

transmitida e refletida no Instituto de Geociências (UNICAMP). O acervo de lâminas petrográficas contou com 16 amostras confeccionadas a partir de testemunhos de sondagens cedidos pela empresa Vale S.A., no âmbito do projeto de doutorado da MSc. Laryssa de Sousa Carneiro. As amostras selecionadas para o estudo pertencem aos depósitos Hades, Hades Nordeste e Jaguar Norte, abrangendo as características de rochas hospedeiras, zonas de alteração hidrotermal e zonas mineralizadas da área de estudo.

3. RESULTADOS

Buscando identificar e caracterizar as microestruturas de deformação e fases minerais datáveis pelo método U-Pb (e.g. zircão, titanita, apatita, monazita, rutilo) dos depósitos Hades, Hades Nordeste e Jaguar Norte, foram descritas 16 lâminas delgadas-polidas confeccionadas a partir de testemunhos de sondagens (Tabela 1).

Tabela 1. Relação de amostras descritas em microscópio óptico.

Depósito	Código	Descrição-síntese
Hades	PKC HADES DH04/106,60	Metagranodiorito com veios de epidoto
	PKC HADES DH04/39,35	Brecha hidrotermal sulfetada de Qtz-Chl-Ccp
	PKC HADES DH07/53,80	Metamonzogranito com veios de Ep-Act sulfetados
	PKC HADES DH07/51,70	Veio hidrotermal mineralizado de Ccp=Ep-Act
	PKC HADES DH07/116,30	Metamonzogranito hospedeiro
	PKC HADES DH12/140,10	Zona de alteração com actinolita recortada por veios de Ep=Ccp
	PKC HADES DH12/281,00	Anfibolito hospedeiro
	PKC HADES DH12/48,75	Metagranodiorito alterado com veios e <i>fronts</i> de Chl-Ep-Cal
	PKC HADES DH12/55,90	Metagranodiorito alterado com veios e <i>fronts</i> de Chl-Ep-Cal
Hades Nordeste	PKC HADES DH20/225,40	Metagranodiorito hospedeiro
	PKC HADES NE DH02/125,80	Metamonzogranito alterado
	PKC HADES NE DH02/44,90	Anfibolito alterado com veios de Cal=Ccp
Jaguar Norte	PKC HADES NE DH02/59,60	Metamonzogranito alterado com veios de Qtz-Chl
	PKS JAGN DH19/40,15	Metamonzogranito hospedeiro
	PKS JAGN DH19/151,50	Veio hidrotermal de Bt-Chl com <i>fronts</i> de Chl=Ccp
	PKS JGN DH19/149,50	Veio hidrotermal de Bt-Chl com veios de Cal

Qtz: Quartzo; Chl: Clorita; Ccp: Calcopirita; Ep: Epidoto; Act: Actinolita; Cal: Calcita; Bt: Biotita; Fds: Feldspato.

3.1. Depósito Hades

No depósito Hades são identificados três litotipos associados a diferentes níveis de alteração hidrotermal (Tabela 1). O metagranodiorito é composto por plagioclásio (22-40%), quartzo (28-20%), feldspato alcalino (12-25%), sericita (2-5%), clorita 4-15%), epidoto (2-15%), calcita (<1-8%), titanita (1-8%), zircão (1%), monazita (<1%), apatita (<1-2%) e minerais opacos (comumente pirita e calcopirita, <1-3%). Apresenta textura blasto-porfirítica caracterizada por porfiroblastos de plagioclásio, microclínio e quartzo. Comumente exibe vênulas e *fronts* de uma associação de clorita, epidoto e calcita como elementos da assembleia hidrotermal das amostras. O quartzo ocorre como *ribbon*, e apresenta extinção ondulante e microfraturas. Além disso, apresenta estrutura do tipo núcleo-manto marcada por textura de subgrãos e exibem contatos lobulados e serrilhados nos cristais, com reentrâncias. Observa-se rotação de subgrãos associada ao quartzo (Fig. 2A), podendo apresentar lamelas de deformação e migração de borda de grão (Fig. 2B). Porfiroblastos de plagioclásio e feldspato potássico exibem estruturas do tipo núcleo-manto. O plagioclásio pode

