



Caracterização das associações paragenéticas e fases minerais relevantes para análises petrocronológicas do setor norte do Domínio Carajás, Pará

Jonathas Marinho Sanches; Carolina Penteadó Natividade Moreto; Poliana Iara de Freitas Toledo
Instituto de Geociências – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) – Campinas, Brasil

Resumo: O Domínio Carajás, localizado no sudeste do Cráton Amazônico comporta alguns dos maiores depósitos cupríferos do tipo IOCG mundialmente conhecidos. Estes depósitos naturalmente despertaram interesse econômico e científico que tem incitado a pesquisa geológica na região. Apesar deste esforço, grande parte da história geológica da região, incluindo a definição das idades de evento(s) tectono-metamórfico(s) e mineralizante(s) ainda permanece pouco compreendida, em parte, devido à complexa superposição de eventos metamórficos e hidrotermais (típicos de depósitos IOCG) e reativações de descontinuidades crustais no Arqueano e Paleoproterozoico.

Visando oferecer subsídios para possíveis interpretações futuras a respeito da evolução destas rochas, foram analisadas petrograficamente amostras de anfibólitos pertencentes ao Supergrupo Itacaiúnas, de idade neoarqueana (ca. 2,77 Ga), com a intenção de estabelecer a correlação petrogenética, incluindo as relações texturais e estruturais, da titanita com as demais fases minerais presentes nas rochas, fornecendo subsídios para estudos geocronológicos a serem desenvolvidos.

A titanita ocorre geralmente associada a, ou inclusa em cristais de hornblenda e biotita, formando coronas de reação ao redor de ilmenita, ou com inclusões de ilmenita. A calcopirita ocorre tanto em contato com a titanita quanto preenchendo fraturas. Foram observados cristais de titanita parcialmente inclusos na calcopirita.

As relações da titanita com as outras fases da assembleia mineral, e suas relações texturais indicam que a formação da titanita ocorreu durante um processo de hidratação da assembleia durante o retrometamorfismo em fácies anfibólito, cronologicamente anterior ao evento mineralizador.

Palavras Chave: Petrocronologia, Província Carajás, Depósitos IOCG

1. Introdução:

A Província Carajás, localizada na região sudeste do Cráton Amazonas, contém uma das maiores reservas minerais do mundo (Xavier *et al.*, 2017). Dentre os diversos tipos de depósitos encontrados na região, destacam-se os sistemas IOCG (óxido de ferro-cobre-ouro) pela sua relevância econômica. Estes depósitos se encontram principalmente no Domínio Carajás (Figura 1), porção norte da província, ao longo de duas zonas de cisalhamento regionais distintas (Cinzento e Canaã dos Carajás) com direções E-W e ESE-WNW (Moreto *et al.*, 2015).

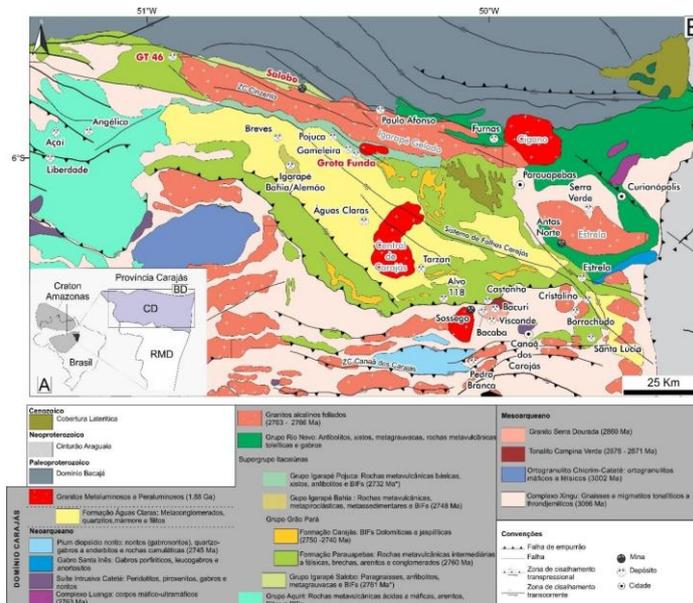


Figura 1: Mapa geológico do Domínio Carajás e áreas adjacentes modificado por Toledo *et al.* (2019) de Vasquez *et al.* (2008)

Não obstante à grande quantidade de pesquisa que vem sendo realizada na região, ainda não foi proposto um modelo de história evolutiva consensual da região, em grande parte devido à criação de uma história tectono-metamórfica complexa com diversos eventos hidrotermais que se sobrepõem.

