



# **METAMORFISMO E MICROESTRUTURAS DAS ROCHAS DE ALTO GRAU DO EMBASAMENTO PALEOPROTEROZOICO DE CAMPINAS-SP**

**Palavras-Chave: Metamorfismo de alto grau, Embasamento, Orógeno Brasília Sul.**

**Autores(as):**

**Helena Pivoto Paiva, IG – UNICAMP**

**Prof. Dr. Wagner da Silva Amaral (orientador), IG – UNICAMP**

**Geólogo Felipe da Silva Aires (coautor) – IGc - USP**

---

## **INTRODUÇÃO:**

A área de estudo situa-se no contexto do Orógeno Brasília, mais especificamente na sua porção extremo sul, na região de Campinas. Trata-se de uma faixa de aproximadamente cinco quilômetros de largura que atravessa todo município de sudoeste à nordeste, constituída por rochas pré-cambrianas que constituem uma lasca do embasamento do Orógeno Brasília Sul.

Este domínio é constituído por rochas metamórficas de médio e alto grau, que neste estudo são separadas em quatro conjuntos de amostras, sendo: clinopiroxênio-ilmenita-granada granulito, clinopiroxênio-granada anfibolito, granulito enderbítico e granada-hornblenda-biotita gnaiss.

Assim sendo, esta pesquisa tem como objetivo investigar a relação petrográfica, microestrutural e metamórfica de granulitos, anfibolitos e gnaisses encaixantes previamente identificados na porção do embasamento de Campinas através de análises petrográficas e quantificação dos minerais que correspondem a paragênese de pico metamórfico.

Além disso, busca-se compreender a relação entre as rochas metamórficas de alto grau e os eventos metamórficos e atividades tectônicas que atuaram regionalmente. A evolução do metamorfismo é analisada em inclusões de quartzo em granada por meio da geobarometria elástica Raman, que é uma técnica moderna utilizada para estimar as condições de pressão e temperatura analisando a pressão residual em inclusões minerais aprisionadas em um hospedeiro (Rosenfeld e Chase, 1961; Angel et al., 2015).

## **METODOLOGIA:**

Esta pesquisa está pautada em quatro pilares principais, ou seja, revisão bibliográfica, microscopia ótica convencional, tratamento e modelagem de dados de química mineral obtidos em microsonda eletrônica e geobarometria elástica Raman.

Foram revisadas literaturas referentes à evolução do Orógeno Brasília Sul, priorizando trabalhos relacionados à geocronologia e petrogênese de rochas metamórficas e à geotectônica (Cioffi, 2016; Amaral et al., 2019; Oliveira e Amaral, 2025), e referente a estudos petrográficos acerca de texturas e microestruturas relativamente raras e similares às das amostras da região de estudo (Chatterjee et al., 2023). A caracterização textural e microestrutural

das lâminas e a seleção de inclusões de quartzo em granada para análise Raman foram realizadas por meio de petrografia ótica convencional.

Os dados de química mineral, obtidos pelo orientador em estudos prévios, foram extraídos através de Microsonda Eletrônica JEOL JXA-8230 (EPMA), na Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus Rio Claro, e tratados e modelados por meio do software MinPlotX, para grãos selecionados de granada, piroxênio, plagioclásio e anfibólio.

As estimativas de pressão e temperatura registradas pelas inclusões de quartzo em granada foram obtidas por meio da geobarometria elástica Raman. As análises Raman foram realizadas utilizando um instrumento confocal Horiba XploRa™ no laboratório Geofluid da Universidade de São Paulo. O processamento e a interpretação dos dados foram realizados usando o Horiba® LabSpec 6™ e o software OriginPro. O estado de deformação das inclusões foi determinado através do software stRAinMAN (Angel et al., 2019). E, as isomecas de aprisionamento foram obtidas após processamento no software EoSFit-Pinc (Angel et al., 2017)

Por fim, são utilizadas as abreviaturas minerais de acordo com Kretz (1983): Aln: Allanita; Ap: Apatita; Bt: Biotita; Cpx: Clinopiroxênio; Grt: Granada; Hbl: Hornblenda; Ilm: Ilmenita; Kfs: K-feldspato; Opx: Ortopiroxênio, Pl: Plagioclásio; Qtz: Quartzo; Rt: Rutilo; Ttn: Titanita; Zrn: Zircão.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO:**

As análises petrográficas e fotomicrografias tem como destaque a descrição de texturas, microestruturas e paragênese pertinentes a cada conjunto de amostras, as quais serão mostradas em detalhe a seguir.