apresentar sombras de pressão definida por grãos de quartzo e clorita estirados, além de microfraturas com deslocamento associado evidenciando deslocamento plástico. Agregados granulares e lamelares de sericita ocorrem nas bordas e no centro dos grãos de plagioclásio. Subordinadamente, podem apresentar saussuritização e albitização. Embora pouco comum, o plagioclásio pode exibir macla de deformação, por vezes, do tipo *flame-shaped* e migração de borda de macla. Entre os minerais datáveis, são identificados apatita, titanita, monazita e zircão. A apatita ígnea ocorre como cristais arredondados como inclusões em quartzo e/ou feldspato. Apatita hidrotermal ocorre em vênulas e *fronts* de clorita, epidoto e/ou calcita. A titanita possui hábito losangular e apresenta sombras de pressão de clorita seguindo orientação da rocha (Fig. 2C). Titanita hidrotermal aparece comumente como cristais alterados, deformados e microfraturados. Comumente associada a pequenos *fronts* de clorita, epidoto e calcita, pode ocorrer associada a cristais de quartzo deformados (extinção ondulante e textura de subgrãos), parcialmente inclusas nesses cristais. A monazita aparece como grãos anédricos e arredondados. Podem estar associadas a quartzo estirado e feldspato ou vênulas e *fronts* de clorita. O zircão ocorre raramente com hábito granular (Fig. 2D).

O metamonzogranito é composto por plagioclásio (32-35%), quartzo (15-25%), feldspato alcalino (20-30 %), sericita (1-5%), clorita (6%), actinolita (5%), epidoto (2-10%), calcita (<1-4%), titanita (1 %), monazita (<1%) e minerais opacos (comumente pirita e calcopirita, <1-4%). Apresenta textura blasto-porfirítica. Observa-se vênulas e *fronts* de uma associação de clorita, epidoto e calcita também associadas a este litotipo. O quartzo apresenta microfraturas intra- e intergranulares com extinção ondulante e textura de subgrãos (Fig. 2E). Observa-se migração de borda de grão indicando processo de recristalização dinâmica do tipo *bulging*. Rotação de subgrãos e estiramento associados ao quartzo podem ser observados. Porfiroblastos de plagioclásio e feldspato potássico exibem estruturas do tipo núcleo-manto (Fig. 2F). Por sua vez, o plagioclásio pode apresentar deformação lamelar e maclas de deformação. No metamonzogranito, são identificados cristais de titanita, apatita e monazita (Fig. 2G). A titanita é hidrotermal ocorre com sombras de pressão de clorita. Muitos cristais apresentam-se alterados para ilmenita ou com halos de alteração com epidoto. São encontrados associados aos *fronts* com clorita, epidoto e calcita. A apatita aparece como grãos arredondados e hexagonais inclusos em quartzo e/ou feldspato. Por fim, a monazita ocorre raramente com hábito granular.

O anfibolito é composto por plagioclásio (45%), actinolita (35%), sericita (12%), quartzo (5%), rutilo (2%) e minerais opacos (<1%). Exibe textura nematoblástica definida por cristais prismáticos de actinolita, com vênulas intergranulares de quartzo. Apresenta microfraturas intra- e intergranulares indiscriminada, além de extinção ondulante associada ao quartzo. Alteração sericítica é observada no

plagioclásio. O rutilo compõe a assembleia de minerais datáveis e ocorre como cristais subédricos com hábito prismático e granular de 0,1 a 1 mm (Fig. 2H).

