



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TRAÇANDO PROCESSOS HIDROTERMAIS E METAMÓRFICOS EM
GRANADA NOS DEPÓSITOS IOCG DA PORÇÃO NORTE DO DOMÍNIO
CARAJÁS, PROVÍNCIA CARAJÁS (CRÁTON AMAZÔNICO).

Christiane Soares de Oliveira

MONOGRAFIA nº 384

Ouro Preto, dezembro de 2020

**TRAÇANDO PROCESSOS HIDROTERMAIS E
METAMÓRFICOS EM GRANADA NOS DEPÓSITOS IOCG
DA PORÇÃO NORTE DO DOMÍNIO CARAJÁS, PROVÍNCIA
CARAJÁS (CRÁTON AMAZÔNICO).**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. MSc. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 384

TRAÇANDO PROCESSOS HIDROTERMAIS E METAMÓRFICOS EM GRANADA NOS DEPÓSITOS IOCG DA PORÇÃO NORTE DO DOMÍNIO CARAJÁS, PROVÍNCIA CARAJÁS (CRÁTON AMAZÔNICO).

Christiane Soares de Oliveira

Orientador

Prof. Dr. Gustavo Henrique Coelho de Melo

Co-Orientadora

Msc. Débora Vasconcelos de Oliveira

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2020/1.

OURO PRETO

2020

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Christiane Soares de Oliveira

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O48t Oliveira, Christiane Soares de.
Traçando processos hidrotermais e metamórficos em granada nos depósitos IOCG da Porção Norte do Domínio Carajás, Província Carajás (Cráton Amazônico). [manuscrito] / Christiane Soares de Oliveira. - 2020. 54 f.: il.: color., tab.. (Série: 384)

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique Coelho de Melo.
Coorientadora: Ma. Débora Vasconcelos de Oliveira.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Metalogenia. 2. Granada. 3. Depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro. I. Melo, Gustavo Henrique Coelho de. II. Oliveira, Débora Vasconcelos de. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 553.3/4

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526

<http://www.sisbin.ufop.br>

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: TRAÇANDO PROCESSOS HIDROTERMAIS E METAMÓRFICOS EM GRANADA NOS DEPÓSITOS IOCG DA PORÇÃO NORTE DO DOMÍNIO CARAJÁS, PROVÍNCIA CARAJÁS (CRÁTON AMAZÔNICO)

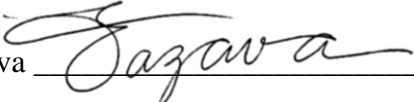
AUTORA: Christiane Soares de Oliveira

ORIENTADOR: Gustavo Henrique Coelho de Melo

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Gustavo Henrique Coelho de Melo  DEGEO/UFOP

Prof. M.Sc. Edison Tazava  DEGEO/UFOP

M.Sc Poliana Iara de Freitas Toledo  IGe/Unicamp

Ouro Preto, ___18___/___12___/___2020___

Agradecimentos

Em primeiro lugar eu agradeço a Deus por ter colocado esta experiência em meu plano de vida e tudo que isso representa para mim e para minha família. Agradeço às minhas mães Maria e Débora que deram suporte para que eu entrasse e permanecesse na UFOP, sempre me incentivando e me dando muito amor. A toda minha família, em especial Adair, Brenda, Bruna, Camila, Jasmim, Michael, Paula, Rodinei e Toninho pelo apoio e por sempre me acolherem.

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. Gustavo Melo, pelos conselhos, ensinamentos, pela paciência e por perdoar meus atrasos em meio a esta pandemia. E à minha co-orientadora, M.Sc. Débora Vasconcelos, por todo auxílio.

A todas as pessoas especiais que conheci durante este tempo de graduação, à geogalera, aos amigos de rock, os de estudos e os de vida, em especial, Deborah, Gabi, Prymatha, Ana, Anitta, Paulinha, Mãe-vê, Nabad, Max, Rodrigo, Dudu e aos amigos da geo 13.2.

Aos professores e funcionários do DEGEO por não medirem esforços para auxiliar os alunos durante toda a graduação, em especial aos professores Edison Tazava e Cláudio Lana que são meus conselheiros desde o início do curso. Ao DEGEO e à Escola de Minas pelo ensino público, gratuito e de qualidade. À Gorceix e à PRACE pelos auxílios que tornaram este sonho possível e às entidades GeoJr e SEG.

Agradeço também a comunidade ouro-pretana por ter me acolhido em sua encantadora cidade durante estes anos de graduação. Às repúblicas amigas que sempre me acolheram tão bem.

Às empresas CSN Mineração, Pimenta de Ávila e Vale pelas oportunidades de aprendizado e crescimento pessoal e profissional.

Ao Laboratório de Microscopia e Microanálises da Universidade Federal de Ouro Preto (LMic), integrante da rede de Microscopia e Microanálises de Minas Gerais – RMic/Brasil/FAPEMIG.

Por último, agradeço a Vale e ao Programa de Iniciação à Pesquisa (PIP) da UFOP por todo apoio para a realização deste estudo.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	viii
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	xix
ABSTRACT	xvii
INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 JUSTIFICATIVA	4
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS	4
1.5.1 Revisão bibliográfica	5
1.5.2 Estudos petrográficos.....	5
1.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura	5
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	7
2.1 ESTRATIGRAFIA.....	7
2.2 ARCABOUÇO METAMÓRFICO-ESTRUTURAL	9
3 PRINCIPAIS DEPÓSITOS IOCG DO DOMÍNIO CARAJÁS	13
3.1 DEPÓSITOS IOCG NO DOMÍNIO CARAJÁS	13
4 REVISÃO DOS DEPÓSITOS SALOBO E GROTA FUNDA	17
4.1 DEPÓSITO SALOBO.....	17
4.2 DEPÓSITO GROTA FUNDA	19
5 GRANADA: UMA FERRAMENTA IMPORTANTE COMO TRAÇADOR DE PROCESSOS GEOLÓGICOS	21
6 RESULTADOS	23
6.1 DEPÓSITO SALOBO.....	23
6.1.2 Inclusões minerais na granada.....	28
6.1.3 Variação composicional da granada por MEV e EDS	29
6.2 DEPÓSITO GROTA FUNDA	33
6.2.2 Variação composicional da granada por microscopia eletrônica de varredura	36
7 DISCUSSÕES	41
7.1 COMPARAÇÃO DA GEOLOGIA DOS DEPÓSITOS	41
7.2 CARACTERÍSTICAS DOS CRISTAIS DE GRANADA NOS DEPÓSITOS SALOBO E GROTA FUNDA E IMPLICAÇÕES PARA A REGIÃO	42

7.3 GRANADA NOS DEPÓSITO SALOBO E GROTA FUNDA: PROCESSOS HIDROTERMAIS OU METAMÓRFICOS?	44
8 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
10 APÊNDICE	
APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA GRANADA DO DEPÓSITO SALOBO	
APÊNDICE B – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA GRANADA DO DEPÓSITO GROTA FUNDA	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - As Províncias do Cráton Amazonas (Modificado de Santos 2003).....	1
Figura 2.1 - Mapa geológico do Domínio Carajás mostrando a localização dos depósitos (modificado de Vasquez <i>et al.</i> 2008).....	9
Figura 4.1 - Mapa geológico e perfil do depósito Salobo mostrando as rochas menos alteradas e hidrotermalmente alteradas do depósito localizado na zona de cisalhamento do Cinzento (Modificado de Vale (2003)).	18
Figura 4.2 - Mapa geológico simplificado e seção transversal do depósito Grota Funda, mostrando os principais litotipos que ocorrem no depósito e as zonas mineralizadas (Modificado de Hunger <i>et al.</i> 2019).	20
Figura 6.1 - Rochas hidrotermais, ricas em granada-grunerita-biotita do depósito Salobo; (A) Na porção central da amostra tem-se cristais subidioblásticos de granada e presença de sulfetos; B) Cristais de granada sobre rochas ricas em biotita e grunerita. C) Porfiroblastos de granada alternados com faixas quartzosas milonitizadas com faixas ricas em grunerita. D) Cristais de granada subidioblásticos em matriz rica em biotita e magnetita. Abreviações: Sulf = sulfeto, Grt = granada, Bt = biotita, Gru = grunerita, Qz = quartzo e Mt = magnetita.	23
Figura 6.2 - Aspectos microscópicos das rochas do depósito Salobo; (A) Mineralogia principal da rocha exibindo porfiroblasto de granada, biotita, grunerita e quartzo. (B) Cristais de magnetita, alanita e turmalina, que ocorrem como minerais acessórios nas rochas do depósito, em matriz de biotita. (C) Foliação marcada por quartzo e grunerita contornando cristal de granada e exibindo uma leve sombra de pressão no mesmo (D) Lâmina exibindo foliação decussada. (E) Rocha alterada hidrotermalmente exibindo biotita, clorita e cristal de granada. Abreviações: Grt = granada, Bt = biotita, Gru = grunerita, Qz = quartzo, Mt = magnetita, Ala = allanita e Tur = turmalina.	25
Figura 6.3 - Aspectos microscópicos dos cristais de Granada do tipo (i) do Depósito Salobo; (A) Cristal de granada tipo (i) envolto por matriz decussada. (B) Cristal de granada do tipo (i) envolto por biotita que também ocorre preenchendo as fraturas do mesmo. Abreviações: Grt = granada, Bt = biotita e Gru = grunerita.	26

Figura 6.4 – Aspectos microscópicos dos cristais de granada tipo (ii); (A) Cristal de granada estirado e exibindo sombra de pressão. (B) Cristal de granada estirado em matriz exibindo foliação milonítica. Abreviações: Grt = granada, Bt = biotita e Qz = quartzo. 27

Figura 6.5 - Aspectos microscópicos da granada do tipo (iii) do Depósito Salobo; (A) Cristal de granada do tipo (iii) exibindo fraturamento intenso e preenchido por clorita. (B) Cristal de granada do tipo (iii) extremamente fraturado exibindo inclusão de magnetita e matriz com grunerita e biotita cloritizada. (C) Cristal de granada do tipo (iii) fraturado e envolto por matriz de biotita cloritizada. Abreviações: Grt = granada, Bt = biotita, Gru = grunerita, Mt = magnetita e Chl = clorita. 28

Figura 6.6 - Prancha com as inclusões minerais da granada identificadas no MEV e EDS; A) cristal de magnetita. B) Cristal de ilmenita. C) Cristal de monazita. D) Cristal de alanita. E) Cristal de bornita. F) Cristal de quartzo e G) cristal de grunerita. Abreviações: Mt = magnetita, Ilm = ilmenita, Mon = monazita, Ala = alanita, Bor = bornita, Qz = quartzo e Gru = grunerita..... 29

Figura 6.7 - Análises EDS acoplado a MEV da granada tipo (i); A) Imagem de elétrons retroespalhados dos cristal de granada (i) com os spots do EDS; B) Perfis elementares dos spots de EDS cortando o cristal de granada (i) de uma borda até a outra;..... 30

Figura 6.8 - Mapas composicionais da granada tipo (i); A) mapa composicional realçando o elemento Si; B) mapa composicional realçando o elemento Fe; C) mapa composicional realçando o elemento Al; D) mapa composicional realçando o elemento Ca; E) mapa composicional realçando o elemento Ti; F) mapa composicional realçando o elemento Mn. 30

Figura 6.9 - Análises EDS acoplado a MEV da granada tipo (ii) : A) Imagem de elétrons retroespalhados dos cristal de granada (ii) com os spots do EDS. A borda do cristal de granada foi demarcada esquematicamente. B) Perfis elementares dos spots de EDS cortando o cristal de granada (ii) até o centro. 31

Figura 6.10- Perfis composicionais de granada do tipo (iii) obtidos através de MEV-EDS; A) Imagem de elétrons retroespalhados com spots. B) Perfil com os óxidos analisados. 32

Figura 6.11 - Mapas composicionais obtidos com uso de MEV de granada do tipo (iii) no depósito Salobo. A) Mapa composicional realçando o elemento Si; B) Mapa

composicional realçando o elemento Fe; C) Mapa composicional realçando o elemento Al; D) Mapa composicional realçando o elemento Mg; E) Mapa composicional realçando o elemento K; F) Mapa composicional realçando o elemento Ca.....33

Figura 6.12 - Diagrama triangular AFM, segundo Irvine & Baragar (1971), das granadas (i), (ii) e (iii) respectivamente em A), B), C).33

Figura 6.13 – Aspectos macroscópicos das rochas hidrotermalizadas portadoras de granada no depósito Grota Funda; A) Zonas de alteração férrica-potássica com matriz dada por grunerita e biotita com porfiroblastos de granada. B) Zona intensamente cloritizada com cristais reliquias de granada. Abreviações: Grt = granada, Gru = grunerita, Bt = biotita e Cpy = calcopirita.34

Figura 6.14 - Aspectos gerais da lâmina do depósito Grota Funda. (A) Cristal de granada em matriz decussada rica em grunerita e biotita. (B) Cristais de granada constituindo a maior parte da imagem e matriz decussada. (C) Cristal de granada com borda marcada por curva pontilhada, parte está em matriz rica em grunerita e biotita e parte em matriz de calcopirita. Abreviações: Grt = granada, Bt = biotita e Gru = grunerita.35

Figura 6.15 - Aspectos da granada inclusa em calcopirita; (A) Cristal arredondado de granada imerso em matriz de calcopirita e magnetita. (B) Borda de biotita na granada inclusa em calcopirita. Abreviações: Grt = granada, Mt = magnetita, Cpy = calcopirita e Bt = biotita.36

Figura 6.16 - Análises de MEV-EDS da granada do depósito Grota Funda, cristal envolto por calcopirita; A) Imagem de electrões retroespalhados dos cristal de granada com os spots do EDS; B) Perfis elementares dos spots de EDS cortando o cristal de granada de uma borda a outra.37

Figura 6.17 – Mapas composicionais de cristal de granada do depósito Grota Funda envolto por calcopirita: A) mapa composicional realçando o elemento S; B) mapa composicional realçando o elemento Fe; C) mapa composicional realçando os elementos Si; D) mapa composicional realçando o elemento Al; E) mapa composicional realçando o elemento Cu; F) mapa composicional realçando o elemento Ca; G) mapa composicional realçando o elemento K e H) mapa composicional realçando o elemento Mn e I) mapa composicional realçando o elemento Ti.38

Figura 6.18 – Análises EDS acoplado a MEV da granada imersa em matriz rica em grunerita; A) Imagem de elétrons retroespalhados dos cristal de granada com os spots do EDS; B) Perfis elementares dos spots de EDS cortando o cristal de granada de uma borda a outra; 39

Figura 6.19 - A) mapa composicional realçando o elemento Si; B) mapa composicional realçando o elemento Ca; C) mapa composicional realçando o elemento Al; D) mapa composicional realçando o elemento Mg; E) mapa composicional realçando o elemento K; F) mapa composicional realçando o elemento Mn;..... 40