### **a) Clinopiroxênio-ilmenita-granada granulito**

Exibe estrutura maciça, textura granoblástica, simplectítica com três variações: Cpx+Ilm, Cpx+Pl, Hbl+Ilm, e coronítica, marcada por granadas circundadas por simplectitos (Figura 1A/B). As granadas geralmente contêm inclusões e são divididas em duas famílias: subidioblástica e xenoblástica, sendo esta última com grãos mais fraturados. Como paragênese característica tem-se: Cpx + Pl + Grt + Qtz + Rt. Além desses minerais são encontrados na associação mineral Ilm + Hbl + Ttn + Zrn. Com isso esta rocha é considerada de alto grau e fácies granulito.

### **b) Clinopiroxênio-granada anfibolito**

Rocha de estrutura maciça com textura granoblástica, simplectítica (Cpx+Ilm, Cpx+Pl, Hbl+Ilm) (Figura 1C), coronítica incipiente, com simplectitos de Cpx+Pl circunscrevendo grãos de granada, e poiquiloblástica bem destacada por inclusões de zircão na granada (Figura 1D). As granadas acompanham o padrão de duas famílias principais, subidioblástica e xenoblástica, a qual é comumente mais fraturada. A paragênese é composta por: Cpx + Pl + Grt + Hbl + Rt, somando-se a ela Qtz + Ilm + Ttn + Zrn tem-se a associação mineral da rocha, que é de médio a alto grau metamórfico e de fácies anfibolito superior.