Segundo Engi & Lanari (2017), obter uma única idade é virtualmente ineficaz para a compreensão da prolongada história geológica de uma rocha. Devido a essas limitações, a abordagem petrocronológica pode ser utilizada como alternativa. Esta, ao relacionar os resultados geocronológicos com informações petrográficas (e.g., texturas, estruturas, paragéneses metamórficas), fornece uma correlação entre as idades e os eventos metamórficos e deformacionais. Dessa forma, não é obtida apenas uma “idade total” para a rocha, mas sim idade(s) do(s) evento(s) que afetaram a rocha.

Visando auxiliar na interpretação destes eventos foram realizadas análises buscando a identificação e caracterização petrográfica detalhada das fases minerais passíveis de datação U-Pb (monazita, allanita, xenotima, zircão, titanita e rutilo) e suas relações com as paragéneses minerais metamórficas e hidrotermais, texturas e estruturas em depósitos IOCG (Salobo, GT-46, Grota funda e QT-02) do setor norte do Domínio Carajás



2. Materiais e Métodos:

Foram realizadas análises petrográficas e em microscópio eletrônico de varredura (MEV) de lâminas delgadas polidas de anfíbolitos dos depósitos Salobo, GT-46, Grota funda e QT-02.

Devido às medidas de segurança tomadas pela reitoria da UNICAMP mediante à pandemia do COVID-19, os laboratórios necessários para a execução da segunda parte do projeto, que consistiria na análise petrográfica e em MEV de rochas ricas em granada para caracterização de fases datáveis foi inviabilizada, sendo então substituída por uma revisão bibliográfica da aplicação do sistema U-Pb em titanita e monazita.

2.1 Revisão Bibliográfica:

A revisão bibliográfica foi realizada ao longo de todo projeto. Em sua primeira fase o foco foi a compreensão da geologia do Domínio Carajás, depósitos do tipo IOCG e métodos de datação do sistema U-Pb na perspectiva da petrocronologia.

Na segunda fase do projeto a revisão tomou um caráter mais específico, abrangendo o funcionamento do sistema U-Pb nos minerais titanita e monazita e a aplicação dos modelos de datação neste contexto, incluindo dois breves estudos de caso.

2.2 Petrografia:

As análises petrográficas foram realizadas em microscópios óticos de luz transmitida e refletida no Instituto de Geociências da Universidade de Campinas (IG-Unicamp). Dentre as diversas lâminas de anfíbolitos analisadas apenas 3 delas apresentavam cristais de titanita: SAL-FD177-131.10 (coletada no depósito Salobo, furo 177, profundidade 131,10 metros); GT-46-FD44/193.10 (coletada no depósito GT46, furo 44, profundidade 193,10) e PB-37-23 (amostra coletada em campo na Zona de Cisalhamento Cinzento, coordenadas: 22N - 386889/9347864), e, conseqüentemente, apenas estas foram incluídas no escopo do projeto e utilizadas na análise em MEV.

2.3 MEV:

As análises em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) também foram realizadas no IG-Unicamp. Essas análises permitiram a confirmação e o refinamento das correlações entre as fases minerais, e a discriminação de fases muito pequenas para caracterização ótica, além de permitir uma análise qualitativa de variações na concentração de elementos mais pesados nos minerais utilizando um EDS (*energy dispersive spectrometer*) acoplado ao MEV. Apenas as lâminas SAL-FD177-131.10 e GT-46-FD44/193.10 foram utilizadas nas análises em MEV.