Figura 6.20 - Diagrama triangular AFM segundo Irvine & Baragar (1971) com dados da granada do depósito Grota Funda..... 40

Figura 7.1 – Diagramas ternários composicionais de granada; A) Representação da granada do depósito Salobo. B) Representação da granada do depósito Grota Funda. Siglas: Alm = almandina, Sps = espessartita e Pyp = piropo. 44

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Os dois grupos de granada segundo Winchell (1933).	21
---	----

Resumo

A Província Carajás, localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico, é notável por concentrar a maior parte dos depósitos de óxido de ferro-cobre-ouro (IOCG) do Brasil. A norte desta província ocorre uma faixa de intensa deformação, a Zona de Cisalhamento do Cinzento, que hospeda diversos depósitos tipo IOCG, incluindo os depósitos Salobo e Grota Funda. O depósito Salobo é hospedado por granitoides e gnaisses meso e neoarqueanos. Este depósito apresenta elevada quantidade de granada associada a um intenso processo de metassomatismo férrico que antecede a precipitação das mineralizações de Cu e Au. Em contrapartida, o depósito Grota Funda é hospedado por sequências de rochas extremamente preservadas de metamorfismo, que incluem basaltos, gabros e *BIFs*. Nesse depósito, a presença da granada ocorre principalmente em direção à zona central, aonde metassomatismo férrico é mais intenso. A presença de granada nesses depósitos vem sendo motivo de diversos debates em relação à sua formação, uma vez que processos hidrotermais associados a um metamorfismo regional podem ter possibilitado a formação desta paragênese de alta temperatura. Foi realizada caracterização textural e composicional da granada dos depósitos, através de estudos petrográficos e da análise por MEV-EDS. Esses estudos permitiram a identificação de três tipos texturais de granada no depósito Salobo, a granada do tipo (i) ocorre de forma idioblástica sem relação com a foliação, enquanto a do tipo (ii) ocorre estirada, com presença de sombra de pressão e contornada pela foliação da rocha e a granada do tipo (iii) encontrada de forma fraturada e, por vezes, alterada por clorita e biotita. As análises composicionais por MEV-EDS dos três tipos de granada do Salobo não mostraram variação composicional entre núcleo e borda. Já no depósito Grota Funda a granada foi considerada como pertencente a um único tipo textural, que ocorre idioblástica, exibindo leve fraturamento e sem zoneamento composicional. A granada de ambos os depósitos apresenta elevado teor de almandina. A (a) homogeneidade dos cristais de granada, (b) ausência de zoneamento entre núcleo e borda e a (c) ausência de variações composicionais significativas, podem mostrar que a formação desta granada foi por hidrotermalismo de alta temperatura e não por metamorfismo regional. No entanto, a transição do Domínio Carajás com o Domínio Bacajá ainda não é totalmente compreendida, havendo ainda muito debate sobre um possível evento metamórfico regional resultante da colisão destes Domínios, o que não permite descartar completamente a hipótese da existência de metamorfismo regional neoarqueano.

Palavras chave: granada, Província Carajás, Salobo, Grota Funda, Cráton Amazônico.

Abstract

The Carajás Province, located in the southeast of the Amazon Craton, is recognized for hosting important iron-oxide copper–gold deposits (IOCG) in Brazil. To the north of this province occurs one belt of intense deformation, the Cinzento Shear Zone, which hosts several IOCG type deposits, including Salobo and Grota Funda deposits. The Salobo deposit is hosted by Meso and Neoproterozoic granitoids and gneisses. This deposit presents high amounts of garnet associated with an intense process of ferric metasomatism that precedes the precipitation of Cu and Au mineralization. In contrast, the Grota Funda deposit is hosted by sequences of extremely preserved rocks from metamorphism, which include basalt, gabbros and BIF. In this deposit, the presence of the garnet occurs mainly towards the central zone, where ferric metasomatism is more intense. The presence of garnet in these deposits has been the subject of several debates regarding its formation, since hydrothermal processes associated with regional metamorphism may have enabled the formation of this high temperature paragenesis. Textural and compositional characterization of the garnet of these deposits was carried out through petrographic studies and analysis by MEV-EDS. These studies allowed the identification of three textural types of garnet in the Salobo deposit, the type (i) garnet occurs in an idioblastic form not related with the foliation, while the type (ii) garnet occurs stretched, with the presence of pressure shadow and bypassed by foliation of the rock and the type (iii) garnet that occurs in an altered and fractured form. The compositional analyzes by MEV-EDS of the three types of Salobo garnet did not show compositional variation between core and rim. On the contrary, in the Grota Funda deposit, the garnet was considered to be formed during one single textural type, which occurs idioblastic, exhibiting slight fracturing and without compositional zoning. The garnet in both deposits has a high almandine content. The (a) homogeneity of the garnet crystals, (b) the absence of zoning between the core and the rim and (c) the absence of significant compositional variations, may show that the formation of this garnet was due to hydrothermal alteration fluids and not regional metamorphism. However, the transition from the Carajás Domain to the Bacajá Domain is not yet fully understood, which does not allow to completely discard the hypothesis of the existence of Neoproterozoic metamorphism.

Key words: Garnet, Carajás Province, Salobo, Grota Funda, Amazonian Craton.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A Província Carajás, localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico (Fig. 1.1), representa uma das mais importantes províncias minerais do planeta e é dividida em Domínio Carajás (norte) e Domínio Rio Marial (sul); (Vasquez *et al.* 2008). A extremo norte desta província ocorre uma faixa de intensa deformação de direção WNW-ESSE, conhecida como Zona de Cisalhamento Cinzento (Vasquez *et al.* 2008). Ao longo, e nas proximidades, desta zona de cisalhamento ocorrem diversos depósitos minerais de Cu-Au do tipo IOCG (ou *iron oxide-copper-gold*), incluindo os depósitos Salobo, Grota Funda, Furnas, GT-46 e os alvos QT-02 e AN-34.



Figura 1.1 - As Províncias do Cráton Amazonas (Modificado de Santos 2003).

A evolução tectônica da porção norte do Domínio Carajás e a relação com processos metamórficos e metassomáticos ainda é controversa. A granada pode representar um mineral chave para a compreensão da evolução dessa região já que é uma das fases minerais mais abundantes nos depósitos IOCG do domínio Carajás. Foi descrito concentrações expressivas desse mineral nos depósitos Salobo e Grota Funda (Melo *et al.* 2016; Hunger *et al.* 2019) associado a um intenso processo de metassomatismo rico em ferro, que precede a precipitação do minério de cobre e ouro. Por outro lado, no depósito GT-46 localizado no extremo noroeste da Zona de Cisalhamento Cinzento,

foram reconhecidos cristais de granada interpretados como de origem metamórfica (i.e. Toledo *et al.* 2019). A presença de rochas com paragênese mineral interpretadas como de origem metamórfica traz a questão se rochas metamórficas similares poderiam estar presentes nos outros depósitos ao longo da Zona de Cisalhamento Cinzento.

Neste âmbito, os depósitos Salobo e Grota Funda apresentam contexto geológico com rochas hospedeiras muito distintas. O depósito Salobo representa o maior e mais importante depósito IOCG da Província Carajás e é hospedado por rochas gnáissicas e graníticas fortemente alteradas por processos hidrotermais relacionados à Zona de Cisalhamento Cinzento (Melo *et al.* 2016). Extensas zonas de alteração Fe-K (granada-grunerita-biotita-magnetita) envelopam as zonas mineralizadas (Melo *et al.* 2016). No depósito Grota Funda, situado ao longo de uma zona de cisalhamento regional de direção WNW-ESSE, denominada Sistema Transcorrente Pojuca, as mineralizações ocorrem principalmente em basaltos, gabros e formações ferríferas bandadas (Hunger *et al.* 2019). Neste depósito, por outro lado, a presença da granada ocorre principalmente em direção à zona central, aonde metassomatismo férrico é mais intenso.

A presença de cristais de granada em todos esses depósitos da porção norte do Domínio Carajás pode ser resultado de processos similares entre eles. A presença de granada nesses depósitos vem sendo motivo de diversos debates em relação à sua formação, uma vez que processos hidrotermais associados à um metamorfismo regional podem ter possibilitado a formação dessas paragêneses de alta temperatura. A granada pode funcionar como um importante traçador tanto de processos hidrotermais como metamórficos a partir da variação de sua composição (Jamtveit 1993; Crowe *et al.* 2001; Martins *et al.* 2011) podendo indicar condições de pressão, temperatura, tempo de formação e composição química do meio em que foi formada (ou P-T-t-X).

Desta forma, o intuito deste trabalho de conclusão de curso é a caracterização textural e composicional da granada dos depósitos Salobo e Grota Funda, através de estudos petrográficos e da análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*). Essas análises poderão fornecer informações sobre o ambiente de formação de granada e um maior entendimento sobre o processo de evolução hidrotermal e/ou metamórfico da porção norte do Domínio Carajás.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo localiza-se na região sudeste do estado do Pará, envolvendo os municípios de Marabá e Parauapebas (Fig. 1.2). O acesso se dá de forma aérea, com voo direto partindo das principais capitais até Belém, a capital do estado do Pará. A área fica a aproximadamente 270km do município Marabá e cerca de 100km do município de Parauapebas.

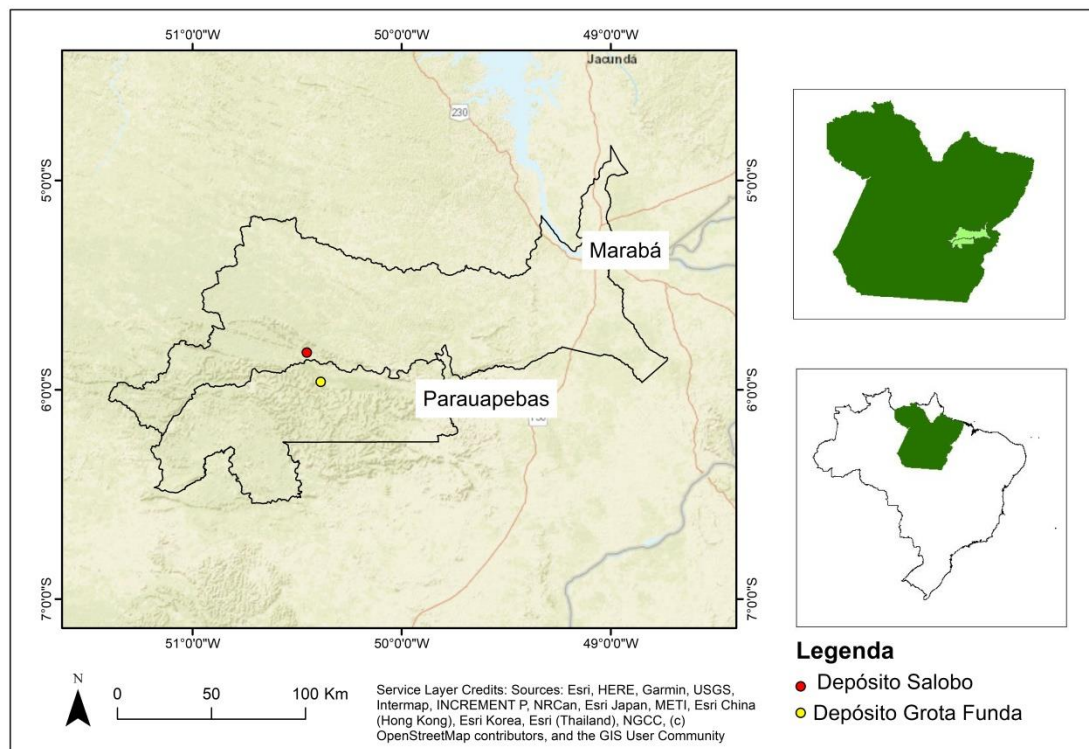


Figura 1.2 - Mapa simplificado com a localização dos dois depósitos de estudo.

1.3 OBJETIVOS

Esse projeto tem como objetivo principal a compreensão dos processos formadores de granada (ex. hidrotermais e/ou metamórficos) nos depósitos Salobo e Grota Funda. Para isso são propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterização textural e microestrutural da granada, incluindo a caracterização mineralógica da rocha;
- b) Identificação de distintas gerações de granada e associação com possíveis foliações ou crescimento de outros minerais;
- c) Reconhecimento de possíveis inclusões minerais na granada;

d) Identificação e caracterização de variações composicionais nos cristais de granada como comparação dos resultados obtidos nos diferentes depósitos.

1.4 JUSTIFICATIVA

A porção norte do Domínio Carajás apresenta uma complexa evolução tectono-magmática que gerou diversas mineralizações do tipo IOCG, ao longo da Zona de Cisalhamento do Cinzento, de idade ca. 2.55 Ga (Réquia *et al.* 2003, Hunger *et al.* 2019, Toledo *et al.* 2019). Nessa região há um constante debate entre processos hidrotermais versus processos metamórficos para a gênese dos depósitos IOCG. A granada compreende uma importante fase mineral nos depósitos IOCG da região, representada, na maioria das ocorrências, pela sua variação rica em ferro, a almandina.

Nos depósitos Salobo e Grota Funda, os cristais de granada têm sido considerados como de origem hidrotermal a partir de um metassomatismo férrico (Melo *et al.* 2016; Hunger *et al.* 2019) que precedem a precipitação dos sulfetos de cobre. Por outro lado, estudos em outros depósitos ao longo da Zona de Cisalhamento do Cinzento reconheceram gerações de granada associadas a paragêneses metamórficas (por exemplo: GT-46 e Furnas; Toledo *et al.* 2019; Jesus 2016). Rochas metamórficas nessa região incluem principalmente os gnaisses e migmatitos mesoarqueanos do Complexo Xingu (Machado *et al.* 1991). Por outro lado, as sequências (meta)vulcanosedimentares dessa região quase sempre estão muito hidrotermalizadas, o que dificulta o reconhecimento das paragêneses metamórficas prévias. É necessário analisar a origem deste mineral em diferentes depósitos da porção norte do Domínio Carajás pois a associação com paragêneses metamórficas pode não ser exclusiva do depósito GT-46, ocorrendo em outros depósitos ao longo da zona de cisalhamento Cinzento.

As variações composicionais nos cristais de granada ocorrem de acordo com mudanças em seu ambiente de formação, podendo atuar como importantes registros de mudanças no sistema em que se formaram (Crowe *et al.* 2001; Martins *et al.* 2011). Neste sentido, é necessário compreender se gerações ou núcleos metamórficos de granadas estão presentes nesses depósitos a fim de obter novas perspectivas para a evolução hidrotermal e/ou metamórfica da porção norte do Domínio Carajás. Assim, os depósitos Salobo e Grota Funda, por apresentarem um contexto de rochas hospedeiras bem diferentes, compreendem estudos de caso interessantes no ponto de vista da formação de granada.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso e a concretização dos objetivos propostos, serão abordados os métodos abaixo detalhados.

