

## **QUÍMICA MINERAL DE ENCLAVES MÁFICOS MICROGRANULARES DO STOCK MONTE ALEGRE, NOROESTE DE SERGIPE**

João Pedro Santos de Brito<sup>1,3</sup>, Herbet Conceição<sup>2,3</sup>, Maria de Lourdes da Silva Rosa<sup>2,3</sup>

1. Estudante do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Sergipe
2. Professor(a) do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias/Orientador
3. Pesquisador(a) do Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral

### **Resumo**

O *Stock Monte Alegre* (SMA) é uma das intrusões monzoníticas no Domínio Macururé (DM) e localiza-se no centro do Sistema Orogênico Sergipano. Este *stock* é um dos representantes do magmatismo shoshonítico do DM. O SMA é portador de enclaves máficos microgranulares e cumuláticos, e as estruturas destas rochas refletem a interação entre magmas máfico e félsico na câmara magmática.

Em campo, os enclaves ocorrem na forma de enclaves máficos microgranulares (MME), diques sinplutônicos e como enclaves cumuláticos. A química mineral de silicatos possibilitou uma melhor distinção entre as famílias de enclaves, pois os minerais dos MME exibiram características e afinidades magmáticas mantélicas, enquanto os minerais dos cumulos demonstraram a influência de processos hidrotermais e deutéricos durante a sua gênese.

O objetivo deste trabalho é propor um panorama dos eventos geológicos que resultaram na formação dos enclaves do SMA.

**Palavras-chave:** Petrologia; Termobarometria; Mistura entre Magmas

**Apoio financeiro:** CNPq

**Trabalho selecionado para a JNIC:** UFS

### **Introdução**

Enclaves, segundo Didier (1973), são rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares que ocorrem hospedadas em corpos ígneos. O estudo dos enclaves ígneos microgranulares usualmente permite que se faça inferências sobre a composição, viscosidade e reologia entre o magma hospedeiro e o magma formador dos enclaves, além de possibilitar uma melhor compreensão dos eventos de interação entre os dois magmas (máfico e félsico).

O *Stock Monte Alegre* é uma das intrusões monzoníticas do Domínio Macururé, localizado na região central do Sistema Orogênico Sergipano (SOS). Neste *stock* os monzonitos abrigam enclaves máficos microgranulares (MME) e enclaves de ortoclásio cumulado. A presença de MME é comum em outras intrusões no Domínio Macururé, como por exemplo os *stocks* Granítico Glória Sul (Conceição *et al.* 2016), Monzonítico Glória Norte (Lisboa *et al.* 2019) e Monzonítico Fazenda Lagoas (Fernandes *et al.* 2020). Logo, trata-se de um estudo importante para caracterização geológica em Sergipe e para a evolução do conhecimento geológico no referido estado, principalmente no assunto da granitogênese do Domínio Macururé.

Estudos petrográficos e mineraloquímicos possibilitaram a identificação de determinados grupos de minerais e a respectiva individualização dos minerais constituintes desses grupos, para ambas as famílias de enclaves. Apesar de os enclaves serem formados pelos mesmos grupos de minerais como plagioclásio, feldspato alcalino, biotita, piroxênio, anfibólio, quartzo, titanita, apatita e epidoto, o que varia de uma família de enclave em relação à outra é o volume em que cada um desses grupos ocorre nas rochas e a composição química dos indivíduos que formam esses grupos. Também se conseguiu obter estimativas de pressão e temperatura de cristalização para alguns minerais por meio de investigações geotermobarométricas com cristais do grupo dos clinopiroxênios e anfibólios.

Os objetivos deste trabalho são os de fornecer novos dados e interpretações acerca da geologia do SOS, mais especificamente sobre a origem do magma formador dos enclaves do *Stock Monte Alegre*, sobre os processos magmáticos ocorridos na câmara magmática e sobre as condições de cristalização de alguns grupos de minerais.

### **Metodologia**

Este estudo iniciou-se com o levantamento bibliográfico sobre a geologia do Estado de Sergipe e do *Stock Monte Alegre*, assim como sobre enclaves máficos microgranulares e processos magmáticos envolvidos em sua gênese. O estudo dos enclaves foi realizado em amostras representativas dessas rochas (FDS-15C, FDS-15D, FDS-73, FDS-128A, FDS-128B, SOS-15E, SOS-15F e SOS-15G) que estão disponíveis na litoteca do

Laboratório de Petrologia Aplicada à Pesquisa Mineral (LAPA-UFS).