3. Resultados:

3.1 Revisão Bibliográfica:

3.1.1 Sistema U-Pb:

O sistema U-Pb de datação se baseia no decaimento dos isótopos radioativos ^{238}U e ^{235}U nos isótopos estáveis ^{206}Pb e ^{207}Pb respectivamente (Machado & Simonetti, 2001). O processo de

decaimento normalmente ocorre ao longo do tempo geológico a uma taxa considerada constante. Estas duas grandezas que configuram o processo: a taxa de decaimento e o tempo, são normalmente definidos em termos da constante de decaimento e de meia-vida do isótopo.

O método mais comum para definição de idades utilizando os isótopos de Urânio é por meio da reta da Concordia, definida por Wetherill (1956). Nesta metodologia são utilizadas duas idades independentes, obtidas por meio das séries ^{238}U e ^{235}U . Os dados são dispostos em um diagrama $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ por $^{236}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, onde os pontos em que as idades destas séries coincidem compõem a chamada “curva da concórdia” (Wetherill, 1956).

Para definir a idade de uma determinada amostra, estas razões são medidas analiticamente e plotadas no diagrama, caso ambas as idades coincidam (idades concordantes), o ponto determinado cairá exatamente sobre a curva da concórdia, revelando a idade de cristalização do sistema mineral (Machado & Simonetti, 2001).

De acordo com Wetherill (1956) as idades apenas serão concordantes caso o sistema químico do mineral seja fechado. Em um sistema aberto, os pontos plotados não irão coincidir com a reta da concórdia, em vez disso formarão uma reta denominada “discórdia”. Esta reta cruza a reta da concórdia em 2 pontos, o mais antigo representando a idade de cristalização do sistema e o mais recente, o último evento geológico que tenha alterado o sistema.

3.1.2 Sistema U-Pb aplicado à datação de titanita:

A titanita (CaTiSiO_5) é um mineral acessório relativamente comum capaz de incorporar elementos como ETRs, Zr, e principalmente U (Khon, 2017), tornando-a um mineral de interesse para datação por meio do sistema U-Pb.

Trabalhos recentes como os de Zhang e Schärer (1996) e Gao *et al* (2012) têm demonstrado que a temperatura de fechamento do sistema U-Pb da titanita pode alcançar valores entre 700°C e 825°C. Porém, fases com Ti e Ca são comuns na maioria das rochas, fazendo com que a titanita seja bastante reativa, especialmente durante o metamorfismo (Frost *et al*, 2000).

Nota-se portanto que a titanita perde Pb por difusão apenas em condições de temperatura elevada o suficiente para abrir o sistema U-Pb. Ainda assim, devido à sua alta reatividade, a titanita pode passar por processos de recristalização *subsolidus* em condições metamórficas mais brandas, nos quais se comporta como um sistema aberto (Zhang e Shärer, 1996).

Considerando este comportamento geoquímico, um mesmo cristal de titanita pode, ao longo de sua história metamórfica, passar por diversas etapas de recristalização e crescimento, resultando na oportunidade e necessidade de distinguir estas populações petrograficamente e atribuir-lhes valor petrocronológico.



Cioffi *et al* (2019) é um ótimo exemplo desta aplicação. Neste trabalho os autores utilizam a metodologia U-Pb juntamente com análise de elementos traço em titanita para definir a trajetória P-T-t de metatexitos em fácies anfibolito superior do Complexo Pouso Alegre, pertencente ao embasamento do Orógeno Brasília, de idade Neoproterozóica.

Com o auxílio de petrografia e de imagens em BSE obtidas em MEV, os autores puderam identificar pelo menos 3 domínios diferentes na estrutura interna dos grãos de titanita (figura 2). Nestes domínios foram realizadas análises de elementos traço, revelando a existência de um enriquecimento de ETR sistemático das bordas externas em relação aos núcleos, especialmente de elementos terras raras pesados.

Por meio do comportamento geoquímico do Zr e de outros ETRs, os autores puderam concluir com um bom grau de certeza que as bordas externas da titanita estão relacionadas com recristalizações e crescimentos durante o retrometamorfismo associado à exumação do complexo, enquanto os núcleos podem ser correlacionados com o pico metamórfico do sistema, datados por meio do sistema U-Pb em titanita respectivamente a 619.8 ± 6.3 Ma e 605.7 ± 6.2 Ma.