1.5.1 Revisão bibliográfica

Durante todo desenvolvimento do projeto foi realizada revisão bibliográfica, constituindo uma etapa fundamental da metodologia. Trabalhos relativos aos principais depósitos IOCG de Carajás em conjunto com uma revisão da evolução geológica da província serão parte desta revisão. Ênfase também foi dada à utilização da granada como um traçador da evolução de sistemas hidrotermais e/ou processos metamórficos.

1.5.2 Estudos petrográficos

Estudos petrográficos foram conduzidos de forma criteriosa em seções delgada-polidas de amostras de testemunhos de sondagem previamente coletadas pelo orientador do trabalho. Essa etapa visou: (i) a identificação de distintas gerações de granada e (ii) de diferentes texturas, (iii) a relação com o desenvolvimento de microestruturas, e (iv) o reconhecimento de possíveis inclusões minerais. Essa etapa foi realizada nos laboratórios de microscopia do Departamento de Geologia (DEGEO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

1.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Amostras selecionadas pelo estudo petrográfico foram analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca JEOL modelo JSM-6510 pertencente ao Laboratório de Microscopia e Microanálises da UFOP. Com as imagens de elétrons retroespalhados obtidas foi possível reconhecer de forma mais evidente as texturas da rocha e as inclusões na granada. Nesse MEV tem-se acoplado um espectrômetro de energia dispersiva de raios-x (EDS) da marca Oxford que possibilita a análise química semi-quantitativa de amostras sólidas. Com isso foram realizados perfis e mapas composicionais nas granadas com o intuito de verificar a existência de variação composicional entre núcleo e borda. Além disso também foram realizadas análises pontuais nas inclusões das granadas para identificação destas fases minerais.

2.1 ESTRATIGRAFIA

A Província Carajás, localizada na borda sudeste do Cráton Amazônico, representa sua porção crustal mais antiga e mais bem preservada (Vasquez *et al.* 2008). Esta província, segundo Vasquez *et al.* (2008), é limitada ao norte e ao sul pela Província Transamazonas (2,26 – 1,90 Ga), respectivamente pelos domínios Bacajá e Santana do Araguaia, a leste pela Província Tocantins e pelo Cinturão Araguaia e a oeste pela Província Amazônia Central. Esta província é dividida em dois domínios tectônicos, limitados por uma descontinuidade regional de direção aproximada E-W, definida com base em anomalias magnetométricas e estruturas regionais: o Domínio Rio Maria, a sul, e o Domínio Carajás, a norte (Santos 2003; Vasquez *et al.* 2008).

O Domínio Rio Maria é caracterizado por uma crosta juvenil, de idade mesoarqueana, com sequências de *greenstone belts* e granitóides tipo TTG (thronjemitito-tonalito-granodiorítico) (Vasquez *et al.* 2008). O metamorfismo presente nas rochas vulcano-sedimentares deste domínio foi classificado por Souza *et al.* (1990) como sendo de fácies xisto verde a anfíbolito inferior.

O Domínio Carajás (Figura 1.1) inclui a Bacia Carajás e, em sua parte sul, uma faixa denominada de Subdomínio de Transição onde o embasamento mesoarqueano é predominante. (Dall’Agnol *et al.* 2006; Feio 2011). Neste domínio, o embasamento é composto por gnaisses tonalíticos a trondhjemiticos e migmatitos do Complexo Xingu ($3,006 \pm 6,6$ Ma; Delinardo da Silva 2014) e por ortogranulitos máficos do Complexo Pium ($3,002 \pm 14$ Ma, U-Pb; SHRIMP zircão; Pidgeon *et al.* 2000). O evento de migmatização dos gnaisses do Complexo Xingu ($2,859 \pm 2$ Ma e 2860 ± 2 Ma; U-Pb em zircão; Machado *et al.* 1991) é contemporâneo a granulização dos protólitos máficos do Complexo Pium ($2,859 \pm 9$ Ma; U-Pb SHRIMP zircão; Pidgeon *et al.* 2000). Ricci & Carvalho (2006) e Vasquez *et al.* (2008) separaram e denominaram os ortogranulitos, enderbitos e charnokitos, que eram pertencentes ao Complexo Pium, como Ortogranulitos Chicrim-Cateté. O embasamento compreende ainda granitoides mesoarqueanos indeformados com idades que variam de ca. 3,0 Ga a 2,86 Ga (ex. Tonalito Bacaba e Granito Serra Dourada; Moreto *et al.* 2011; Feio *et al.* 2013).

As sequências metavulcano-sedimentares do Domínio Carajás incluem principalmente o Grupo Rio Novo (Hirata *et al.* 1982) e o Supergrupo Itacaiúnas (Wirth *et al.* 1986; DOCEGEO 1988; Machado *et al.* 1991), além das rochas metassedimentares da Formação Águas Claras (Araújo *et al.* 1988; Nogueira *et al.* 1995).

As rochas do Grupo Rio Novo incluem, metamáficas, metaultramáficas, formações ferríferas bandadas e metacherts (Hirata *et al.* 1982).

O Supergrupo Itacaiúnas hospeda diversos depósitos do tipo IOCG (e.g. Salobo, Sossego e Igarapé Bahia; Xavier *et al.* 2012). Este supergrupo foi dividido em quatro grupos: Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Grão Pará e Igarapé Bahia (DOCEGEO 1988). O Grupo Igarapé Salobo compreende gnaisses, anfibolitos, meta-arcóseas e formações ferríferas que hospedam as mineralizações de cobre-ouro do Depósito Salobo (DOCEGEO 1988). No entanto, Melo *et al.* (2016) reinterpretação os anfibolitos, meta-arcóseos e formações ferríferas bandadas deste grupo como produtos de um intenso hidrotermalismo regional nas rochas do embasamento e granitoides da suíte da Igarapé Gelado, que gerou rochas ricas em grunerita, almandina, turmalina, magnetita, magnetita e biotita. O Grupo Igarapé Pojuca apresenta rochas metavulcânicas básicas a intermediárias, xistos, anfibolitos e formações ferríferas bandadas, com graus metamórficos variando de xisto verde a anfibolito (DOCEGEO 1988). O Grupo Grão Pará compreende derrames basálticos intercalados a jaspilitos, riolitos, rochas vulcanoclásticas e diques de gabros subordinados (Zucchetti 2007). O Grupo Igarapé Bahia inclui rochas sedimentares, metapiroclásticas, metavulcânicas e formações ferríferas (DOCEGEO 1988).

A Formação Águas Claras apresenta uma cobertura siliciclástica arqueana e não metamorfizada (Vasquez *et al.* 2008). Segundo Nogueira *et al.* (1995) esta formação recobre discordantemente o Supergrupo Itacaiúnas e é composta por metaconglomerados, meta-arenitos, mármore dolomítico, filito carbonoso e sericita quartzito, cujos protólitos foram depositados em ambiente fluvial e litorâneo.

As rochas mesoarqueanas do embasamento cristalino e a sequência supracrustal do Supergrupo Itacaiúnas foram afetadas por eventos intrusivos neoarqueanos, representados por suítes máficas-ultramáficas acamadadas do Complexo Luanga (ca. 2,76 Ga; Machado *et al.* 1988) e pela Suíte Intrusiva Cateté (Macambira & Vale 1997).

Evento de magmatismo granítico também são reconhecidos no Domínio Carajás. Esses eventos têm sido agrupados em três principais episódios de magmatismo granítico: (i) 2,76 – 2,73, com granitos foliados e sintectônicos (e.g. Plaqué, Planalto, Estrela, Serra do Rabo, Igarapé-Gelado e Suíte Pedra Branca; Avelar *et al.* 1999; Huhn *et al.* 1999; Barros *et al.* 2004, 2009; Sardinha *et al.* 2006; Feio *et al.* 2012, 2013). ii) magmatismo granítico de caráter peralcalino a meta-aluminoso, de ca. 2,57 Ga, representados pelo Old Salobo e Itacaiúnas (Machado *et al.* 1991; Souza *et al.* 1996), restritos a porção norte do Domínio Carajás. iii) magmatismo granítico anorogênico alcalinos a sub-alcalinos de idade paleoproterozoica, 1.88 Ga, que inclui os granitos Central de Carajás, Young Salobo, Cigano, Pojuca, Breves e Rio Branco (Machado *et al.* 1991; Tallarico *et al.* 2004).

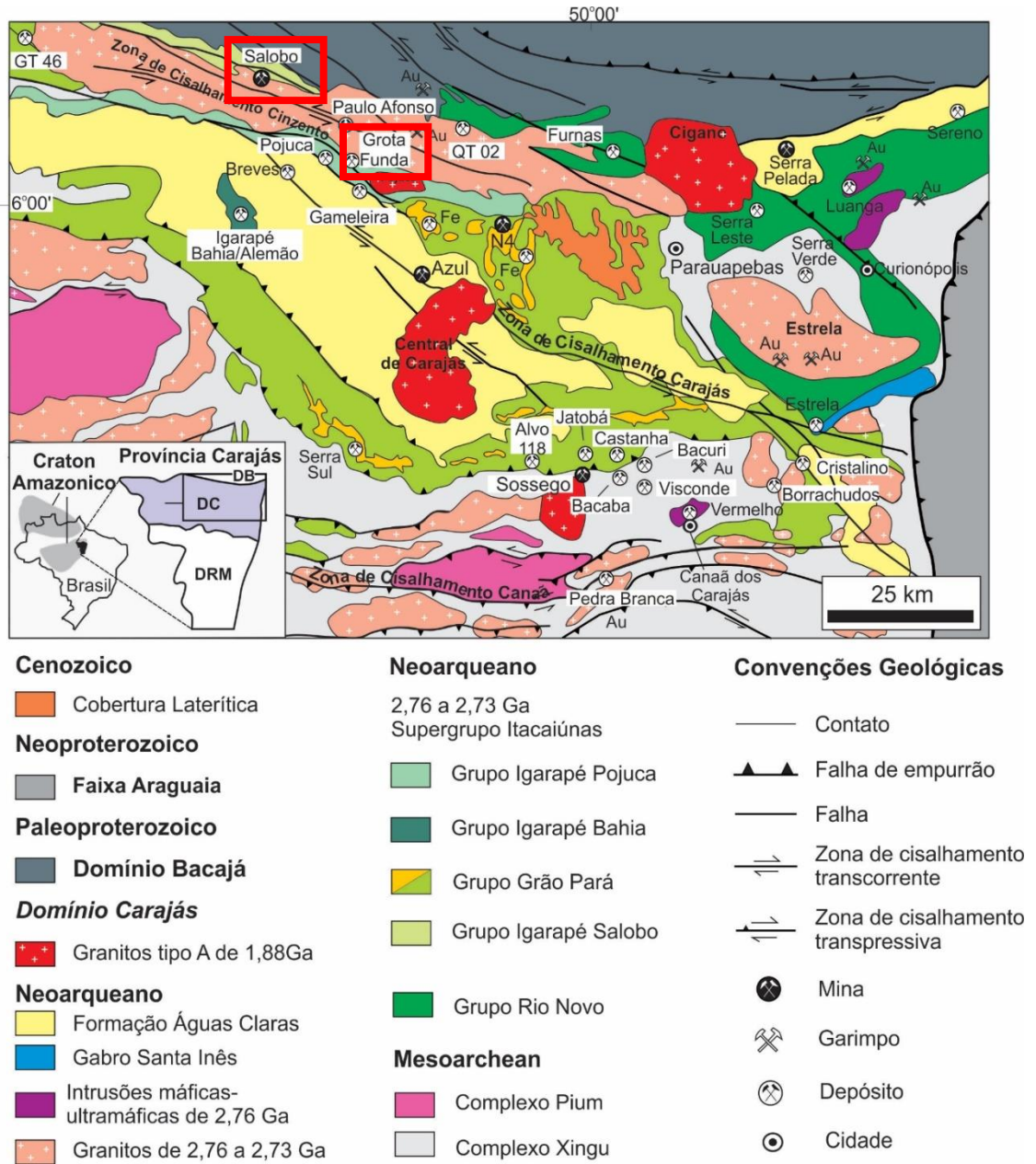


Figura 2.1- Mapa geológico do Domínio Carajás mostrando a localização dos depósitos (modificado de Vasquez *et al.* 2008).

2.2 ARCABOUÇO METAMÓRFICO-ESTRUTURAL

A Província Carajás é o mais importante bloco arqueano do Cráton Amazônico devido ao seu grande potencial mineral (Vasquez *et al.* 2008). Esta província vem sendo alvo de estudos, principalmente pelo seu potencial metalogenético.

No embasamento cristalino do Domínio Carajás há evidências de um evento metamórfico que afetou suas rochas. A idade deste evento foi obtida através de datação de bordas de zircão das rochas

do Complexo Pium que forneceu a idade $2,859 \pm 9$ Ma (U-Pb SHRIMP zircon; Pidgeon *et al.* 2000), possivelmente associada à colisão do Domínio Carajás com o Domínio Rio Maria.

As sequências metavulcano-sedimentares do Supergrupo Itacaiúnas foram depositadas entre 2,76 e 2,73 Ga (DOCEGEO 1988), e são coevas a um vulcanismo bimodal associado com a colocação de corpos graníticos do tipo A, evidenciando que este foi um período de atividade geológica intensa na região (Tavares *et al.* 2018). Alguns autores defendem que o Supergrupo Itacaiúnas foi formado em configurações de rifte continental (e.g. Gibbs *et al.* 1986; DOCEGEO 1988; Macambira 2003; Tallarico *et al.* 2005), argumentando que um extenso substrato cristalino mesoarqueano existia sob a bacia e imprimiu assinatura geoquímica e isotópica de contaminação crustal nos litotipos neoarqueanos, assim como destacam a típica bimodalidade do magmatismo. Por outro lado, há autores que defendem a evolução da abertura da bacia em contexto de arco magmático ativo (e.g. Meirelles & Dardenne 1991; Teixeira 1994; Lindenmayer *et al.* 2005; Lobato *et al.* 2005 e Zucchetti 2007) argumentando que parte dos litotipos do Supergrupo Itacaiúnas apresenta padrões ETR e outras características geoquímicas de rochas cálcio-alcalinas/shoshoníticas. Posteriormente, todas essas sequências teriam sido metamorfisadas em fácies xisto verde (Tavares *et al.* 2018). Por outro lado, há autores que sugerem que as sequências vulcanosedimentares do Supergrupo Itacaiúnas não registram essas condições (Dreher *et al.* 2008; Melo *et al.* 2019a).

Os principais lineamentos de escala regional reconhecidos no Domínio Carajás representam, na parte norte do Domínio, as zonas de cisalhamento transcorrente Cinzento e Carajás e na porção sul a zona de cisalhamento Canaã. Os sistemas Carajás e Canaã correspondem a grandes zonas de transcorrência de direção NW-SE com intensa deformação ao longo desses segmentos, enquanto o sistema Canaã é caracterizado por transpressão sinistral de direção E-W (Pinheiro *et al.* 2013). A presença dessas zonas de cisalhamento parece ter grande importância na formação do formato sigmoidal da Bacia Carajás (Pinheiro *et al.* 2013).