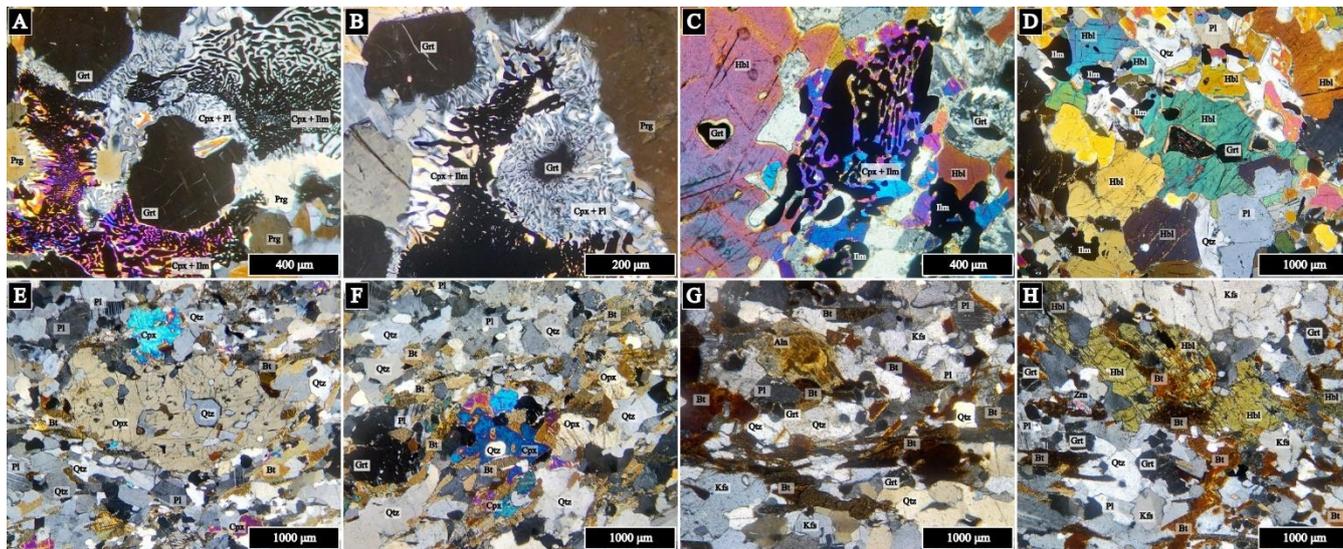
### **c) Granulito enderbítico**

Apresenta estrutura maciça, textura granoblástica, contudo pode-se notar a formação incipiente de bandas félsicas e máficas (Figura 1F), e textura porfiroblástica evidenciada pelo cristal de ortopiroxênio de dimensões bem maiores em relação aos minerais da matriz (Figura 1E). Os grãos de granada se subdividem em subidioblásticos e xenoblásticos, com estes últimos mais fraturados e de maiores dimensões. A assembleia mineral é formada por Cpx + Opx + Grt + Pl + Qtz + Bt + Hbl + opacos + Ttn + Zrn, sendo os cinco primeiros minerais constituintes da

paragênese. Rocha de alto grau metamórfico e fácies granulito.

#### d) Granada-hornblenda-biotita gnaiss

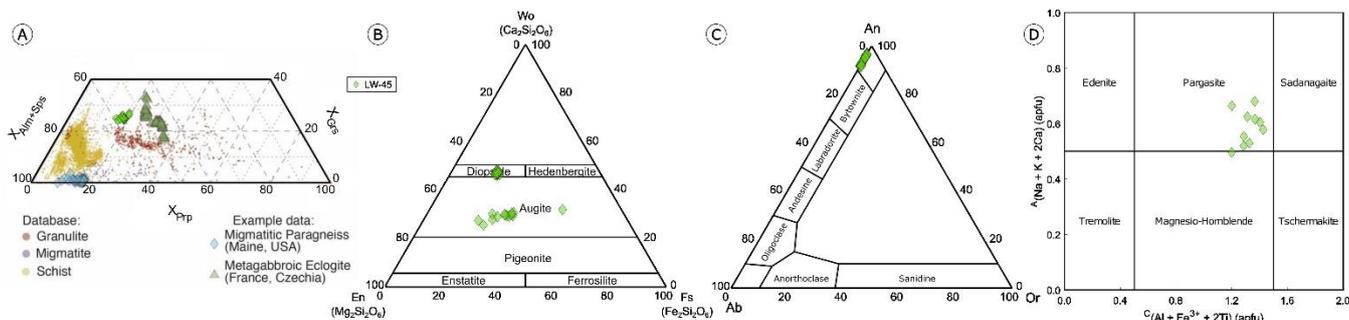
Exibe estrutura bandada, bem marcada por bandas félsicas e máficas (Figura 1H), e textura granolepidoblástica com a foliação destacada pela biotita (Figura 1G). A composição mineral pode ser dividida na porção félsica, Pl + Qtz + Kfs, e na porção máfica, Bt + Hbl + Grt, e junto a elas tem-se os outros minerais da associação: Zrn + opacos + Aln + Ap. A granada se divide em duas famílias, xenoblástica e subidioblástica, a última com grãos menores e pouco fraturada.



**Figura 1.** Fotomicrografias dos quatro conjuntos de rochas metamórficas analisados do embasamento. (A/B) Clinopiroxênio-ilmenita-granada granulito. (C/D) Clinopiroxênio-granada anfibolito. (E/F) Granulito enderbítico. (G/H) Granada-hornblenda-biotita gnaiss. Aln: Allanita; Bt: Biotita; Cpx: Clinopiroxênio; Grt: Granada; Hbl: Hornblenda; Ilm: Ilmenita; Kfs: K-feldspato; Opx: Ortopiroxênio, Pl: Plagioclásio; Prg: Pargasita; Qtz: Quartzo; Zrn: Zircão.