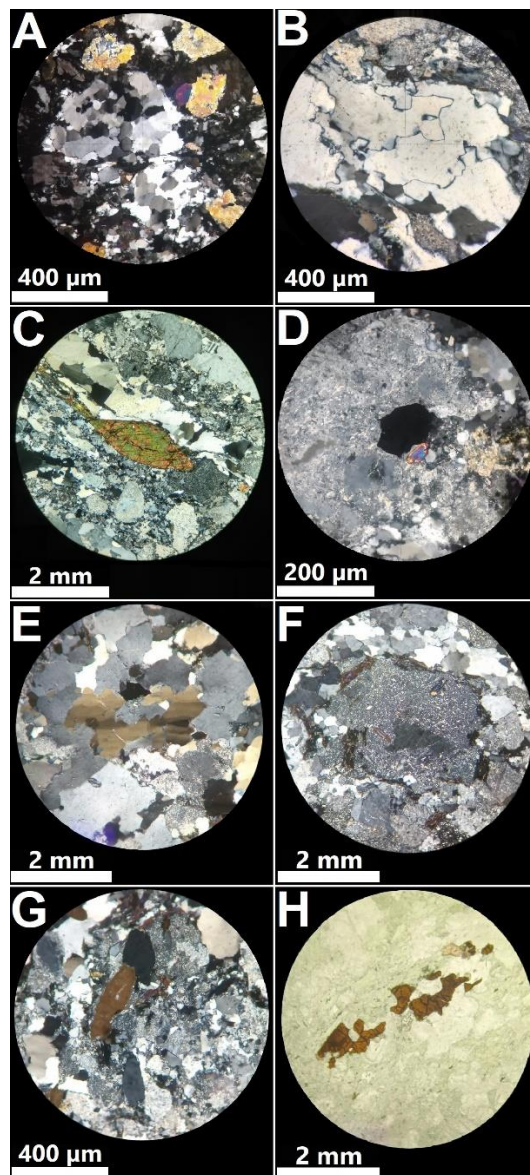


Figura 2. A) Agregado de Qtz granular (centro) com extinção ondulante evidenciando rotação de subgrãos sob nicóis cruzados. B) Grãos de quartzo com contatos suturados, migração de borda de grão e bulging sob nicóis cruzados. C) Cristal de titanita com sombra de pressão de clorita ao longo da foliação da rocha sob nicóis cruzados. D) Cristais de zircão associados a apatita inclusos em feldspato alterado por sericita. E) Textura de subgrãos em quartzo (centro) sob nicóis cruzados. F) Microestrutura núcleo-manto em porfiroblasto de plagioclásio sericitizado sob nicóis cruzados. Estrutura do tipo pinning com bordas do plagioclásio ligadas a cristais lamelares de clorita também é observada. G) Cristais de apatita associada a titanita alterada sob nicóis cruzados. H) Cristais de rutilo na amostra sob nicóis des cruzados.

3.2. Depósito Hades Nordeste

No depósito Hades Nordeste são identificados dois litotipos com distintos estágios de alteração hidrotermal (Tabela 1). O metamonzogranito é composto por quartzo

(30-36%), plagioclásio (25-26%), feldspato alcalino (15-20%), sericita (4-5%), clorita (8-7%), epidoto (5-3%), calcita (4-3%), titanita (2%), zircão (<1%), apatita (<1%) e pirita (2%). Apresenta textura blasto-porfirítica com vênulas e *fronts* de alteração de clorita, calcita e epidoto preenchendo microfraturas e cavidades na amostra. O quartzo exhibe extinção ondulante, lamelas de deformação, microfraturas e estiramento. Subordinadamente, microfraturas são preenchidas por subgrãos de quartzo caracterizando recristalização dinâmica do tipo *bulging* (Fig. 3A). Subgrãos de quartzo podem marcar estruturas do tipo núcleo-manto em porfiroblastos de feldspato (Fig. 3A). Agregados de quartzo ocorrem em toda a amostra com formatos interlobados e contatos irregulares suturados/serrilhados. O contato suturado/serrilhado evidencia migração de borda de grão. Observa-se rotação de subgrãos. Por vezes, ocorrem vênulas de quartzo com sobrecrecimento de calcita em suas bordas. O quartzo nessas vênulas apresentam contatos retos. Observa-se recristalização estática nessas vênulas. Porfiroblastos de plagioclásio e feldspato potássico exibem estruturas do tipo núcleo-manto e textura *flame-shaped* associada a migração de borda de macla e maclas de deformação. No plagioclásio, microfraturas com deslocamento associado evidenciam deslocamento plástico. Podem apresentar saussuritização e albitização. Considerando a assembleia de minerais datáveis, no metamonzogranito identifica-se titanita, zircão e, raramente, apatita. A titanita possui hábito granular e losangular (Fig. 3C). Titanita hidrotermal ocorre comumente como cristais alterados, deformados e microfraturados. Podem apresentar estágio avançado de alteração para ilmenita e inclusões de pirita. Encontra-se associada a vênulas e pequenos *fronts* de clorita, epidoto, calcita e, subordinadamente, pirita. O zircão ocorre associado a vênulas e *fronts* de alteração de clorita e calcita e, subordinadamente, inclusos em plagioclásio epidotizado e quartzo (Fig. 3D). Apatita, quando presente, são grãos arredondados e hexagonais inclusos em quartzo presente em vênulas intergranulares.

