	0.117	0.151	0.130
MgO	5.537	5.176	5.217	5.113	5.523	5.903	6.150	6.050	6.038	5.515	5.463	5.389	5.137	5.741	5.616	5.822	5.848	6.044	5.913	6.077
CaO	20.811	20.479	20.441	20.673	21.061	21.203	21.466	21.130	21.289	20.512	20.915	21.479	20.678	20.453	19.657	20.770	20.850	18.718	21.077	20.877
Na₂O	0.633	0.660	0.764	0.744	0.580	0.639	0.559	0.636	0.585	0.717	0.620	0.675	0.895	0.734	0.823	0.926	0.945	0.835	0.842	0.877
K₂O	0.004	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.003	0.009	0.000	0.041	0.013	0.002	0.008	0.000	0.000	0.023	0.004	0.006
Total	99.949	100.171	99.867	100.108	100.426	99.625	99.740	100.062	100.278	100.266	99.511	100.362	99.092	99.142	99.364	99.925	100.291	99.559	100.644	100.194
Si	1.980	1.984	1.978	1.975	1.975	1.929	1.931	1.927	1.925	1.925	1.917	1.912	1.912	1.930	1.926	1.921	1.911	1.880	1.916	1.917
Al^{IV}	0.020	0.016	0.022	0.025	0.025	0.063	0.059	0.062	0.066	0.072	0.067	0.088	0.088	0.066	0.074	0.079	0.089	0.120	0.084	0.083
Al^{VI}	0.039	0.049	0.050	0.037	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.013	0.015	0.019	0.013	0.012
Ti	0.002	0.004	0.004	0.003	0.002	0.004	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.003	0.004	0.006	0.006	0.008	0.006	0.005
Fe³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.326	0.305	0.308	0.302	0.325	0.353	0.367	0.360	0.359	0.329	0.329	0.321	0.311	0.346	0.338	0.346	0.347	0.363	0.349	0.360
Fe²⁺	0.710	0.725	0.719	0.738	0.722	0.747	0.733	0.752	0.750	0.792	0.792	0.756	0.783	0.772	0.801	0.735	0.733	0.807	0.730	0.725
Mn	0.004	0.004	0.003	0.004	0.004	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.005	0.003	0.004	0.004	0.005	0.004
Ca	0.882	0.867	0.868	0.879	0.891	0.912	0.921	0.905	0.910	0.880	0.906	0.919	0.899	0.885	0.851	0.888	0.889	0.808	0.895	0.889
Na	0.049	0.051	0.059	0.057	0.044	0.050	0.043	0.049	0.045	0.056	0.049	0.052	0.070	0.057	0.064	0.072	0.073	0.065	0.065	0.068