Realizou-se missão de campo para observar e descrever os afloramentos do *Stock* Monte Alegre e as relações de campo entre esses enclaves e as rochas hospedeiras de composição monzonítica. Nesta missão foram coletadas as novas amostras SOS-15E, SOS-15F e SOS-15G. Em laboratório iniciou-se os estudos com a descrição macroscópica das rochas feita com auxílio de lupa estereoscópica da marca *Olympus* (SZX7). Em seguida, foi feita a descrição microscópica das lâminas delgadas polidas utilizando-se microscópios petrográfico e eletrônico, disponíveis no Condomínio de Laboratórios Multiusuários das Geociências da UFS (CLGeo-UFS). O microscópio petrográfico utilizado foi o da marca Opton (TNP-09T), com disponibilidade de observações com luz transmitida e refletida. A petrografia eletrônica, por sua vez, foi feita utilizando o detector de elétrons retroespalhados (BSE = Backscattered-Electron), que se encontra instalado no Microscópio Eletrônico de Varredura da Tescan®, modelo Vega 3 LMU, disponível no CLGeo-UFS.

A obtenção de dados químicos pontuais dos minerais foi feita com espectrômetro de energia dispersiva (EDS) da marca *Oxford Instruments* (X-Act). As condições analíticas durante as análises foram tensão de 20 kV com feixe de elétrons de 400 nm, e com tempo de contagem médio de 60 segundos. O EDS é rotineiramente calibrado com a energia do Cu e com padrões internacionais de minerais e óxidos da Artimex. Para os elementos com conteúdos iguais ou superiores a 10% em peso, o erro na determinação é inferior a 1%; entre 10-1% em peso, o erro é de 10%; e para conteúdos inferiores a 1%, o erro situa-se entre 20-30%.

O cálculo das fórmulas estruturais dos feldspatos foi realizado com base em 8 átomos de oxigênios (O), anfibólios com base em 23 O, piroxênios, em 6 O, e titanita, com base em 5 O.

Os cristais de anfibólios foram utilizados para o cálculo da temperatura de cristalização, com base no algoritmo de Ridolfi *et al.* (2010), e a pressão, com o algoritmo de Anderson & Smith (1995). Os cristais de clinopiroxênios foram igualmente utilizados para calcular a temperatura e pressão de sua cristalização, segundo o algoritmo de Putirka *et al.* (2003).

## Resultados e Discussão

Os enclaves máficos microgranulares ocorrem isolados ou reunidos em forma de diques sinplutônicos. Eles apresentam formatos elipsoidais cujo eixo maior varia de 10 cm a cerca de 1m. Baseando-se nas características petrográficas (macroscópica e microscópica) foi possível identificar a presença de duas famílias de enclaves: MME e cumuláticos.

Os MME apresentam texturas porfírica, hipidiomórmica e granulação fina. Eles têm composição que varia de monzonito a quartzo-monozodiorito. Os minerais essenciais são plagioclásio, feldspato alcalino, biotita. Os minerais varietais são clinopiroxênio, anfibólio e quartzo. Titanita, apatita, zircão, epidoto e minerais opacos ocorrem como minerais acessórios. Os enclaves cumuláticos correspondem a ortoclásio cumulatatos, têm cor marrom escura, textura porfírica e pegmática com fenocristais de ortoclásio medindo até 10 cm de comprimento. Os minerais acessórios são quartzo, biotita, clinopiroxênio, apatita, titanita, epidoto, zircão e minerais opacos.

A apatita é um mineral acessório frequente nos dois grupos de enclaves. Ela apresenta hábito acicular e ocorre como inclusões na maioria dos cristais presentes nos enclaves estudados. Hibbard (1991) chama atenção para o fato da dominância de cristais poiquilíticos em rochas, particularmente quanto à presença de apatita acicular, pois estas são feições normalmente presente em rochas formadas a partir da interação entre magmas máfico e félsico.

A composição química dos minerais foi obtida nos dois grupos de enclaves. Os plagioclásios dos encaves têm composições variando de albita a oligoclásio. A obtenção de perfis químicos em cristais de plagioclásio permitiram identificar que o núcleo do cristal possui maior teor de An% do que as bordas, indicando a presença de zoneamento químico normal, o que é interpretado como a existência de processo de cristalização fracionada. O ortoclásio e microclina peritéticos estão presentes nestas rochas. As fases exsolvidas são praticamente puras, todavia nos ortoclásio cumulatatos a composição corresponde a anortoclásio..