Dentre os quatro grupos de rochas metamórficas analisados do embasamento através da microscopia ótica, o granulito máfico - clinopiroxênio-ilmenita-granada granulito - apresenta uma textura de desequilíbrio interessante, os simplectitos de clinopiroxênio-ilmenita. Essa microestrutura registra condições de instabilidade mineral e sugere reequilíbrios tardios em resposta a variações de pressão e temperatura durante a evolução metamórfica de alto grau. Assim, os simplectitos podem ser interpretados como evidência de reações retrógradas, refletindo trajetórias metamórficas complexas e fornecendo pistas valiosas sobre os processos de decomposição de fases instáveis e sobre a dinâmica de exumação dos granulitos. Tais associações entre clinopiroxênio-ilmenita em granulitos, foram recentemente descritas em estudos petrográficos na região do Escudo Indiano Leste por Chatterjee et al. (2023). Por conta dessas particularidades, duas lâminas de granulito máfico (LW-45) foram selecionadas para análise da química mineral e das inclusões de quartzo em granada para estudo da evolução do metamorfismo.

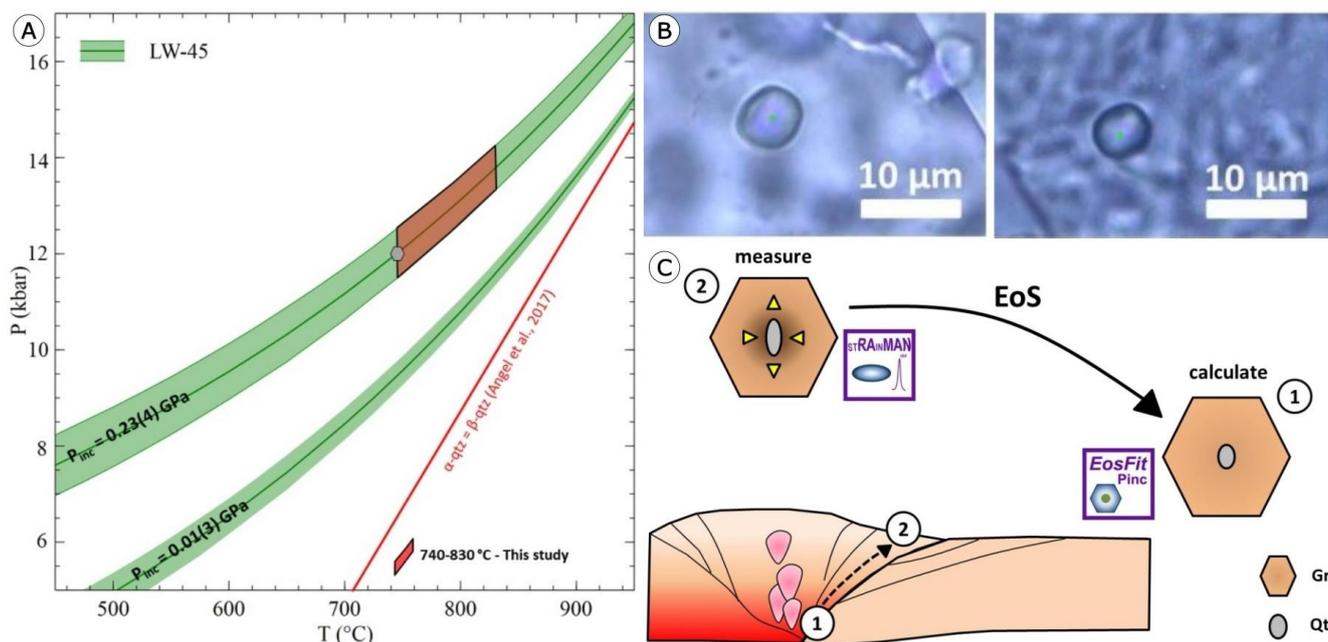
Os dados de química mineral da amostra LW-45, clinopiroxênio-ilmenita-granada granulito, obtidos por meio de microsonda eletrônica e tratados através do MinPlotX, demonstram que a granada é mais rica no membro almandina, ou seja, predominantemente ferrosa, e, com base no diagrama adaptado de Walters e Gies (2025), nota-se que dos dados compilados pelos autores, a granada da LW-45 se aproxima de granadas de proveniência granulítica (Figura 2A). Já quanto aos piroxênios, os resultados se dividem em duas classes: piroxênio mais cálcico, diopsídio, e mais ferroso, augita (Figura 2B). Para os plagioclásios as análises se concentram no campo da anortita (Figura 2C). Por fim, os anfibólios são classificados como pargasita (Figura 2D).