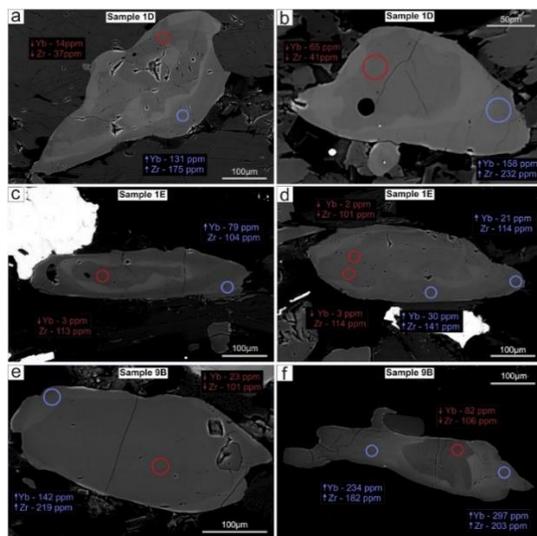


Figura 2: Imagem em BSE de grãos de titanita analisados. Os círculos vermelhos representam os spots nos núcleos e os círculos azuis os spots na borda externa. Os valores de Yb e Zr estão ao lado de seus respectivos spots. Note o enriquecimento de Yb e Zr nas bordas externas em relação aos núcleos. Retirado de Cioffi *et al.* (2019)

3.1.3 Sistema U-Pb aplicado à datação de monazita:

A monazita é um petrocronômetro amplamente utilizado na literatura devido à sua alta afinidade com U e Th, baixa concentração de Pb natural, resistência a dano por radiação, e finalmente por interagir fortemente com elementos traço capazes de serem relacionados com condições de (re)cristalização (Kyander-Clark, 2017).

A temperatura de fechamento do sistema apresenta valores próximos a 700°C, podendo em determinadas condições alcançar até

950°C, por exemplo, um grão esférico de monazita de 20 µm de diâmetro, a uma taxa de resfriamento de 10°C/Ma (Cherniak, *et al*, 2003).

Assim como todo mineral que incorpora elementos radioativos, a monazita é suscetível a danos na estrutura cristalina como consequência do decaimento destes elementos. Contudo a monazita apresenta uma notável capacidade de reconstituir a sua estrutura cristalina por meio de um processo de “recozimento térmico” ainda pouco compreendido, que pode ocorrer em temperaturas consideravelmente baixas (Nasdala *et al*, 2020). A capacidade da monazita de se recuperar do dano causado pela radiação é extremamente útil por impedir a formação de zonas metamitizadas amorfas que permitem o escape tanto dos isótopos pai e filho quanto dos intermediários (Harrison *et al*, 2002).

A grande dificuldade da datação de monazita advém da ampla gama de reações capazes de produzir monazita, tanto durante metamorfismo progressivo quanto retrógrado, gerando diversas populações de monazita com diferentes idades, e composições (Khon e Malloy, 2004).

No estudo realizado por Khon e Malloy (2004) fica clara a utilidade e dificuldade de se utilizar a monazita para datação de eventos metamórficos. O estudo foi realizado nas Smoky Mountains, Carolina do Norte, EUA.

As análises demonstraram que havia clara associação entre os grãos de monazita e rochas de grau metamórfico na zona da estauroлита ou maior, além de uma associação espacial da monazita com auréolas de biotita ao redor de grãos de granada. Também foram encontradas, por meio de mapas composicionais, inclusões de monazita em granada, imediatamente externas a anéis de alta concentração de Y nas granadas (figura 3-D).

De acordo com os autores, estes anéis se formam como consequência da dissolução da granada durante a formação da estauroлита. A ocorrência de monazita imediatamente externa a estes anéis indica a formação da monazita durante a cristalização de estauroлита.