A variação composicional dos clinopiroxênios estudados aloca-se no campo Quad, do diagrama Q-J (Morimoto, 1989), e superpõe a área delimitada por Piá Cid *et al.* (2000) para clinopiroxênios de rochas shoshoníticas. Os clinopiroxênios que ocorrem nas duas famílias de enclaves correspondem à diopsídio e augita e, assim como os cristais de plagioclásio, por vezes exibem zoneamento normal, com o centro do cristal mais magnésiano e augítico, enquanto a periferia é mais cálcica e condiz com a composição de diopsídio. Stabel *et al.* (2001), sobre cristais de clinopiroxênio do Sienito Piquiri, afirma que a redução no teor de MgO no sentido do centro para a borda dos cristais de clinopiroxênio indica diminuição das condições de oxidação. Segundo o geotermobarômetro aplicado para os clinopiroxênios, a cristalização deles iniciou em condições pressões de 22,2 Kbar (80 km de profundidade) e temperaturas de 1330 °C. Tais condições apresentam valores mantélicos ou próximos da interface crosta-manto, e segundo Lisboa *et al.* (2019), os magmas shoshoníticos formadores dos enclaves do *Stock* Glória Norte tiveram origem em profundidades correspondentes à descontinuidade de Mohorovicic.

Os cristais de anfibólio, com base no critério químico estabelecido em Leake (1971), foram classificados como não-magmáticos e magmáticos. Cristais com composição de actinolita e mg-hornblenda não são ígneos. Os cristais magmáticos correspondem a tschermakita, edenita, pargasita, mg-hastingsita e mg-sadanagaita (este último como o primeiro cristal de mg-sadanagaita encontrado em Sergipe).

Os cristais de anfibólios magmáticos foram utilizados para cálculos geotermobarométricos. Os cristais dos MME formaram-se a 904°C e 8,5 Kbar, enquanto que os cristais dos ortoclásio cumulatatos cristalizaram a

930°C e 8,3 Kbar. Estes dados indicam profundidade de cristalização em torno de 30 km.

Cristais de titanita dos ortoclásio-cumulatos apresentaram conteúdos de Elementos Terras Raras (ETR) de até 5,6%, e o padrão de abundância dos ETR na titanita foi o seguinte: La>Ce>Y>Nd>Gd>Sm, com os ETR leves sendo mais abundantes que os pesados e médios. Cristais de titanita magmática estudados por Kontonikas-Charos *et al.* (2019) apresentaram Ce>>Nd>La, enquanto os cristais de titanita hidrotermais ou deutéricos exibiram predominância de La em relação ao Nd.

A razão de Fe/Al na titanita é utilizada por Kowallis *et al.* (2018) para distinguir titanitas magmáticas vulcânicas ou plutônicas (Fe/Al = 1:1 ou Fe/Al > 1:2) de titanitas hidrotermais, metamórficas ou pegmatíticas (resultados de Fe/Al muito dispersos e menores que 0,5). Os valores obtidos para os cristais de titanita dos enclaves do SMA são, para Fe/Al, menores que 0,5 e variam de 0,25 a 0,5. Outro parâmetro utilizado para caracterizar os cristais de titanita é o exposto em Piuzeira *et al.* (2008), no qual a razão de  $Ti^{4+}/(Al+Fe^{3+})$  indica se a titanita tem afinidade crustal ou mantélica. Há cristais de titanita nos MME do Stock Monte Alegre com afinidade crustal e cristais mantélicos; já os cristais de titanita dos ortoclásio-cumulatos possuem todos afinidade crustal.

## Conclusões

Há dois grupos de enclaves no Stock Monte Alegre: os enclaves máficos microgranulares e os ortoclásio cumulatatos. Os MME do SMA apresentam-se nas formas de elipsoides dispersos na rocha hospedeira e em forma de diques sinplutônicos, indicando coexistência entre magmas intermediário e máfico. Os ortoclásio cumulatatos possuem formas semelhantes aos MME, mas o que os difere do enclave microgranular é a textura pegmatítica com cristais de ortoclásio medindo até 10 cm de comprimento.

Os pulsos de magma máfico formador dos enclaves foram originados abaixo da crosta, em condições mantélicas ou próximas à descontinuidade de Mohorovicic. De acordo com este fato, os enclaves do Stock Monte Alegre apresentaram valores de pressão e temperatura de cristalização mais elevados que outras rochas magmáticas do Sistema Orogênico Sergipano.