O anfibolito é composto por actinolita (25%), feldspato (30%), quartzo (5%), sericita (12%), epidoto (8%), clorita (4%), calcita (5%), calcopirita (10%) e pirita (1%). Exibe textura nematoblástica definida por cristais prismáticos de actinolita, com vênula intergranular de actinolita bem formada associada a $Chl+Ep+Ccp+Fds$. O quartzo apresenta extinção ondulante e estiramento associados. Por vezes, podem aparecer preenchendo vênulas e microfraturas associadas a calcita, marcando uma textura de subgrãos. Fragmentos de quartzo podem ocorrer associado a vênula sulfetada que recorta a amostra. Com formatos interlobados, o contato entre os agregados de quartzo é suturado, caracterizando migração de borda de grão, embora pouco comum. Apresentam microfraturas intragranulares. Alteração sericítica é observada no plagioclásio. No caso do anfibolito, não é identificado nenhum mineral datável.

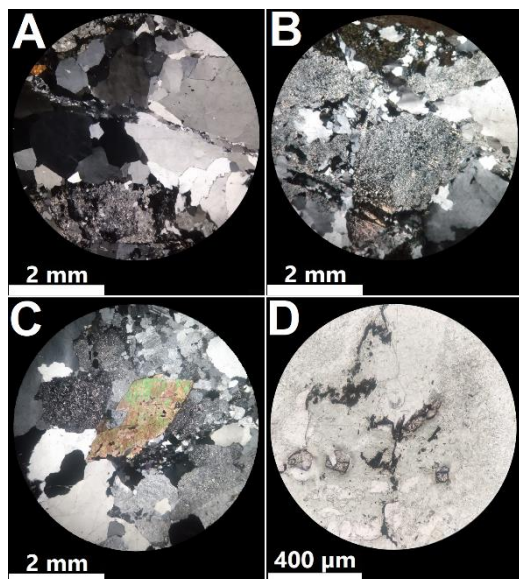


Figura 3. A) Fratura intergranular (centro) recortando vênula de quartzo e preenchida por subgrãos de quartzo estirados (*bulging*) sob nicóis cruzados. B) Estrutura núcleo-manto em feldspato sericitizado marcada por subgrãos de quartzo sob nicóis cruzados. C) Porfiroblasto de titanita incluído em quartzo e feldspato alterado sob nicóis cruzados. D) Cristais de zircão associado a *fronts* de clorita lamelar sob nicóis descruzados.

3.3. Depósito Jaguar Norte

No depósito Jaguar Norte, identificam-se dois litotipos: metagranodiorito hospedeiro e quartzo-clorita-biotita milonito (Tabela 1). O metagranodiorito é composto por plagioclásio (30%), quartzo (20%), feldspato alcalino (23%), biotita (10%), serítica (5%), epidoto (3%), clorita (4%), calcita (2%), apatita (<1%), zircão (<1%) e pirita (2%). Exibe textura blasto-porfirítica com zonas de alteração de Bt-Chl. O quartzo ocorre com formatos interlobados e contatos irregulares com extinção ondulante e estiramento. Juntamente com biotita, pode marcar estruturas do tipo núcleo-manto em plagioclásio ou feldspato alcalino com textura de subgrãos e cristais estirados (Fig. 4A). Os feldspatos comumente apresentam estruturas do tipo *pinning* com bordas ligadas a cristais lamelares de biotita (Fig. 4A). O plagioclásio pode exibir maclas polissintética afiladas ou apagadas (*flame-shaped*) associada a macla de deformação. Sombra de pressão de biotita ocorre associada a plagioclásio, embora pouco comum. Alterações sericítica e potássica são comuns. As fases minerais datáveis identificadas no metagranodiorito incluem apatita e zircão. Embora pouco comum, a apatita ocorre como inclusões em quartzo ou feldspato enquanto que, o zircão aparece como inclusão em cristais de biotita (Fig. 4B).