A complexa evolução estrutural do Domínio Carajás e o dinâmico metamorfismo das unidades do Arqueano são atribuídas ao desenvolvimento de zonas regionais de falhas de direção E-W, com evidências de que ocorreram vários episódios de reativação (Holdsworth & Pinheiro 2000). Ainda segundo estes autores, a zona de cisalhamento sinistral, transpressiva e dúctil da bacia Itacaiúnas foi formada em 2,85 a 2,76 Ga e foi seguida de transtensão destal que levou ao desenvolvimento dos sistemas de falhas transcorrentes Carajás e Cinzento entre 2,7 e 2,6 Ga. O regime transpressivo que evoluiu a cerca de 2,6 Ga, resultou em deformação moderada a forte de rochas próximas aos sistemas de falha Carajás e Cinzento (Holdsworth & Pinheiro 2000).

Estudos recentes sugerem que um evento metamórfico regional seria reconhecido na parte norte do Domínio Carajás resultado da colisão do Domínio Carajás e do Domínio Bacajá no paleoproterozoico (ca. 2,1 – 2,0 Ga), gerando paragêneses minerais de alto grau e toda a estruturação

WNW-ESE atualmente observada na transição entre os domínios (Tavares *et al.* 2018; Salgado *et al.* 2019; Prado 2019). Neste caso, os cristais de granada no depósito Salobo registrariam esse evento metamórfico (Prado 2019).

PRINCIPAIS DEPÓSITOS IOCG DO DOMÍNIO CARAJÁS

3.1 DEPÓSITOS IOCG NO DOMÍNIO CARAJÁS

Com a descoberta do depósito Olympic Dam na Austrália, em 1975, que possuía características geológicas distintas de todas as classes já definidas, depósitos análogos a ele passaram a ser alvo de pesquisa mineral. Hitzman *et al.* (1992), classificou o depósito Olympic Dam como depósito tipo da classe óxido de ferro-cobre-ouro (*Iron Oxide-Copper-Gold* ou IOCG).

Ainda que muitos estudos já tenham sido realizados em depósitos IOCG, ainda não há um modelo genético consensual, uma vez que a diversidade de características dos depósitos dessa classe relativas aos seus ambientes geotectônicos de formação, idades, rochas hospedeiras e tipos de alteração hidrotermal sugerem que distintos processos geológicos poderiam ser responsáveis pela gênese desses depósitos (Hitzman 2000; Williams *et al.* 2005). O estilo da mineralização nestes depósitos é variável, podendo ocorrer em veios e disseminados, formar corpos alongados ou lenticulares e preencher espaços na matriz de brechas (Hitzman 2000; Cox & Singer 2007).

A Província Carajás hospeda a maior concentração de depósitos IOCG de alta tonelagem do mundo (Monteiro *et al.* 2008), que incluem dos depósitos Salobo (1112 Mt @ 0,69 wt% Cu, 0,43 g/t Au, 55 g/t Ag; VALE 2012), Cristalino (500 Mt @ 1,0 wt% Cu; 0,3 g/t Au; Huhn *et al.* 1999), Sossego (355 Mt @ 1.1 % Cu e 0.28 g/t Au; Lancaster Oliveira *et al.* 2000), Igarapé Bahia/Alemão (219 Mt @ 1,4 wt% Cu, 0,86 g/t Au; Tallarico *et al.* 2005) e Alvo 118 (70 Mt @ 1,0 wt% Cu, 0,3 g/t Au; Rigon *et al.* 2000). No entanto, há ainda uma grande variedade de outros depósitos em avaliação, com grande importância para o conhecimento geológico da região, que incluem os depósitos GT-46, Furnas, Paulo Afonso, Grotta Funda, QT-02 e AN-34 no norte, e Castanha, Bacaba, Bacuri, Jatobá, Visconde, Borrachudos e Pantera no sul (Melo 2018).

A grande concentração de depósitos com a associação Cu-Au da Província Carajás foi denominada por Tallarico (2003) como Cinturão Cupro-Aurífero de Carajás. Este cinturão apresenta jazimentos tanto em sua porção sul, o Cinturão Sul do Cobre (Moreto *et al.* 2015a, b), quanto em sua porção norte, o Cinturão Norte do Cobre. Os depósitos da porção norte situam-se preferencialmente nas Zonas de Cisalhamento do Cinzento e Carajás (Xavier *et al.* 2012), enquanto os depósitos do Cinturão Sul do Cobre localizam-se ao longo da Zona de Cisalhamento Canaã dos Carajás (Pinheiro *et al.* 2013).

Os depósitos da porção norte apresentam algumas diferenças quando comparados com os da porção sul (Melo 2018). O depósito Salobo apresenta associação hidrotermal de mais alta temperatura,

incluindo fayalita e granada (Lindenmayer 2003; Melo *et al.* 2016). Associações minerais com *end-members* ricos em ferro, como almandina e grunerita, além da grande presença de turmalina próxima às zonas mineralizadas, são características comuns desses depósitos (Lindenmayer 2003; Tallarico *et al.* 2005; Silva *et al.* 2005; Xavier *et al.* 2008; Melo *et al.* 2016).

Três eventos de alojamento de corpos graníticos identificados no Domínio Carajás têm sido relacionados à gênese dos depósitos IOCG de Carajás. O evento mais antigo é síncrono à deposição das sequências do Supergrupo Itacaiúnas, em 2,76 a 2,73 Ga, porém sem depósitos IOCG coevos formados neste período (DOCEGEO 1988). O evento de mineralização principal no Cinturão Norte do Cobre, em 2,61 a 2,55 Ga, que gerou depósitos como o Salobo e o Grota Funda (Réquia *et al.* 2003; Hunger 2017) é sincrônico à colocação de corpos graníticos em ca. 2,55 Ga (Melo *et al.* 2016, Toledo *et al.* 2019). E o evento mineralizante mais novo ocorreu ao redor de 1,88 Ga e é correlacionado a remobilizações tardias (ex. Depósito Gameleira; Lindenmayer *et al.* 2001).

A importância de intrusões graníticas neoarqueanas (ca. 2,57 Ga) foi proposta por alguns autores para se estabelecer os sistemas magmático-hidrotermais IOCG de Carajás (Réquia *et al.* 2003; Tallarico *et al.* 2005; Grainger *et al.* 2008; Groves *et al.* 2010). Contudo, esta idade é contestada devido ao magmatismo de ca. 2,57 Ga ser presente somente no Cinturão Norte do Cobre. Essa idade seria próxima à idade associada à reativação do sistema de falha transcorrente Cinzento (Teixeira *et al.* 2010).

No Cinturão Sul do Cobre, os depósitos de classe mundial (ex. Sossego, Cristalino e Alvo 118) apresentam extensas zonas de alteração alcalina (sódica e potássica), presença de zonas com escapolita e o reconhecimento de feições tardias rúpteis nesses depósitos (Monteiro *et al.* 2008; Pestilho 2011; Torresi *et al.* 2012; Melo *et al.* 2014). Moreto *et al.* (2015a,b), sugere que múltiplos eventos hidrotermais neoarqueanos e paleoproterozoico foram responsáveis pela alteração hidrotermal e mineralização cuprífera no Cinturão Sul do Cobre com base em datação de cristais de monazita hidrotermal (U-Pb LA-MC-ICPMS) e molibdenita (Re-Os NTIMS) dos corpos Sequeirinho e Pista, e dos depósitos Bacuri e Bacabá, que forneceram idades entre 2,71 a 2,68 Ga, enquanto monazita hidrotermal dos corpos Sossego e Curral resultaram em idades entre 1,90 e 1,88 Ga. Adicionalmente foram obtidas idades entre 2,76 e 2,05 Ga indicadas por cristais de molibdenita do depósito Bacuri e de monazita do depósito Bacabá (Moreto 2013). Idade de 1,87 Ga (U-Pb SHRIMP, Tallarico 2003) é associada ao minério do Alvo 118 e à instalação de sistema(s) hidrotermal(is) IOCG em níveis crustais mais rasos que resultou na formação de novos depósitos e corpos de minério (Moreto 2013).

Apesar de serem conhecidas algumas características distintivas nos depósitos IOCG de Carajás, como alterações hidrotermais em níveis crustais diversos e diferenças na interação fluido-rocha, os depósitos apresentam algumas características em comum, sendo as principais: 1) associação com zonas de cisalhamento; 2) associação com brechas hidrotermais; 3) intensa alteração hidrotermal

alcalina, incluindo a sequência geral com alteração inicial sódica, sódica-cálcica e potássica, além de cloritização, turmalinização e silicificação tardias; 4) formação de magnetita que antecede precipitação de sulfetos; 5) fluidos com elevadas e baixas temperaturas de homogeneização (100 a 570°C) e amplo intervalo de salinidades (0-69% eq. Peso NaCl), indicando a mistura de fluidos de origens diversas que possibilitaram o transporte e deposição dos metais e 6) assinatura geoquímica com enriquecimento em ETR, P, U, Co e Ni (Huhn & Nascimento 1997; Monteiro *et al.* 2008; Xavier *et al.* 2012).

REVISÃO DOS DEPÓSITOS SALOBO E GROTA FUNDA

4.1 DEPÓSITO SALOBO

O depósito de Cu-(Au-Mo-Ag) do Salobo situa-se na porção norte do Domínio Carajás (Vasquez *et al.* 2008). Este depósito está localizado ao longo da Zona de Cisalhamento Cinzento, uma região onde lineamentos de ordem inferior se alojam. O depósito foi descoberto em 1978, mas a operação mineira teve seu início apenas no ano de 2012 (Melo *et al.* 2016).

Inicialmente as rochas ricas em almandina, grunerita, biotita e magnetita foram classificadas como xistos e interpretadas como produtos de metamorfismo regional de vulcânicas, grauvacas e formações ferríferas bandadas (Lindenmayer 2003). Esses litotipos foram reinterpretados como produtos de intensa alteração hidrotermal associada a deformação dúctil (Réquia *et al.* 2003, Melo *et al.* 2016). Desta forma, as rochas hospedeiras do depósito compreendem gnaisses do embasamento mesoarqueanos pertencentes ao Complexo Xingu com idades de cristalização de 2950 ± 25 Ma e idade de metamorfismo/deformação destas rochas como sendo $2857 \pm 6,7$ Ma, além de gnaisses da suíte Igarapé Gelado com idade de $2763 \pm 4,4$ Ma e unidades supracrustais do Grupo Igarapé Salobo que inclui quartzo milonito (Melo *et al.* 2016). Granitos, pegmatitos e diques tardios também são encontrados no Salobo (Lindenmayer 2003).

Ao longo da Zona de Cisalhamento Cinzento, características originais das principais rochas hospedeiras do depósito Salobo foram obliteradas devido à deformação que conferiu uma foliação milonítica generalizada, penetrativa, subvertical e de direção NW-SE às rochas (Melo *et al.* 2016). Na zona central do depósito, onde estão hospedadas as mineralizações de ferro-cobre-ouro, a deformação e alteração hidrotermal são especialmente intensas, apresentando assembleias de alteração hidrotermal bem desenvolvidas (ex. rochas ricas em anfibólio e grunerita-almandina-biotita; Melo *et al.* 2016).

Os eventos hidrotermais que afetaram as rochas deste depósito incluem alteração sódico-cálcica acompanhada de silicificação, seguida por um pronunciado enriquecimento em ferro e alteração potássica (Melo *et al.* 2016). Ainda segundo estes autores, a alteração sódico-cálcica neste depósito é caracterizada por hastingsita e por um conjunto de actinolita \pm marialita \pm escapolita \pm titanita \pm calcopirita \pm alanita \pm dravita.

A silicificação ocorre em vários estágios e são encontradas múltiplas gerações de quartzo hidrotermal nas rochas hospedeira deste depósito. Quartzo I foi coevo com a alteração sódico-cálcica das rochas gnáissicas e também foi reconhecido em quartzo milonito; quartzo II forma finas camadas com subgrãos e quartzo estirado e acompanha a alteração potássica com biotita; quartzo III ocorre

como veios tardios que cortam transversalmente os principais estágios de alteração hidrotermal e a foliação milonítica (Melo *et al.* 2016).

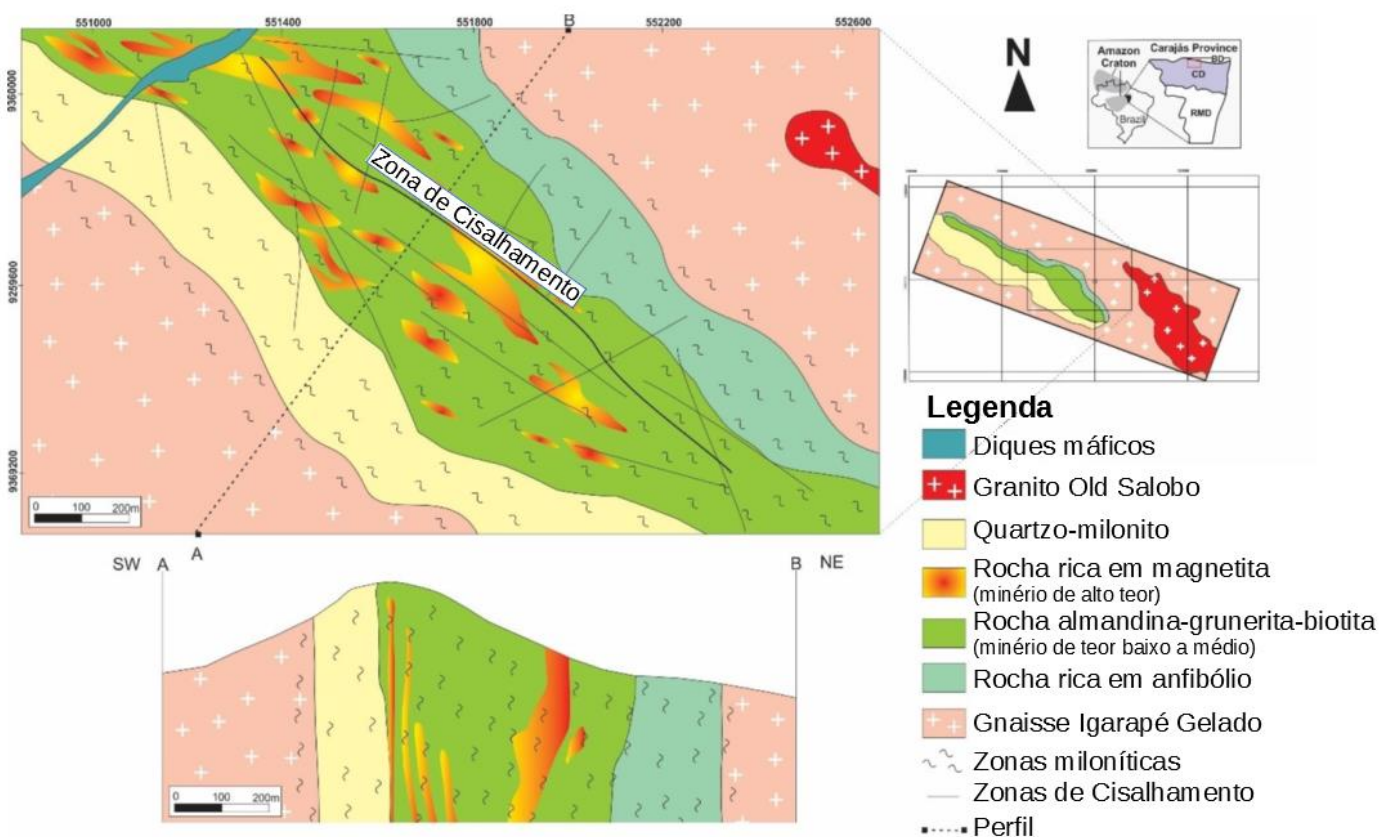


Figura 4.1 - Mapa geológico e perfil do depósito Salobo mostrando as rochas menos alteradas e hidrotermalmente alteradas do depósito localizado na zona de cisalhamento do Cinzento (Modificado de Vale (2003)).