Há dois grupos de anfibólios nos enclaves estudados: os magmáticos e os não-magmáticos. Enquanto os anfibólios não-ígneos são resultados de reequilíbrio com fluidos durante o resfriamento das rochas, os magmáticos forneceram temperatura de cristalização inicial em torno de 930°C e pressão de 8,5 Kbar, o que corresponde a uma profundidade de 31 km.

A mg-sadanagaita encontrada nos enclaves do Stock Monte Alegre é o primeiro registro de um anfibólio com tal composição no estado de Sergipe.

Nos MME há cristais de titanita magmática com afinidades mantélica e crustal. A titanita dos enclaves cumulatáticos, por sua vez, teve sua formação relacionada a processos hidrotermais.

O processo de formação desses enclaves foi complexo e dinâmico, envolvendo mistura de magmas, cristalização fracionada, acúmulo de fases félsicas (ortoclásio) que gerou os ortoclásio-cumulatos, e eventos de hidrotermalismo.

## Referências bibliográficas

- Anderson, J. L., Smith, D. C. (1995). The effects of temperature and fO<sub>2</sub> on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist*, 80(5-6), 549-559. <https://doi.org/10.2138/am-1995-5-614>.
- Conceição, J. A., Rosa, M. L. S., Conceição, H. (2016). Sienogranitos leucocráticos do Domínio Macururé, Sistema Orogênico Sergipano, Nordeste do Brasil: Stock Glória Sul. *Brazilian Journal of Geology*, 46(1), 63-77. DOI: 10.1590/2317-4889201620150044.
- Didier, J. (1973). *Granites and their enclaves*. Elsevier, 393 pp.
- Fernandes, D., Lisboa, V. A., Rosa, M. L. S., Conceição, H. (2020). Petrologia e idade do Stock Fazenda Lagoas, Domínio Macururé, Sistema Orogênico Sergipano, NE-Brasil. *Geologia USP. Série Científica*, 20(1), 39-60. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v20-160040>
- Hibbard, J. M. (1991). Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid systems. In: Didier J, Barbarin B, editors. *Enclaves and granite petrology*. *Developments in Petrology*, v.13, Amsterdam: Elsevier, p.431-444.
- Kontonikas-Charos, A., Ehrig, K., Cook, N. J., Ciobanu, C. L. (2019). Crystal chemistry of titanite from the Roxby Downs Granite, South Australia: insights into petrogenesis, subsolidus evolution and hydrothermal alteration. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 174(7). doi:10.1007/s00410-019-1594-2.
- Kowallis, B. J., Christiansen, E. H., Dorais, M. J., Winkel, A., Henze, P., Franzen, L., Webb, H. (2018). Compositional variation of Fe, Al and F in Titanite (Sphene); Abstracts with Programs, Paper no. 137-11; Geological Society of America: Boulder, CO, USA; Volume 50.
- Leake, B. E. (1971). On aluminous and edenitic hornblendes. *Mineralogical Magazine*, 38 (296): 389-407.

Lisboa, V. A. C., Conceição, H., Rosa, M. L. S., Fernandes, D. M. (2019). The onset of post-collisional magmatism in the Macururé Domain, Sergipano Orogenic System: the Glória Norte Stock. *Journal of South American Earth Sciences*, 89, 173-188. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2018.11.005>.

Morimoto, N. (1989). Nomenclature of pyroxenes. *The Canadian Mineralogist*, 27(1), 143-156.

Piá Cid, J., Bonin, B., Conceição, H., Nardi, L. V. S. (2000). Mineralogical and geochemical discrimination between K-rich syenites in Northeastern Brazil. In: *International Geological Congress*, 31, Rio de Janeiro, Abstracts, CD-rom.

Piuzana, D., Castañeda, C., Noce, C. M., Pedrosa-Soares, A. C., Silva, L. C. (2008). Titanite crystal chemistry and U-Pb isotopic data: a petrogenetic indicator for Precambrian granitoid plutons of the Eastern Brazilian Shield. *Geonomos, Belo Horizonte*, v.16, n.1, p.29-36.

Putirka, K. D., Mikaelian, H., Ryerson, F., Shaw, H. F. (2003) New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved, and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake River Plain, Idaho. *American Mineralogist*, 88, 1542–1554.

Stabel, L. Z., Nardi, L. V. S., Piá Cid, J. (2001). Química Mineral e Evolução Petrológica do Sienito Piquiri, Magmatismo Shoshonítico, Neo-Proterozóico, Pós-Colisional no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. 31. 211. 10.25249/0375-7536.200131221122.