**Figura 2.** Diagramas de química mineral do clinopiroxênio-ilmenita-granada granulito (amostra LW-45). (A) Composição das granadas no diagrama Alm+Sps – Grs – Prp, adaptado de Walters e Gies (2025). (B) Classificação química dos piroxênios. (C) Classificação química dos plagioclásios. (D) Classificação química dos anfibólios.

Paralelamente, a geobarometria elástica Raman da amostra LW-45 revela que as sete inclusões de quartzo em granada (Figura 3B) analisadas podem ser distinguidas em dois grupos tendo como base suas deformações residuais (Figura 3A). O primeiro grupo consiste em duas inclusões com valor médio de Pinc de 0,23(4) GPa (Pinc = pressão sobre a inclusão) com incerteza de  $2\sigma$ , e sua isomeca indica que o núcleo da granada cresceu entre 12,0-13,8(5) kbar e 740-830°C. O segundo grupo compreende cinco inclusões com valor médio de Pinc de 0,01(3) GPa com incerteza de  $2\sigma$ . A isomeca indica que a borda da granada se formou ou se reequilibrou em pressão mais baixa, ou seja, 5,9-6,5(4) kbar e 560-600°C.

Para estudo da trajetória do metamorfismo de alto grau, grãos de granada com núcleo composicionalmente homogêneo são indicados para a estimativa da pressão e da temperatura de equilíbrio da assembleia primária (granoblástica). Já as bordas das fases porfiroblásticas (grãos de granada, por exemplo) registram as condições físicas de reequilíbrio da assembleia durante o retrometamorfismo (Chatterjee et al., 2023).



**Figura 3.** (A) Isomecas de aprisionamento da amostra estudada, indicadas por linhas contínuas com incertezas associadas. (B) Fotomicrografias de inclusões de quartzo em granada com formas ovóides arredondadas. (C) Ilustração esquemática da evolução geodinâmica e do comportamento das inclusões de quartzo em granada durante processos relacionados à subducção-colisão-exumação. (1) Inclusões de quartzo são aprisionadas em granada durante colisão continental. (2) A exumação das rochas metamórficas leva à expansão volumétrica das inclusões de quartzo em resposta à forte descompressão.

As isomecas obtidas pela geobarometria elástica Raman sugerem que as inclusões de quartzo foram aprisionadas durante dois estágios de crescimento da granada em diferentes profundidades de soterramento (Figura 3C), com núcleos exibindo pressões residuais mais elevadas em relação às bordas. Desse modo, considera-se que a

amostra estudada foi submetida a uma trajetória P-T no sentido horário, com forte descompressão acompanhada de resfriamento.

Durante a subducção, as rochas máficas experimentaram metamorfismo progressivo até a colisão continental relacionada à amalgamação Neoproterozoica-Cambriana do Orógeno Gondwana Ocidental. A isomeca de aprisionamento máxima para inclusões de quartzo sugere um valor de pressão entre 12-13,8(5) kbar e 740-830°C, isto é, o crescimento da granada sob condições de fácies eclogito/granulito de alta pressão. Essa faixa de pressão é equivalente a uma profundidade de soterramento de aproximadamente 48 km, assumindo uma densidade média da crosta de  $2,7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ . Após exumação e resfriamento, as inclusões de quartzo na borda da granada se formaram ou se reequilibraram entre 5,9-6,5(4) kbar e 560-600°C, ou seja, uma profundidade de soterramento de aproximadamente 24 km.