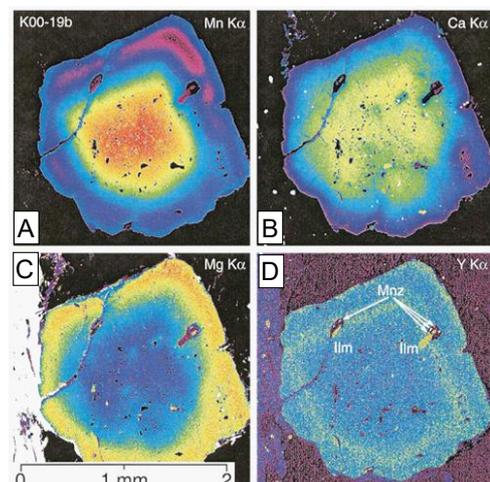


Figura 3: Mapas composicionais de um dos cristais de granada analisados. Repare na figura D o anel de alta concentração de Y e a ocorrência de monazita externa a este anel. Modificado de Khon e Malloy (2004)



3.2 Descrição das amostras:

A figura 4 apresenta as fotomicrografias e respectivas imagens em BSE das lâminas nas quais se observam cristais de titanita.

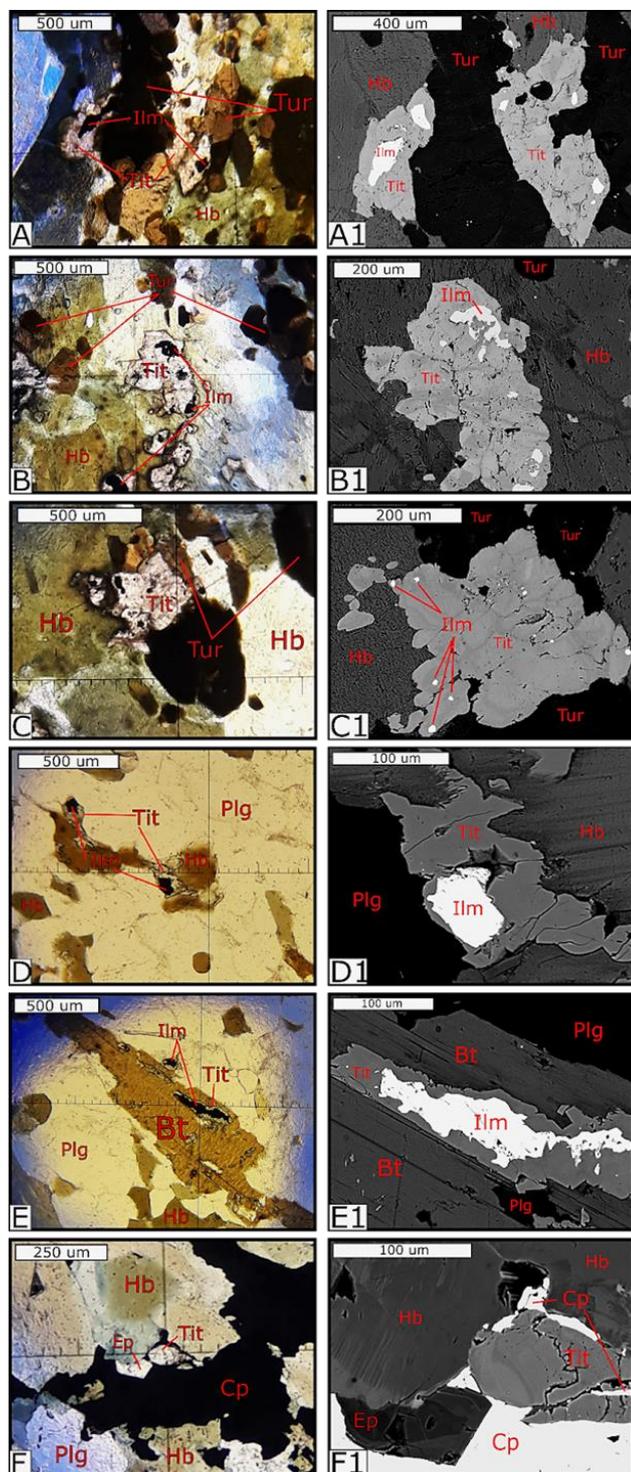


Figura 4: Cristais de titanita analisados na lâmina SAL-FD177-131.10 (A/A1 - C/C1) e GT-46-FD44/193.10 (D/D1 - F/F1). A-F são imagens de petrografia em luz natural, enquanto A1-F1 são as respectivas imagens em MEV dos cristais de titanita. A e A1) titanita desenvolvida como corona de reação ao redor de ilmenita no contato entre a hornblenda e a turmalina, inclusões de ilmenita; B e B1) titanita com inclusões de ilmenita totalmente inclusa em hornblenda; C e C1) titanita com múltiplas inclusões de ilmenita; D e D1)

titanita cristalizada como corona de reação ao redor de ilmenita, no contato entre hornblenda e plagioclásio; E e E1) ilmenita bordada por titanita completamente inclusa em biotita; F e F1) titanita associada com calcopirita, com preenchimento de fraturas por calcopirita. Reparar as inclusões de ilmenita presentes em praticamente todos os cristais de titanita. Reparar a ocorrência de ilmenita bordada por titanita inclusa em Biotita (E; E1), exemplificando uma continuação do processo de retrometamorfismo, onde a hornblenda altera para biotita. Notar também a sutil variação de tonalidade presente em alguns cristais de titanita (A1, B1, C1 e F1), além da ausência de zonamentos concêntricos.

Abreviações: Tit=titanita; Ilm=ilmenita; Hb=hornblenda; Plg=plagioclásio; Ep=Epídoto; Cp=calcopirita, Tur=turmalina.