O Quartzo-clorita-biotita milonito é composto por biotita (35-50%), clorita (20-30%), quartzo (10-25%), calcita (20%), titanita (2%), apatita (<1%), calcopirita (4%) e pirita (2%). Apresenta textura lepidoblástica caracterizada por cristais lamelares estirados de biotita e clorita. O quartzo ocorre como agregados granulares com sombras de pressão de clorita e biotita seguindo orientação da foliação

da rocha (Fig. 4C). Os grãos apresentam formatos interlobados com contatos suturados evidenciando migração de borda de grão. Observa-se extinção ondulante no quartzo. Vênulas intergranulares preenchidas por quartzo são reconhecidas. São identificadas titanita e apatita. A titanita é orientada segundo um plano de deformação e apresenta estágio avançado de alteração para ilmenita (pseudomorfos; Fig. 4D). Comumente associada à clorita e biotita, podem apresentar microfraturas preenchidas por clorita e calcita. A apatita ocorre também associada a biotita e clorita que marcam a foliação subparalela da rocha.

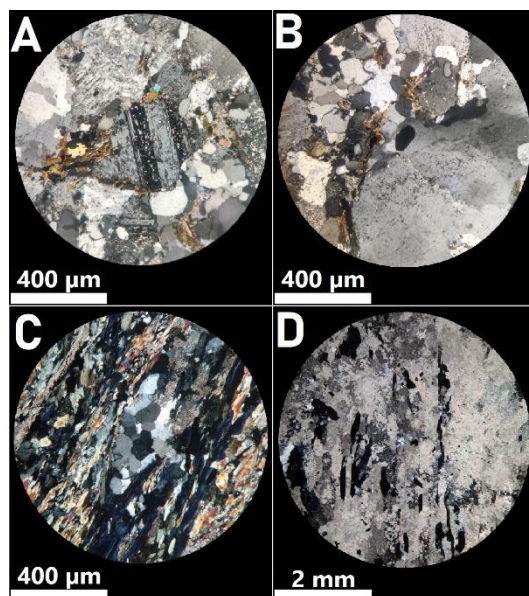


Figura 4. A) Estrutura do tipo núcleo-manto em plagioclásio (centro) com sombra de pressão de biotita. Estrutura do tipo *pinning* com bordas do plagioclásio ligadas a cristais lamelares de biotita também é observada. B) Cristal de apatita (centro) incluído em feldspato alterado. C) Agregado de quartzo (centro) com extinção ondulante e sombra de pressão de clorita e biotita. D) Pseudomorfos de titanita estirados (opacos) acompanhando deformação associada a vênula de clorita e quartzo.

4. DISCUSSÕES

Diferentes mecanismos de deformação dominam em diferentes condições de temperatura, pressão, taxa de deformação, tensão diferencial, tamanho de grão, conteúdo de fluido e composição de fluido (Blenkinsop, 2002). Contudo, mesmo que um domine, vários mecanismos de deformação podem operar simultaneamente. O reconhecimento das microestruturas contribui na determinação dos mecanismos de deformação auxiliando no estudo das condições que rochas se formaram (Blenkinsop, 2002).

Em conjunto, os depósitos Hades, Hades Nordeste e Jaguar Norte apresentam uma assembleia de microestruturas de deformação muito semelhante. Com exceção da ausência de rotação de subgrãos de quartzo nas amostras relacionadas ao Jaguar Norte, em todos os

depósitos observou-se as mesmas microestruturas que são utilizadas para a interpretação das condições de temperatura que os litotipos foram submetidos.

Considerando as descrições petrográficas de amostras relacionadas aos depósitos-alvo desta pesquisa, microfraturas intra- e intergranulares, extinção ondulante e textura de subgrãos no quartzo indicam deformação em temperaturas entre 250 °C e 300 °C (Blenkinsop, 2002; Passchier e Trouw, 2005). Estas duas últimas são formadas pelo mecanismo de deformação da plasticidade intracristalina. Lamelas de deformação e recristalização dinâmica do tipo *bulging* são registradas e predominam em condições de 300 °C a 400° (Stipp *et al.*, 2002). A recristalização da rotação do subgrão predomina entre 400°C e 500°C (Stipp *et al.*, 2002). Cristais de quartzo podem ser completamente substituídos por material recristalizado (Passchier e Trouw, 2005). Nessas condições, os porfiroclastos de plagioclásio ainda se deformam por microfraturamento, e podem apresentar macla de deformação, extinção ondulante e textura *flame-shaped* nos locais de alta tensão (Passchier e Trouw, 2005). Em condições de alta temperatura (500-700°C), a recristalização dinâmica é dominada pela migração de borda de grão com contato interlobado entre os cristais (Stipp *et al.*, 2002). No feldspato predomina-se a recristalização dinâmica do tipo *bulging*. Além disso, típicas estruturas do tipo núcleo-manto se desenvolvem (Passchier e Trouw, 2005). Essas características são observadas nas amostras descritas.