A zona central do depósito Salobo é caracterizada por enriquecimento de ferro generalizado representado pela precipitação de grunerita + almandina + schorlita ± faialita + magnetita (Fig. 4.1; Melo *et al.* 2016). Nas zonas de alteração ricas em ferro encontra-se uma grande concentração de almandina hidrotermal que parece ter se formado antes, quando comparada a outros minerais ricos em Fe. A alteração potássica no depósito Salobo ocorre mais desenvolvida próxima às zonas mineralizadas ocorrendo subsequente substituição da grunerita e da almandina por biotita em zonas com fraca alteração potássica (Melo *et al.* 2016). Bornita e calcocita predominam como minerais de minério, embora calcopirita também seja observada (Réquia *et al.* 2003, Melo *et al.* 2016).

O evento principal de mineralização cuprífera no depósito Salobo ocorre em 2576 ± 8 Ma (Re-Os em molibdenita, Réquia *et al.* 2003). Essa mineralização parece ter sido formada durante pulsos de reativação tectônica ao longo de zonas de cisalhamento, possivelmente associada a magmatismo granítico de mesma idade (Machado *et al.* 1991; Souza e Vieira 2000; Réquia *et al.* 2003; Melo *et al.* 2017) em torno de 2,57 Ga (Machado *et al.* 1991; Melo *et al.* 2016). Tassinari *et al.* (2003) sugere que

um evento metamórfico-hidrotermal ocorreu durante o Paleoproterozoico, baseado em idades de 2112 ± 12 Ma (Pb-Pb; Tassinari *et al.* 2003) em cristais de magnetita.

4.2 DEPÓSITO GROTA FUNDA

O depósito Grota Funda situa-se ao longo de uma zona de cisalhamento regional de direção WNW-ESSE, denominada Sistema Transcorrente Pojuca, na porção noroeste do Domínio Carajás (Hunger *et al.* 2019). Ainda segundo estes autores, ocorrem neste depósito sequências metavulcano-sedimentares do Grupo Igarapé Pojuca compreendem basaltos, diabásios, gabros, dacitos e formações ferríferas bandadas, sendo que as rochas ígneas máficas representam os principais litotipos hospedeiros da mineralização de cobre (-ouro) (Fig. 4.2). Essas rochas parecem não exibir paragêneses metamórficas (ex. presença de textura amigdaloidal em rocha ígnea máfica; Hunger *et al.* 2019). As características texturais e mineralógicas originais dos litotipos do depósito Grota Funda foram parcial a completamente obliteradas por alterações hidrotermais intensas e generalizadas e por deformação rúptil-dúctil (Hunger *et al.* 2019).

O depósito Grota Funda registra um intenso processo de alteração hidrotermal, incluindo estágios de alteração sódica-cálcica, metassomatismo férrico, alteração potássica, formação de clorita-quartzo-turmalina e veios de carbonato-quartzo (Hunger *et al.* 2019).

A alteração sódica-cálcica caracteriza o estágio inicial de atividade hidrotermal neste depósito e é representada por albita, hastingsita e escapolita. Essa assembleia é interpretada como desenvolvida a partir da circulação regional de fluidos hipersalinos e metalíferos de alta temperatura (i.e. $>500^{\circ}\text{C}$; Hunger *et al.* 2019). A zona central do depósito Grota Funda é marcada por intenso metassomatismo rico em ferro, representado pela precipitação maciça de magnetita (I)-gruneruta-almandina \pm clorita (I)-quartzo (Hunger *et al.* 2019). Ainda segundo estes autores, a magnetita é a fase mineral mais importante associada ao estágio de metassomatismo de ferro e chega a compor até 55% das zonas mineralizadas. O teor de almandina neste depósito torna-se progressivamente maior em direção às zonas enriquecidas em ferro. Neste caso, a granada geralmente apresenta textura poiquiloblástica, fraturada, repleta de inclusões de grunerita, magnetita e quartzo, mas também ocorre como grãos alongados, com sombra de pressão ou seletivamente substituída por biotita (Hunger *et al.* 2019).

A alteração potássica no depósito Grota Funda afeta todos os tipos de rochas e sobrepõe-se a ambas as assembleias de alterações sódico-cálcicas e ricas em ferro (Hunger *et al.* 2019). Segundo estes autores as zonas que sofreram forte alteração potássica são representadas essencialmente por biotita + quartzo, acompanhadas de quantidades subordinadas de apatita, turmalina (I), alanita, ilmenita e hematita titanífera.

Idades de mineralização no depósito Grota Funda foram obtidas em 2530 ± 60 Ma (Re-Os em molibdenita, Hunger *et al.* 2018) e interpretadas como formada no mesmo evento mineralizante registrado nos depósitos Salobo e Igarapé Bahia (Réquia *et al.* 2003, Tallarico *et al.* 2005).

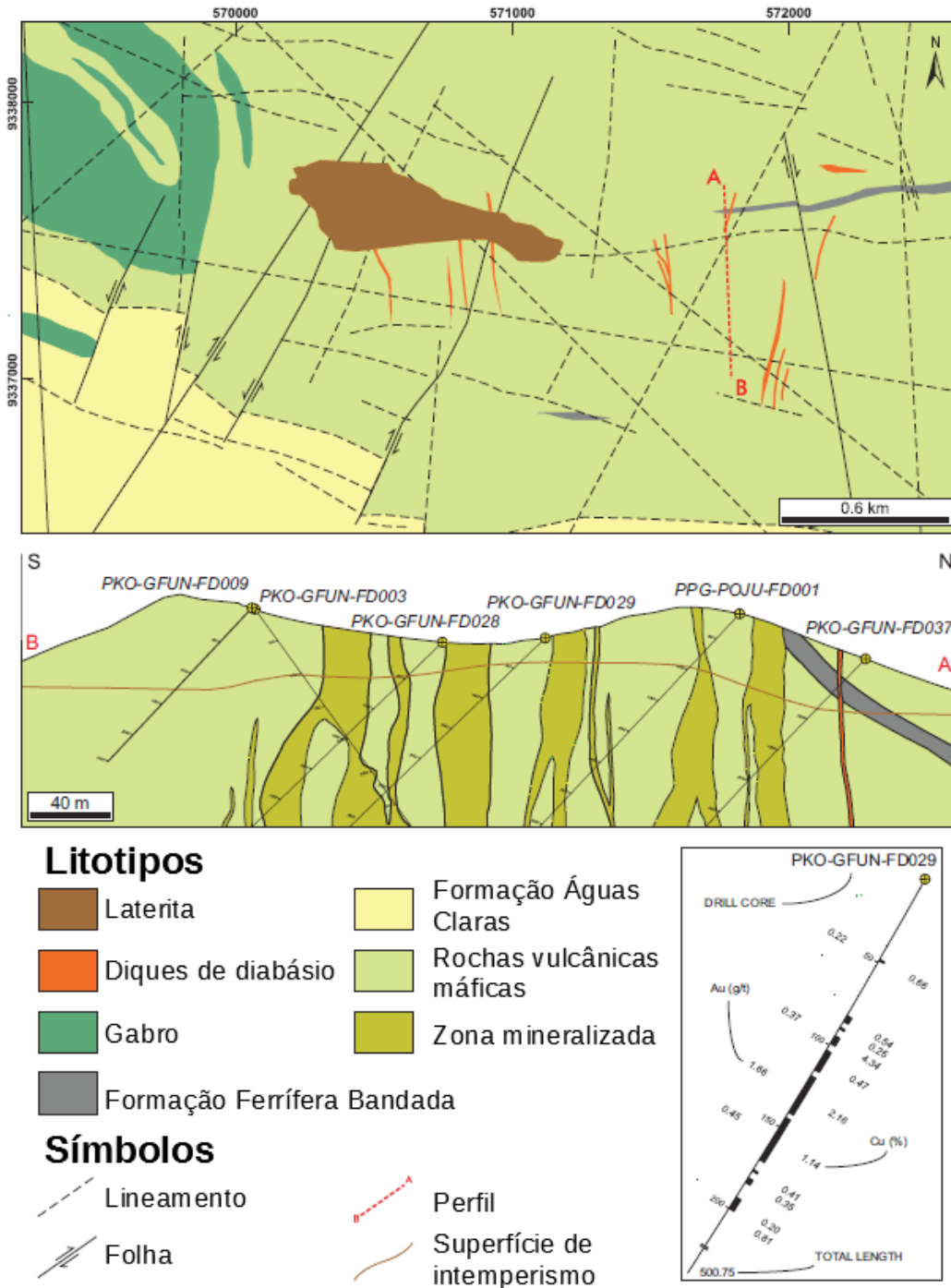


Figura 4.2 - Mapa geológico simplificado e seção transversal do depósito Grota Funda, mostrando os principais litotipos que ocorrem no depósito e as zonas mineralizadas (Modificado de Hunger *et al.* 2019).

CAPÍTULO 5

GRANADA: UMA FERRAMENTA IMPORTANTE COMO TRAÇADOR DE PROCESSOS GEOLÓGICOS

A granada pode ocorrer como fase estável em uma ampla gama de pressões, temperaturas e ambientes químicos de formação. Embora seja mais comumente associada a rochas metamórficas de contato e regionais, ela também é encontrada em rochas ígneas e devido à sua resistência à quebra química e mecânica, ocorre como grãos detríticos em rochas sedimentares (Liebau 1982).

A granada é admitida como um mineral isotrópico, embora a almandina e o piropo sejam em geral completamente isotrópicos, a espessartita pode ser um pouco anisotrópica e a série ugrandita pode apresentar acentuado anisotropia (Sobolev 1965). A cor das granadas é bastante variável, sendo controladas principalmente pelas quantidades de Fe, Mn e Cr presentes (Deer *et al.* 1992).

Os minerais do grupo da granada são soluções sólidas entre dois ou mais *end-members*, cuja fórmula estrutural pode ser descrita por $X_3Y_2 [SiO_4]_3$, onde $X = Mg^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}$ ou Ca^{2+} e $Y = Al^{3+}, Fe^{3+}, Ti^{4+}, Cr^{3+}$ ou V^{3+} (Deer *et al.* 1992). Embora a estrutura da granada possa acomodar uma variedade de cátions, as granadas mais comuns são compostas dos mais abundantes cátions di-, tri- e tetravalentes da crosta terrestre; a saber, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Mn e Fe (Liebau 1982).

Winchell (1933) dividiu as granadas em dois grupos com base em sua química de elementos principais e, naquela época, no grau conhecido de solução sólida entre os vários *end-members*. As diferenças entre os dois grupos estão nas consequências físicas e químicas que podem resultar dos diferentes cátions X e Y. O nome dos grupos, ugrandita e pyralspita, são acrônimos derivados da abreviação dos membros de cada grupo, conforme a tabela 1:

Tabela 1: Os dois grupos de granada segundo Winchell (1933).

<i>Grupo Ugrandita</i>		<i>Grupo Pyralspita</i>	
Uvarovita	$Ca_3Cr_2Si_3O_{12}$	Piropo	$Mg_3Al_2Si_3O_{12}$
Grossulária	$Ca_3Al_2Si_3O_{12}$	Almandina	$Fe_3Al_2Si_3O_{12}$
Andratita	$Ca_3Fe_2Si_3O_{12}$	Espessartite	$Mn_3Al_2Si_3O_{12}$

A grande variedade de composição da granada permite uma abordagem ampla sobre suas condições de formação, que incluem principalmente pressão e temperatura, além de composição

química do meio e tempo de formação. Isso tem reflexos diretos no entendimento de processos formadores de granada e, conseqüentemente, em seus ambientes de formação. Usualmente, a granada tem sido utilizada tanto para identificar condições metamórficas quanto como traçador da evolução sistemas hidrotermais.

Diversos estudos vêm mostrando a utilização de granada como uma importante ferramenta na caracterização de processos hidrotermais e metamórficos a partir da variação de sua composição (Jamtveit 1991; Jamtveit *et al.* 1993; Jamtveit *et al.* 1995; Crowe *et al.* 2001; Martin *et al.* 2011). São reconhecidos dois principais mecanismos geradores de zoneamento químico em granada, que são o zoneamento de crescimento, gerado por novas composições adicionadas à borda do mineral durante seu crescimento, e o zoneamento por difusão, onde a modificação da composição de uma granada pré-existente se dá por mecanismos de difusão por volume, um processo termal ativado (Silva & Porcher 1996).

É possível que durante a cristalização da granada e a evolução de sistemas metamórficos e/ou hidrotermais a granada se reequilibre através de processos de dissolução e reprecipitação (Martins *et al.* 2011), mudando tanto sua composição química quanto sua textura.

Por outro lado, muitas vezes na granada pode não aparecer zoneamento nenhum durante o crescimento. Isso pode ser reflexo de homogeneização da granada zoneada por difusão intracristalina em temperaturas elevadas, um processo que opera em uma escala de tempo de milhões a dezenas de milhões de anos (Spear 1988). Essa homogeneidade em cristais de granada pode ser oriunda também do próprio equilíbrio de P-T entre granada e o meio em que se formou (Rotzler *et al.* 2008). A homogeneidade em relação aos elementos maiores, menores e traços pode sugerir a formação da granada em mesmas condições de P-T-X (Dziggel *et al.* 2009). Ainda que não sejam observadas variações composicionais em cristais de granada, possíveis inclusões minerais presentes podem revelar importantes informações de condições P-T-X.

6.1 DEPÓSITO SALOBO

6.1.1 Forma de ocorrência e caracterização petrográfica da granada

As amostras utilizadas neste trabalho compreendem principalmente as rochas das porções centrais do depósito Salobo. Rochas ricas em granada-grunerita-biotita (Fig. 6.1A, B, C, D) representam o principal litotipo na zona central do depósito Salobo, incluindo as zonas mineralizadas. Esta última é representada por paragêneses interpretadas como formadas por alteração hidrotermal férrica (almandina-grunerita-magnetita) e potássica (biotita) fortemente milonitizadas (Réquia *et al.*, 2003; Melo *et al.* 2016).