As amostras (SAL-FD177-131.10; GT-46-FD44/193.10 e PB-37-23) são compostas aproximadamente por hornblenda (35-45%), plagioclásio (45-55%), titanita (5-15%) e minerais acessórios como ilmenita, clorita, biotita, cloritóide, calcopirita, turmalina e epídoto. Estruturalmente apresentam uma foliação Sn marcada por hornblenda, plagioclásio e, quando presente, turmalina, bem como textura sub-nematoblástica a nematoblástica. O plagioclásio se encontra parcialmente saussuritizado. Na lâmina SAL-FD177-131.10, turmalina ocorre abundantemente, perfazendo 20 a 30% da amostra.

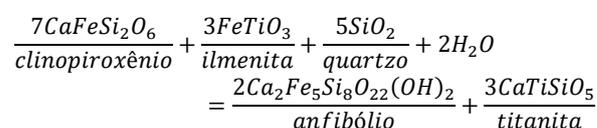
A titanita ocorre em todas as lâminas analisadas, como grãos sub-milimétricos a milimétricos (0,2 - 2,5 mm), de hábito amorfo. Comumente ocorre como coronas de reação ao redor de cristais de ilmenita, ou apresentando inclusões de ilmenita.

A titanita ocorre nas bordas de cristais de hornblenda e de biotita, comumente ocorrendo associada a plagioclásio e turmalina quando presentes. Localmente a titanita pode ocorrer completamente inclusa em hornblenda ou em biotita. Nas porções mineralizadas da lâmina GT-46-FD44/193.10 a calcopirita ocorre em contato com e preenchendo fraturas na titanita. Não foram observadas inclusões de titanita na calcopirita.

4. Discussão:

Segundo Harlov *et al.* (2005), a formação de titanita bordando ilmenita em condições de metamorfismo em Fácies Anfibolito pode ser resultado de 3 diferentes reações, respectivamente: um equilíbrio entre as fases, hidratação e oxidação das fases reagentes.

A ausência de quantidades significativas de magnetita, associada à presença de um clinopiroxênio encontrado na lâmina SAL-FD177-131.10 indica que a titanita tenha se formado em uma reação de hidratação:



Muito provavelmente resultado de uma reidratação da paragênese mineral durante o retrometamorfismo em fácies anfibolito, durante a evolução metamórfica da área. Outra evidência da continuação



do processo de reidratação é a ocorrência de biotita (Figura 4 E e E1). A estabilização da titanita em um ambiente de hidratação de uma assembleia com clinopiroxênio e ilmenita é corroborada por Khon (2017).