As microestruturas observadas nos depósitos Hades, Hades Nordeste e Jaguar Norte contribuíram para a interpretação de condições de temperatura de formação e recristalização dos litotipos identificados. Bem como, os mecanismos de geração. Nestes casos, a deformação é acomodada pelos cristais de quartzo e feldspatos. O comportamento de deformação do plagioclásio e do feldspato alcalino é bastante semelhante e, portanto, os feldspatos são tratados em conjunto (Passchier e Trouw, 2005). As microestruturas associadas a esses minerais contidas nas rochas dos depósitos-alvo desta pesquisa refletem um gradiente de temperatura variando de 250 °C a 700 °C (Blenkinsop, 2002; Passchier e Trouw, 2005; Vernon, 2018).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As descrições petrográficas permitiram a caracterização da assembleia mineral das amostras, além de suas associações paragenéticas e texturais e microestruturas de deformação. Ademais, permitiu-se a identificação e caracterização das fases minerais datáveis pelo método U-Pb (e.g. zircão, titanita, apatita, monazita, rutilo), considerando seu modo de ocorrência e relação com as microestruturas de deformação.

A temperatura é um fator importante, mas não único, que determina o comportamento da deformação do quartzo

e do feldspato; isso também depende fortemente da taxa de deformação, tensão diferencial e presença de água na rede e ao longo dos contornos de grão (Passchier e Trouw, 2005). Por exemplo, pequenas quantidades de água na estrutura cristalina aumentam a ductilidade do quartzo, embora o mecanismo exato não seja bem compreendido (Vernon, 2018). No plagioclásio, a transição entre regimes rúptil-dúctil ocorre a cerca de 450 °C, contudo, se a água estiver presente, um campo de transferência de solução induzida por tensão desloca a fluência da discordância entre 200 °C e 300 °C (Vernon, 2018). Esses fatores demonstram que é necessário maior detalhamento das amostras analisadas. Além da identificação das microestruturas, deve ser realizado para as condições de formação das rochas relacionadas aos depósitos-alvo desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Pró-Reitoria de Pesquisa da UNICAMP, pelo apoio financeiro a esta pesquisa através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC). À Prof^a. Dr^a. Carolina Penteadó Natividade Moreto e MSc. Laryssa de Sousa Carneiro pelo fornecimento das lâminas que serviram para o desenvolvimento do projeto. Além de todo o ensinamento, orientação e dedicação durante a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Blenkinsop T. 2002. Deformation Microstructures and Mechanisms in Minerals and Rocks. Kluwer Academic Publishers, 150p.
- Carneiro L.S. 2021. *Assinatura litogeoquímica dos sistemas cupríferos neoráqueanos e paleoproterozoicos da Província Carajás, Cráton Amazônico, Brasil*. MSc Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 160p.
- Grainger C.J., Groves D.I., Tallarico F.H.B., Fletcher I.R. 2008. Metallogenesis of the Carajás Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil: Varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base- and precious-metal mineralisation. *Ore Geology Reviews*, **33**:451-489.
- Passchier C.W., Trouw R.A.J. 2005. *Microtectonics*. Germany, Springer, 366p.
- Stipp M., Stünitz H., Heilbronner R., Schmid S.M. 2002. The eastern Tonalite fault zone: a “natural laboratory” for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700 °C. *J Struct Geol*, **24**:1861-1884.
- 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. Escala 1:1.000.000*. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Belém. 329 p.
- Vernon R.H. 2018. *A Practical Guide to Rock Microstructure*. Great Britain, Cambridge University Press, 431p.
- Xavier R.P., Moreto C.P.N., de Melo G.H., Toledo P., Hunger R., Delinardo da Silva M.A., Faustinoni J., Lopes A., Monteiro L.V.S., Previato M., Jesus S.S. 2017. Geology and metallogeny of Neoproterozoic and Paleoproterozoic copper systems of the Carajás Domain, Amazonian Craton, Brazil.