Esse pacote de rochas parece envelopar as zonas do minério cuprífero, embora nessas rochas também sejam encontradas quantidades significativas de magnetita e sulfetos (i.e. bornita e calcocita).

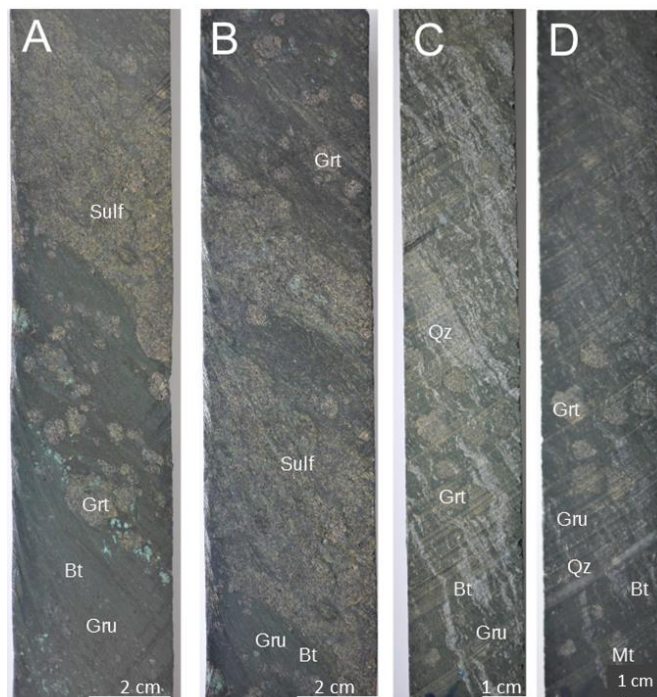


Figura 6.1 - Rochas hidrotermais, ricas em granada-grunerita-biotita do depósito Salobo; (A) Na porção central da amostra tem-se cristais subidioblásticos de granada e presença de sulfetos; B) Cristais de granada sobre rochas ricas em biotita e grunerita. C) Porfiroblastos de granada alternados com faixas quartzosas milonitizadas com faixas ricas em grunerita. D) Cristais de granada subidioblásticos em matriz rica em biotita e magnetita. Abreviações: Sulf = sulfeto, Grt = granada, Bt = biotita, Gru = grunerita, Qz = quartzo e Mt = magnetita.

Nestas rochas, a granada ocorre tanto de forma coalescente, como pode ser observado nas Figuras 6.1A e B, quanto dispersa na matriz (Fig. 6.1C, D). A matriz da rocha é rica em grunerita e

biotita que ocorrem em faixas, muitas vezes alternadas com faixas de quartzo milonitizado (Fig. 6.1C, D).

Os estudos petrográficos em luz transmitida e refletida, mostraram que a mineralogia associada à granada varia conforme o grau de deformação da rocha na qual ela se encontra. Em algumas porções a granada se associa comumente a quartzo, biotita e grunerita (Fig. 6.2A), enquanto em porções mais subordinadas a mineralogia mais observada associada à granada é clorita e biotita (Fig. 6.2E). Cristais de apatita, turmalina e magnetita foram identificados em amostras de rochas dos dois tipos (Fig. 6.2B). Há cristais que não mostram relação alguma com a foliação da rocha que ocorre de forma decussada em algumas amostras (Fig. 6.2D). Por outro lado, tem-se também cristais de granada possivelmente pré-tectônica, com sombra de pressão e inclusões de biotita e grunerita que acompanham a orientação dos minerais que marcam a foliação milonítica da rocha (Fig. 6.2C). Nas zonas de maior alteração hidrotermal e minério maciço, a foliação parece não se preservar.

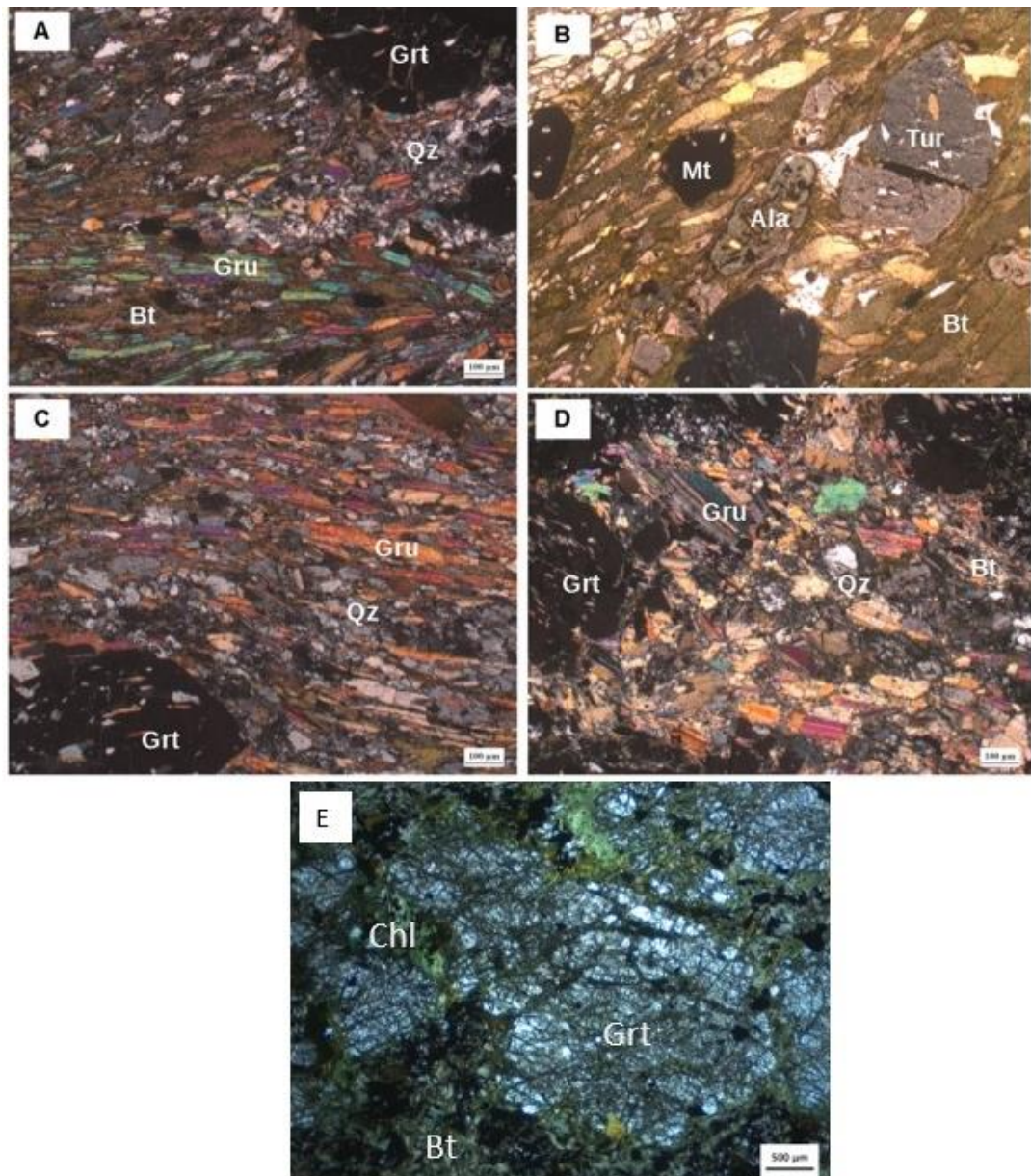


Figura 6.2 - Aspectos microscópicos das rochas do depósito Salobo; (A) Mineralogia principal da rocha exibindo porfiroblasto de granada, biotita, grunerita e quartzo. (B) Cristais de magnetita, alanita e turmalina, que ocorrem como minerais acessórios nas rochas do depósito, em matriz de biotita. (C) Foliação marcada por quartzo e grunerita contornando cristal de granada e exibindo uma leve sombra de pressão no mesmo (D) Lâmina exibindo foliação decussada. (E) Rocha alterada hidrotermalmente exibindo biotita, clorita e cristal de granada. Abreviações: Grt = granada, Bt = biotita, Gru = grunerita, Qz = quartzo, Mt = magnetita, Ala = allanita e Tur = turmalina.

Com base nos estudos petrográficos, levando-se em consideração especialmente o modo de ocorrência, textura e relação com a foliação, a granada do depósito Salobo foi individualizada em três tipos texturais: (i) granada idioblástica e sem sombra de pressão, (ii) granada levemente estirada com sombra de pressão e (iii) granada extremamente fraturada, alterada e cortada por vênulas de clorita. Os

dois primeiros tipos ocorrem em rochas que apresentam alteração hidrotermal tardia (ex. formação de clorita) menos intensa quando comparada com as rochas associadas à presença de granada do tipo (iii).

A granada (i) constitui preferencialmente pórfiros idiomórficos, com tamanho variando entre 2 e 9 mm e coloração incolor a rosa claro (Fig. 6.3A). Neste caso, os cristais de granada (i) são envoltos principalmente por biotita e grunerita hidrotermais (Fig. 6.3B). Os cristais de granada (i) são homogêneos e não parecem apresentar diferenças texturais entre núcleo e borda. Esses pórfiros possuem textura poiquiloblástica compostos principalmente por inclusões de biotita, quartzo, grunerita, allanita e turmalina geralmente associados a pequenas fraturas.

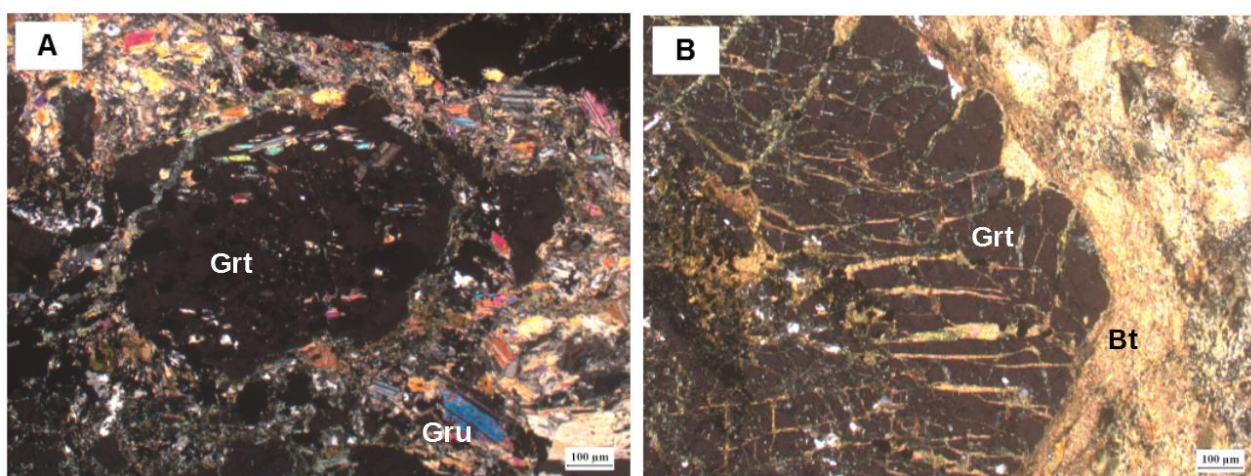


Figura 6.3 - Aspectos microscópicos dos cristais de Granada do tipo (i) do Depósito Salobo; (A) Cristal de granada tipo (i) envolto por matriz decussada. (B) Cristal de granada do tipo (i) envolto por biotita que também ocorre preenchendo as fraturas do mesmo. Abreviações: Grt = granada, Bt = biotita e Gru = grunerita.

A granada (ii) apresenta cristais porfiroblásticos de tamanho variando entre 2 e 7 mm, moderadamente estirados (Fig 6.4A, B). Esses cristais apresentam textura poiquiloblástica, com inclusões de grunerita, quartzo, biotita, allanita e turmalina. É comum a ocorrência de sombra de pressão assimétrica marcada por quartzo, biotita e grunerita orientados, que ocorrem contornando os grãos de granada (ii).

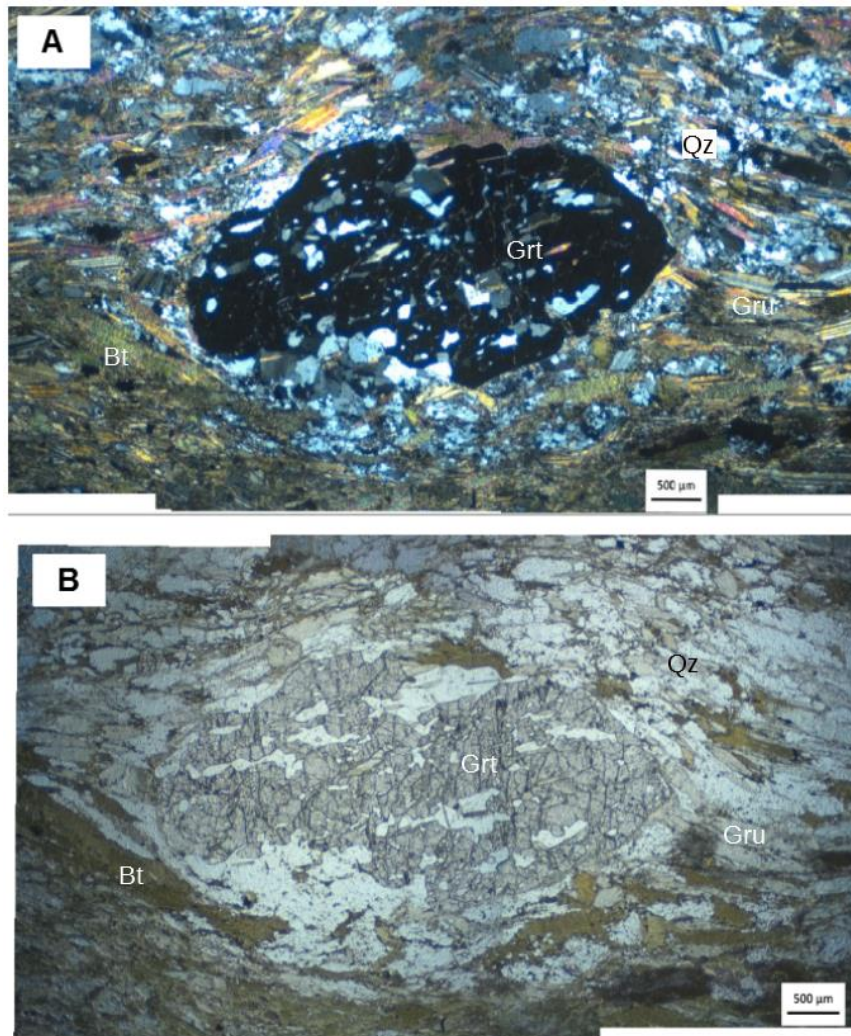


Figura 6.4 – Aspectos microscópicos dos cristais de granada tipo (ii); (A) Cristal de granada estirado e exibindo sombra de pressão. (B) Cristal de granada estirado em matriz exibindo foliação milonítica. Abreviações: Grt = granada, Bt = biotita e Qz = quartzo.