A variação de tonalidade dos cristais de titanita observada em MEV (Figura 4 - A1, B1, C1 e F1; Figura 5), pode estar relacionada ao enriquecimento do mineral em elementos mais pesados. Podendo tanto ser resultado de fracionamento de ETRs durante os processos de metamorfismo, quanto de interações com fluidos hidrotermais.

Devido à forte alteração hidrotermal a qual as rochas do setor norte do Domínio Carajás foram submetidas, estes fluidos também podem ter uma origem metassomática, e não apenas resultado de metamorfismo.

A lâmina GT-46-FD44/193.10 possui uma faixa de maior concentração de sulfetos, onde a titanita se encontra associada com calcopirita. A presença de fraturas preenchidas por calcopirita na titanita (Figura 5) indica que o evento de formação da titanita é anterior aos eventos de mineralização que envolveram o depósito.

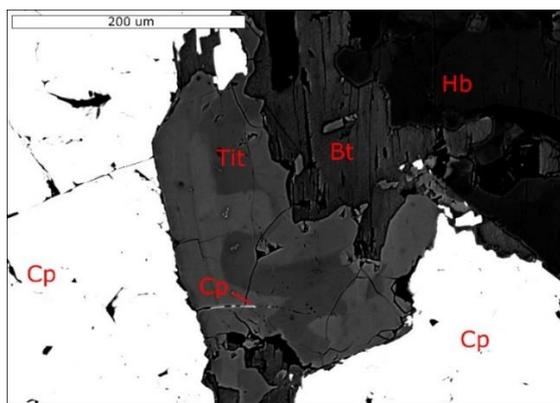


Figura 5: Imagem de uma titanita da lâmina GT-46-FD44/193.10. Destaque para a fratura preenchida por calcopirita na porção inferior do cristal, bem como na variação de tonalidade interna da titanita, possivelmente causada por interações com fluidos. Abreviações: Tit=titanita; Cp=calcopirita; Bt=biotita; Hb=hornblenda.

5. Conclusão:

Enquanto a revisão bibliográfica permitiu uma compreensão mais aprofundada das técnicas de datação por U-Pb em titanita e monazita, as análises petrográficas e em MEV permitiram uma compreensão melhor do contexto de ocorrência da titanita nos depósitos:

- Provavelmente a titanita é resultado da reidratação da paragênese anterior (clinopiroxênio-ilmenita-quartzo) durante um evento retrometamórfico em grau anfibolito
- A cristalização de titanita é anterior ao evento de mineralização.
- As variações de tonalidade observadas em MEV podem ser resultado da interação da titanita com fluidos metamórficos ou hidrotermais que tenham mobilizado elementos pesados (como Y e ETRL), ou uma consequência do fracionamento de ETRs durante o processo metamórfico.
- Não foi possível identificar relação clara entre a formação da titanita e o grau de deformação das amostras, contudo, todas as três

amostras do escopo apresentavam foliação ou bandamento Sn variando entre incipiente e bem marcado.

6. Agradecimentos:

Agradecimentos pelo suporte financeiro fornecido pelo CNPq durante toda a vigência de bolsa da presente pesquisa e à Profa^{Dr} Carolina Penteadó Natividade Moreto por fornecer as lâminas analisadas e pelo apoio. Assim como o apoio e suporte da M.^a Poliana Iara de Freitas Toledo, e de todo o Instituto de Geociências da Unicamp (IG).