Paralelamente, Chatterjee et al. (2023) documentam a ocorrência de intercrescimentos incomuns de clinopiroxênio-ilmenita que substituem de forma variável a titanita em granulitos máficos de alta pressão do Complexo Gnáissico-Granito de Chotanagpur, Escudo Indiano Leste. O estudo associa a formação dos simplectitos de clinopiroxênio-ilmenita à instabilidade da granada e da titanita durante a evolução da rocha ao longo de um caminho P-T retrógrado descompressivo acentuado.

## CONCLUSÕES:

Em suma, as análises das rochas metamórficas de médio e alto grau do embasamento do Orógeno Brasília Meridional revelaram dois estágios tectônicos diferentes registrados por uma trajetória P-T no sentido horário. O primeiro relacionado à subducção/colisão continental, no qual tem-se registro de pressão entre 12-13,8(5) kbar e 740-830°C, ou seja, fácies eclogito/granulito. E, o segundo após exumação e resfriamento, com pressão entre 5,9-6,5(4) kbar e 560-600°C. Essas descobertas corroboram a natureza metamórfica de alta pressão da amostra estudada e sugerem uma rápida exumação para esta parte do Orógeno Gondwana Ocidental.

Além disso, as texturas simplectíticas distintas compostas por ilmenita sustentam a ocorrência de um evento abrupto de retrometamorfismo descompressivo, onde as reações desencadeadas no clinopiroxênio-ilmenita-granada granulito resultam na instabilidade de granada e titanita, dando origem aos intercrescimentos de clinopiroxênio-ilmenita.

## BIBLIOGRAFIA

- Angel, R. J., Mazzucchelli, M. L., Alvaro, M., Nestola, F. 2017. EosFit-Pinc: A simple GUI for host-inclusion elastic thermobarometry. *American Mineralogist*, 102(9), 1957-1960.
- Angel, R. J., Murri, M., Mihailova, B., Alvaro, M. 2019. Stress, strain and Raman shifts. *Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials*, 234(2), 129-140.
- Angel, R. J., Nimis, P., Mazzucchelli, M. L., Alvaro, M., Nestola, F. 2015. How large are departures from lithostatic pressure? Constraints from host-inclusion elasticity. *Journal of Metamorphic Geology*, 33(8), 801-813.
- Amaral, W.S., Santos, F. H., Bravo, J.C.S., Fedel, H.S., Luvizotto, G. L., Godoy, D.F. 2019. U Pb zircon ages and metamorphic conditions of mafic granulites from the basement of the southern Brasília Orogen, Campinas-SP region. *Journal of South American Earth Sciences*, 92, 184-196.
- Chatterjee, S. et al. 2023. Origin of clinopyroxene-ilmenite symplectites in mafic granulites from eastern parts of the Chotanagpur granite gneissic complex, East Indian shield. *American Mineralogist*, 108, 2308–2322.
- Cioffi, C.R., Campos Neto, M.C., Möller, A., Rocha, B.C. 2016. Paleoproterozoic continental crust generation events at 2.15 and 2.08 Ga in the basement of the southern Brasília Orogen, SE Brazil. *Precambrian Research*, 275, 176–196.
- Kretz, R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68, 277–279.
- Oliveira, L.P.B., Amaral, W.S. 2025. Registro de metamorfismo de alto grau no embasamento paleoproterozoico do Município de Campinas (SP). *Terrae Didática*, 21, 1-11.
- Rosenfeld, J. L., Chase, A. B. 1961. Pressure and temperature of crystallization from elastic effects around solid inclusions in minerals. *American Journal of Science*, 259(7), 519-541.
- Walters, J.B., Gies, N.B. 2025. MinPlotX: A powerful tool for formula recalculation, visualization, and comparison of large mineral compositional datasets. *Mineralogia*, 56, 13-22.