A granada (iii) ocorre como cristais subédricos a anédricos, por vezes esqueletiformes, de tamanho variando entre 1,5 e 10 mm com intensa alteração hidrotermal e bastante fraturados (Fig. 6.5A, C). As fraturas ocorrem, comumente, preenchidas por clorita e biotita. Inclusões de grunerita e de magnetita foram reconhecidas na granada deste tipo (Fig. 6.5B).

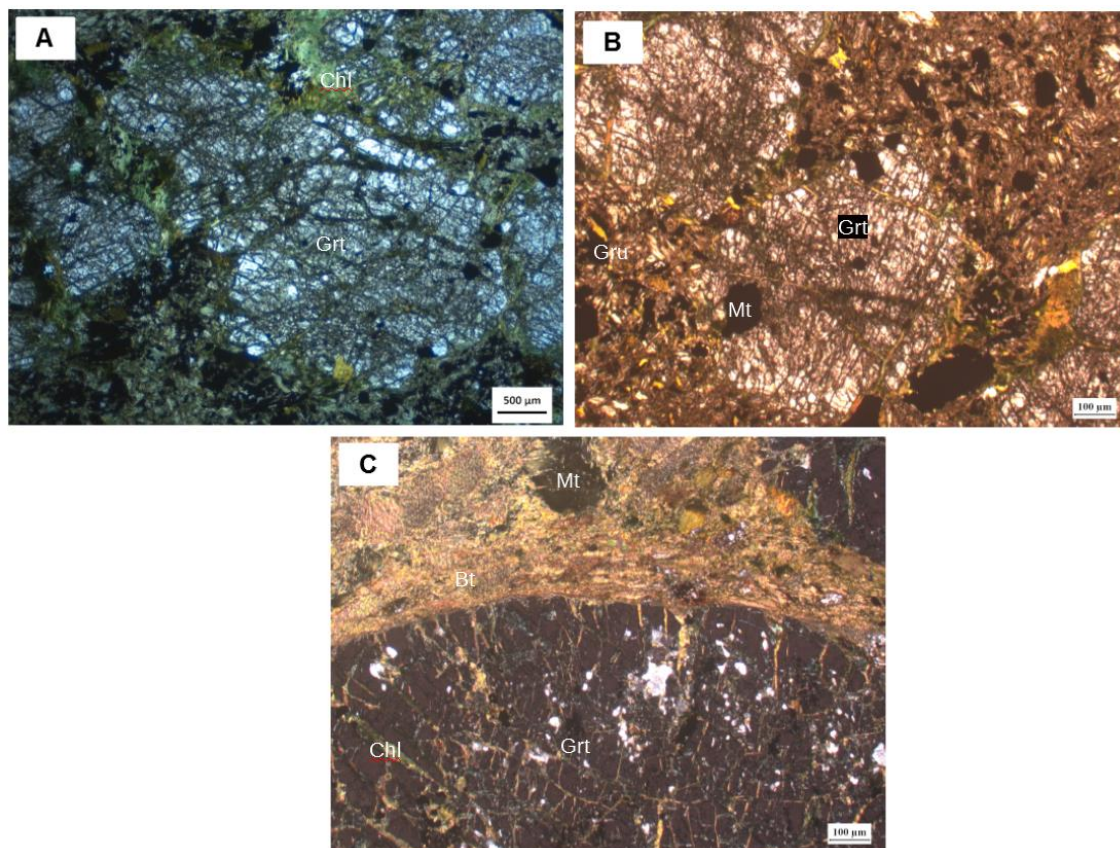


Figura 6.5 - Aspectos microscópicos da granada do tipo (iii) do Depósito Salobo; (A) Cristal de granada do tipo (iii) exibindo fraturamento intenso e preenchido por clorita. (B) Cristal de granada do tipo (iii) extremamente fraturado exibindo inclusão de magnetita e matriz com grunerita e biotita cloritzada. (C) Cristal de granada do tipo (iii) fraturado e envolto por matriz de biotita cloritzada. Abreviações: Grt = granada, Bt = biotita, Gru = grunerita, Mt = magnetita e Chl = clorita.

6.1.2 Inclusões minerais na granada

Os estudos petrográficos detalhados aliados à utilização da Microscopia Eletrônica de Varredura com EDS permitiram a caracterização das inclusões nos diferentes tipos de granada. As inclusões minerais são semelhantes nos distintos tipos texturais.

Nos cristais de granada (i) e (ii) foram identificadas principalmente inclusões de ilmenita (Fig. 6.6B), alanita (Fig. 6.6D), bornita (Fig. 6.6E), quartzo (Fig. 6.6F), grunerita (Fig. 6.6G), turmalina, e biotita. Na granada desses tipos, o quartzo (Fig. 6.6F) ocorre formando inclusões e também formando lentes no entorno dos grãos. Apresenta forte extinção ondulante e, muitas vezes, é possível notar a presença de subgrãos. A grunerita parece ser o mineral predominante tanto na granada (i) quanto na (ii). Nesse caso, cristais prismáticos de grunerita ocorrem tanto no núcleo como nas bordas da granada.

Na granada (iii) foi observada clorita ocorrendo como cristais xenomórficos, muitas vezes preenchendo fraturas da granada ou como alteração da mesma. Lamelas de biotita são observadas

como inclusões na granada (iii). Além destes minerais, foram observados como inclusões na granada deste tipo: quartzo, ilmenita, monazita e magnetita.

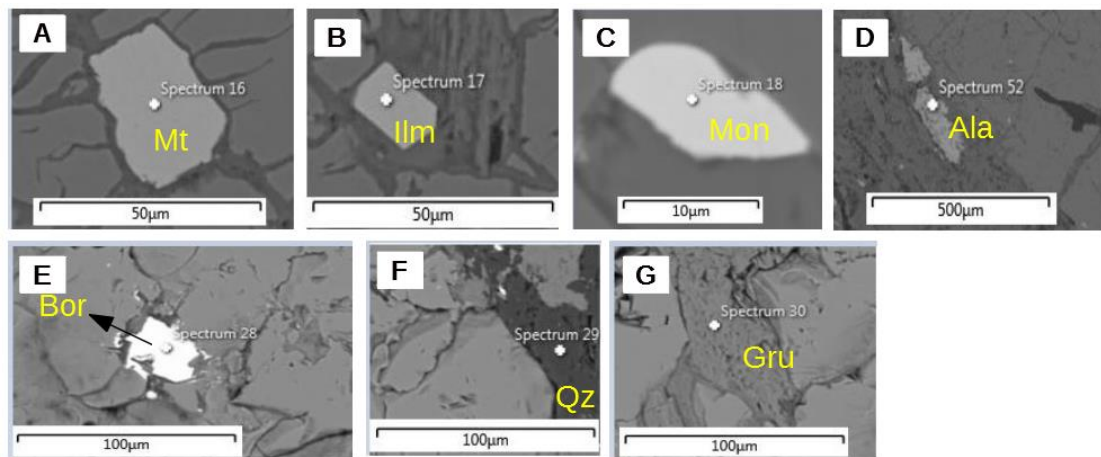


Figura 6.6 - Prancha com as inclusões minerais da granada identificadas no MEV e EDS; A) cristal de magnetita. B) Cristal de ilmenita. C) Cristal de monazita. D) Cristal de alanita. E) Cristal de bornita. F) Cristal de quartzo e G) cristal de grunerita. Abreviações: Mt = magnetita, Ilm = ilmenita, Mon = monazita, Ala = alanita, Bor = bornita, Qz = quartzo e Gru = grunerita.

6.1.3 Variação composicional da granada por MEV e EDS

Foram selecionados cristais de granada dos tipos (i), (ii) e (iii) para as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura-EDS (MEV-EDS). As análises por EDS priorizaram a confecção de perfis passando por borda e núcleo e a elaboração de mapas composicionais dos principais elementos químicos da granada. Os dados de composição química da granada do depósito Salobo adquiridos nesta etapa podem ser conferidos no Apêndice A.

- **Granada tipo (i)**

Observando as linhas das figuras do perfil da granada tipo (i) (Fig. 6.7A, B), tem-se que as curvas dos óxidos CaO, FeO, MgO e MnO apresentam menor variação. Por outro lado, pontualmente observa-se variação de FeO (que apresenta valores de 40,71% no spot 67 e 40,91% no spot 70 e valores acima de 43% nos demais spots), Al₂O₃ (que apresenta valores 21,35% no spot 67 e 20,31% no spot 70, e de aproximadamente 19% nos demais spots) e levemente de SiO₂, que apresenta concentração de 35,05% no spot 70 e de aproximadamente 33% nos demais spots.

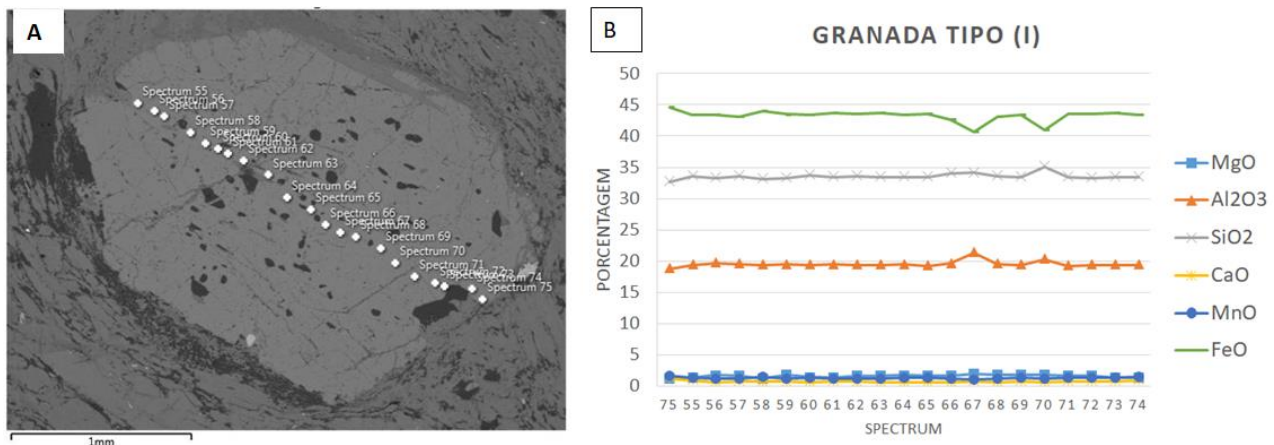


Figura 6.7 - Análises EDS acoplado a MEV da granada tipo (i); A) Imagem de elétrons retroespalhados dos cristal de granada (i) com os spots do EDS; B) Perfis elementares dos spots de EDS cortando o cristal de granada (i) de uma borda até a outra;

Corroborando com o que é observado no perfil composicional, nos mapas composicionais (Fig. 6.8A, B, C, D, E, F) praticamente não há variação nos elementos Ca, Ti, Mg, Al e Fe ao longo do cristal de granada. Neles observa-se também que as inclusões realçam alguns elementos químicos comuns de sua própria composição

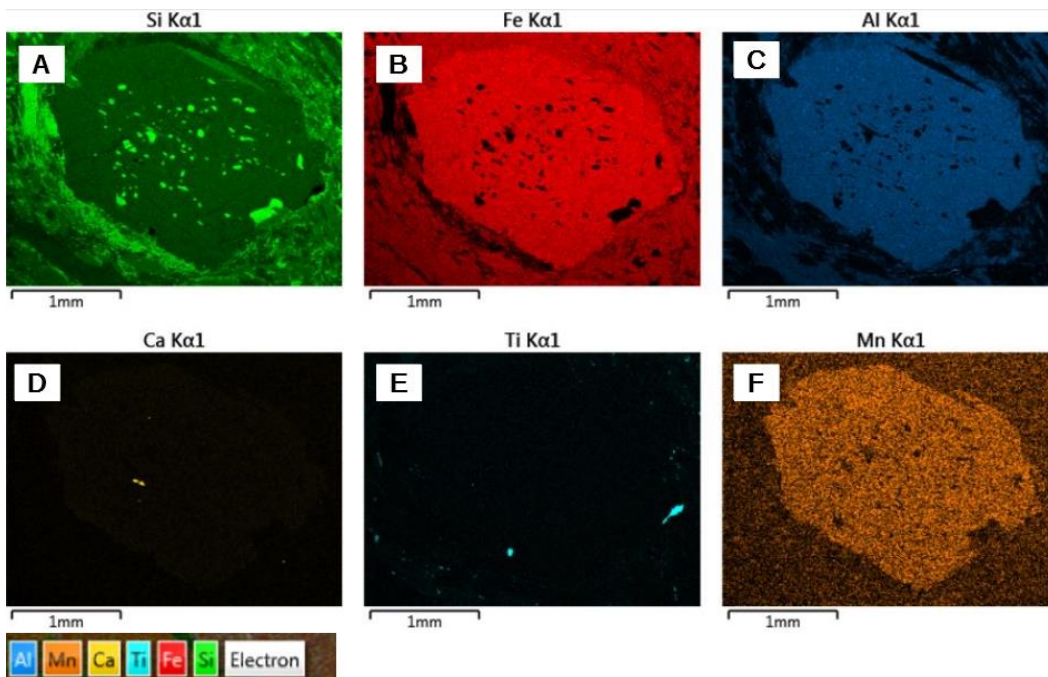


Figura 6.8 - Mapas composicionais da granada tipo (i); A) mapa composicional realçando o elemento Si; B) mapa composicional realçando o elemento Fe; C) mapa composicional realçando o elemento Al; D) mapa composicional realçando o elemento Ca; E) mapa composicional realçando o elemento Ti; F) mapa composicional realçando o elemento Mn.

- **Granada tipo (ii)**

No perfil composicional da granada (ii) (Fig. 6.9 A, B) observa-se que a variação dos óxidos MgO, Al₂O₃, SiO₂, CaO e MnO é praticamente nula. Por outro lado, a curva do FeO mostra um enriquecimento de FeO em direção ao núcleo, que varia de 45,69%, no spot 36, para 42,25% no spot 41. De forma oposta, o MnO aumenta sua concentração em direção à borda do cristal, que varia de 1,52% no spot 36 para 2,68% no spot 41, embora essa variação seja suave.