7. Referências:

- Cherniak, D. J., Watson, E. B., Grove, M., Harrison, T. M. (2004). Pb diffusion in monazite: a combined RBS/SIMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(4), 829-840.
- Cioffi, C. R., Neto, M. C. C., Möller, A., Rocha, B. C. (2019). Titanite petrochronology of the southern Brasília Orogen basement: Effects of retrograde net-transfer reactions on titanite trace element compositions. *Lithos* 344: 393-408.
- Engi, M., Lanari, P., & Kohn, M. J. (2017). Significant ages—An introduction to petrochronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83(1), 1-12.
- Frost, B. R., Chamberlain, K. R., Schumacher, J. C. (2001). Sphegne (titanite): phase relations and role as a geochronometer. *Chemical geology*, 172(1-2), 131-148.
- Gao, X. Y., Zheng, Y. F., Chen, Y. X., Guo, J. (2012) Geochemical and U–Pb age constraints on the occurrence of polygenetic titanites in UHP metagranite in the Dabie orogen. *Lithos* 136: 93–108, doi:10.1016/j.lithos.2011.03.020
- Groves, D. I., Bierlein, F. P., Meinert, L. D., Hitzman, M. W. (2010). Iron oxide copper-gold (IOCG) deposits through Earth history: Implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Economic Geology*, 105(3), 641-654.
- Harlov, D. E., Hansen, E. C. (2005). Oxide and sulphide isograds along a Late Archean, deep-crustal profile in Tamil Nadu, south India. *Journal of Metamorphic Geology*, 23(4), 241-259.
- Harrison, T. M., Catlos, E. J., Montel, J. M. (2002). U-Th-Pb dating of phosphate minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 48(1), 524-558.
- Kohn, M. J., Malloy, M. A. (2004). Formation of monazite via prograde metamorphic reactions among common silicates: implications for age determinations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(1), 101-113.
- Kylander-Clark, A. R. (2017). Petrochronology by laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 83(1), 183-198.
- Machado, N., Simonetti, A. (2001). CHAPTER 9. UPb DATING AND Hf ISOTOPIC COMPOSITION OF ZIRCON BY LASER ABLATION-MC-ICP-MS. *Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences: Principles and Applications*. 29.
- Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Creaser, R.A., Dufrene, S.A., Melo, G.H.C., Delinardo da Silva, M.A., Tassinari, C.C.G., and Sato, K., (2015 b). Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide-copper-gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás province, Brazil: Mineralium Deposita, v. 50, p. 517–546, doi: 10.1007/s00126-014-0549-9.
- Nasdala, L., Akhmadaliev, S., Burakov, B. E., Chanmuang, C., Škoda, R. (2020). The absence of metamictisation in natural monazite. *Scientific Reports*, 10(1), 1-9.
- Toledo, P. I. F., Moreto, C. P. N., Xavier, R. P., Gao, J., Matos, J. H. S. N., de Melo, G. H. C. (2019). Multistage Evolution of the Neoproterozoic (ca. 2.7 Ga) Igarapé Cinzento (GT-46) Iron Oxide Copper-Gold Deposit, Cinzento Shear Zone, Carajás Province, Brazil. *Economic Geology*, 114(1), 1-34.
- Vasquez L. V., Rosa-Costa L. R., Silva C. G., Ricci P. F., Barbosa J. O., Klein E. L., Lopes E. S., Macambira E. B., Chaves C. L., Carvalho J. M., Oliveira J. G., Anjos G. C., Silva H. R. (2008). Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: Texto Explicativo dos Mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Organizadores: Vasquez L.V., Rosa-Costa L.R. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.
- Verts, L. A., Chamberlain, K. R., & Frost, C. D. (1996). U-Pb sphegne dating of metamorphism: The importance of sphegne growth in the contact aureole of the Red Mountain pluton, Laramie Mountains, Wyoming. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 125(2-3), 186-199.
- Xavier, R. P., Moreto, C. P. N., Monteiro, L. V. S., Melo, G. H. C., Toledo, P. I. F., Hunger, R. B., Delinardo da Silva, M., Previato, M., Jesus, S. S. G. P., Huhn, S. B. (2017). Geology and metallogeny of Neoproterozoic and Paleoproterozoic copper systems of the Carajás Domain, Amazonian craton, Brazil: SGA, Biennial Meeting, 14th, Quebec, Canada, August 20–23, 2017, Proceedings, p. 899–902.
- Zhang, L. S., Schärer, U. (1996). Inherited Pb components in magmatic titanite and their consequence for the interpretation of U Pb ages. *Earth and Planetary Science Letters*, 138(1-4), 57-65.