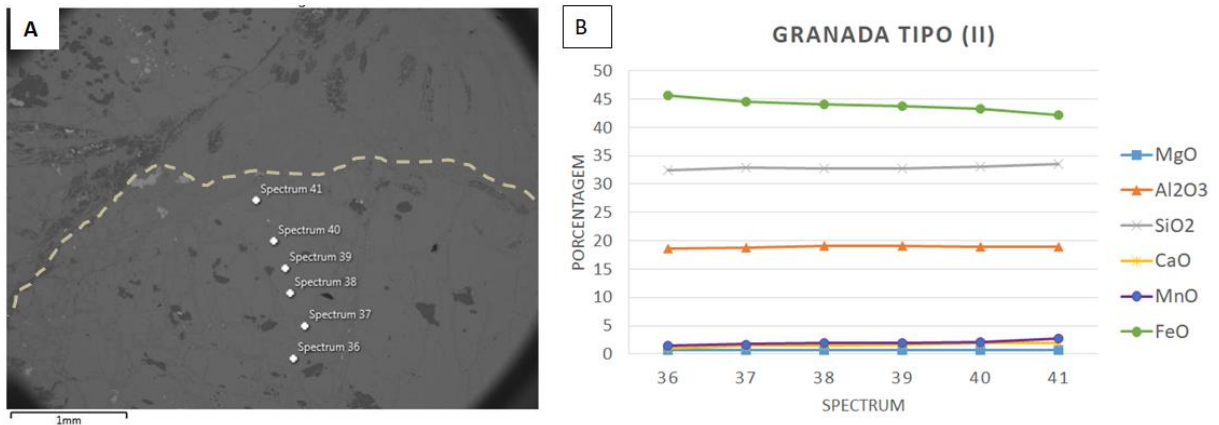


Figura 6.9 - Análises EDS acoplado a MEV da granada tipo (ii) : A) Imagem de elétrons retroespalhados dos cristal de granada (ii) com os spots do EDS. A borda do cristal de granada foi demarcada esquematicamente. B) Perfis elementares dos spots de EDS cortando o cristal de granada (ii) até o centro.

- **Granada tipo (iii)**

Através do resultado do mapeamento composicional da amostra de granada (iii) (Fig. 6.10 A, B) observa-se que praticamente não há variação nas linhas dos elementos MnO, MgO, Al₂O₃ e CaO. No entanto, pontualmente observa-se uma leve variação no FeO e no SiO₂. O FeO apresenta uma diminuição no spot 8, apresentando valor de 41,85%. Nos spots 12 e 14 o FeO tem um leve aumento em comparação com os outros pontos analisados, apresentando valores de 43,61% e 44,13%, respectivamente. O SiO₂ apresenta variação notável no spot 8, onde seu valor aumenta para 34,22%.

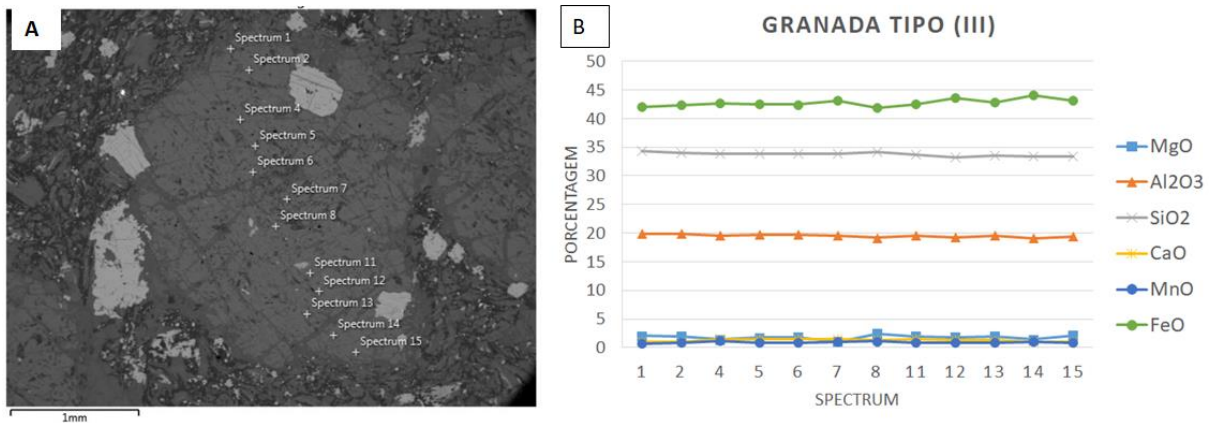


Figura 6.10- Perfis composicionais de granada do tipo (iii) obtidos através de MEV-EDS; A) Imagem de elétrons retroespalhados com spots. B) Perfil com os óxidos analisados.

O mapa composicional do Fe (Fig. 6.11B) exibe distribuição homogênea deste elemento no cristal de granada do tipo (iii), exibindo concentração maior apenas em alguns minerais que ocorrem como inclusão e em outros distribuídos ao redor do cristal.

O mapa de Al (Fig. 6.11C) também mostra uma distribuição homogênea deste elemento no cristal de granada do tipo (iii).

Os mapas dos elementos Mg e K (Fig. 6.11D e E) exibem elevadas concentrações destes elementos nas fraturas, em alguns minerais presentes na borda do cristal e na matriz, condizendo com a mineralogia rica em biotita e clorita observada por microscopia ótica. O teor de Ca (Fig. 6.11F) não foi representativo na granada (iii) nem nas suas inclusões e fraturas.

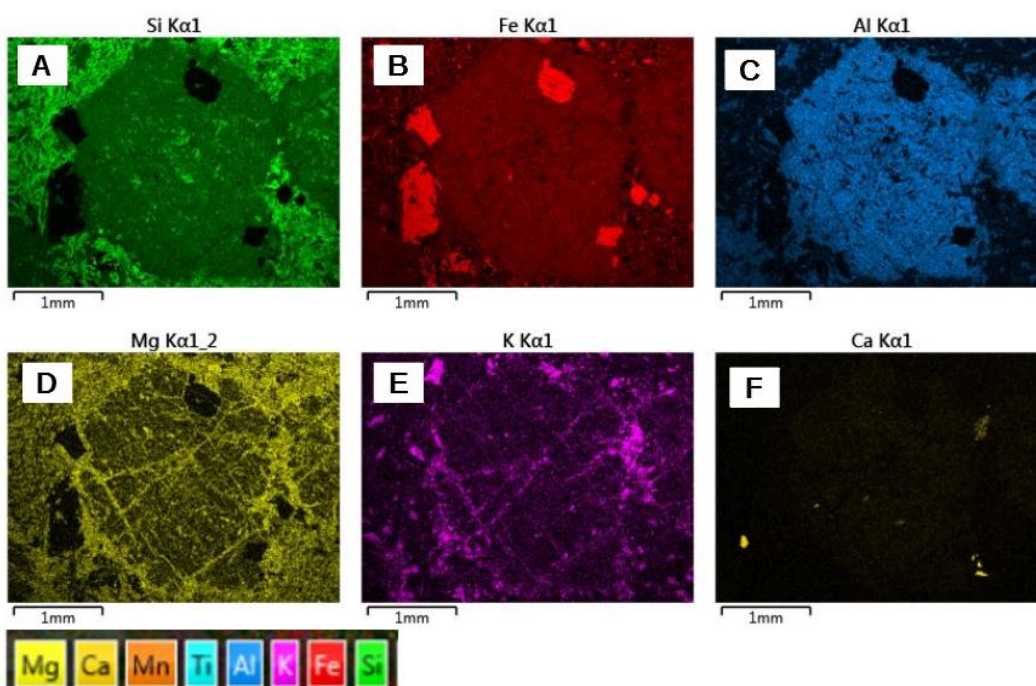


Figura 6.11 - Mapas composicionais obtidos com uso de MEV de granada do tipo (iii) no depósito Salobo. A) Mapa composicional realçando o elemento Si; B) Mapa composicional realçando o elemento Fe; C) Mapa composicional realçando o elemento Al; D) Mapa composicional realçando o elemento Mg; E) Mapa composicional realçando o elemento K; F) Mapa composicional realçando o elemento Ca.

O diagrama triangular AFM de Irvine & Baragar (1971) (Figura 6.12A, B e C) mostra que, independentemente do tipo textural de granada, os cristais plotam em um campo similar. Nota-se que a presença de magnésio nos cristais de granada é baixa, enquanto o ferro predomina em sua estrutura.

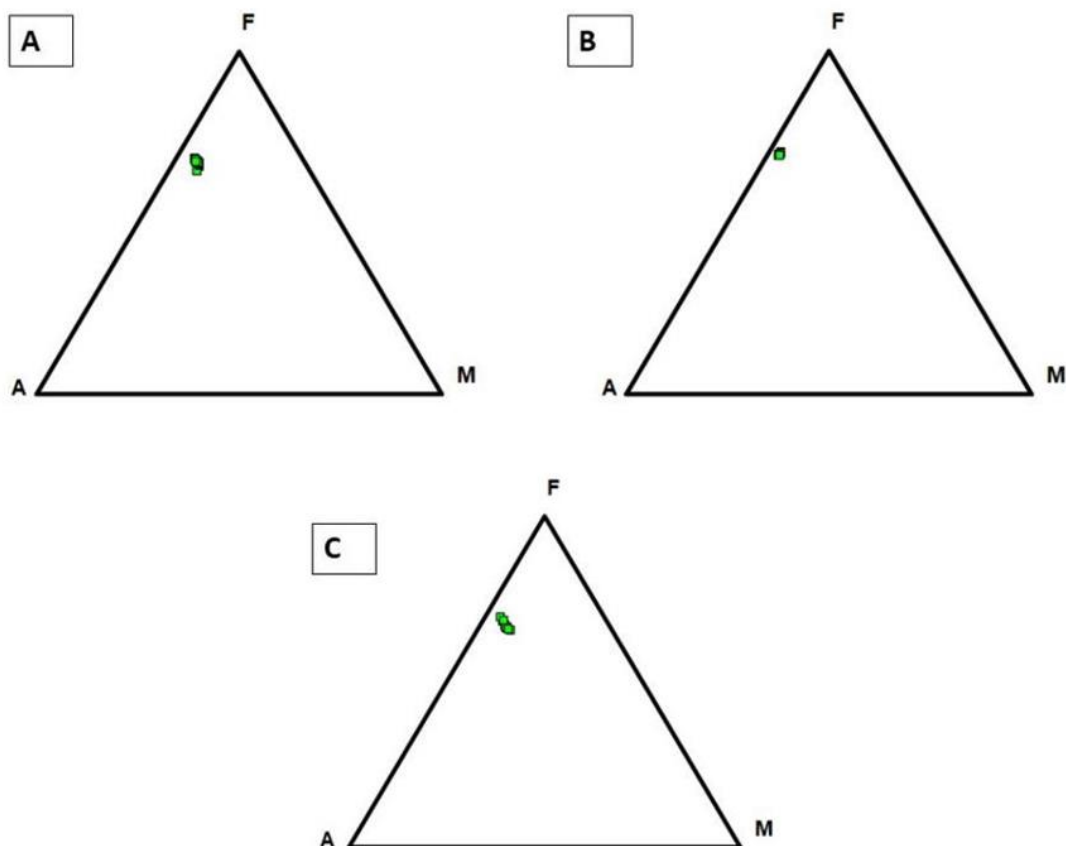


Figura 6.12 - Diagrama triangular AFM, segundo Irvine & Baragar (1971), das granadas (i), (ii) e (iii) respectivamente em A), B), C).

6.2 DEPÓSITO GROTA FUNDA

6.2.1 Caracterização petrográfica da granada

O depósito Grota Funda está inserido em seqüências vulcano-sedimentares pertencentes ao Grupo Igarapé-Pojuca, com ocorrência de basalto, diabásio, gabro e dacito subordinado, além de formações ferríferas bandadas (Hunger *et al.* 2019). As amostras apresentadas neste trabalho

compreendem rochas hidrotermalizadas com paragêneses hidrotermais de halos de alteração férrica (almandina-grunerita-magnetita) e potássica (biotita) (Hunger *et al.* 2019).

As amostras coletadas para este estudo representam, em geral, zonas que envelopam os corpos mineralizados. Desta forma, observam-se cristais de granada dispersos em matriz fina que pode variar entre biotita, grunerita e clorita.

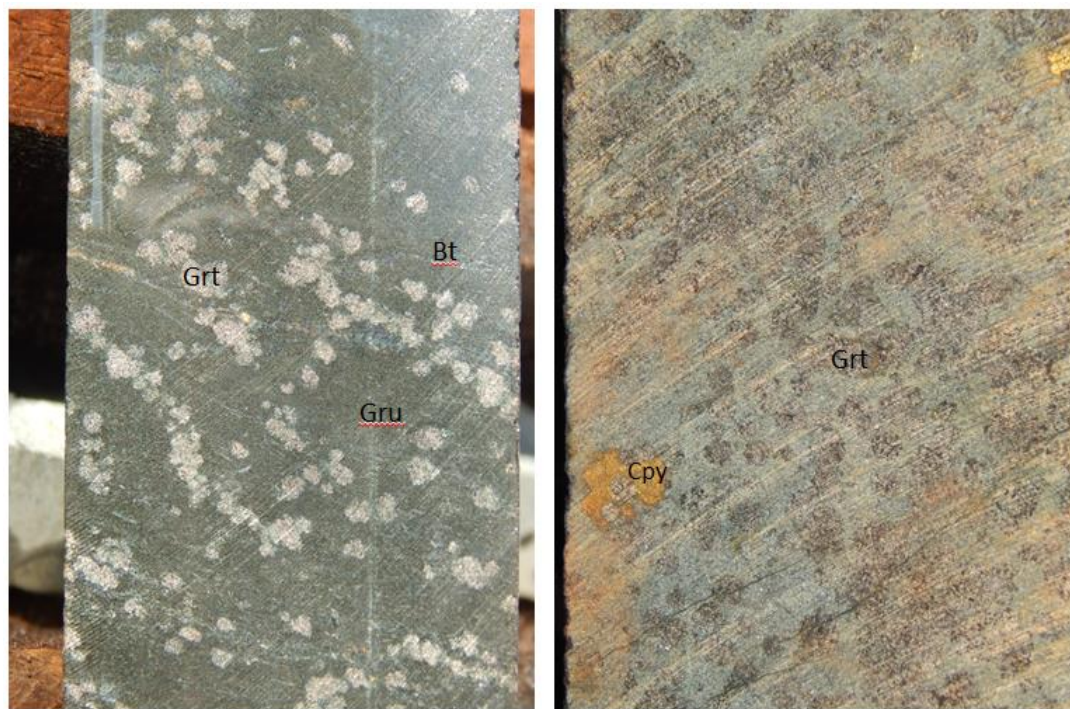


Figura 6.13 – Aspectos macroscópicos das rochas hidrotermalizadas portadoras de granada no depósito Grotta Funda; A) Zonas de alteração férrica-potássica com matriz dada por grunerita e biotita com porfiroblastos de granada. B) Zona intensamente cloritizada com cristais reliquiares de granada. Abreviações: Grt = granada, Gru = grunerita, Bt = biotita e Cpy = calcopirita.

Essas rochas mostram, em geral, textura decussada (Fig. 6.14A), matriz inequigranular seriada, com granulação fina a média, com pórfiros de granada cujo tamanho varia entre 0,5 a 5,5mm (Fig. 6.14B). A mineralogia observada na matriz rocha contempla ainda grunerita, quartzo, biotita, calcopirita e magnetita.

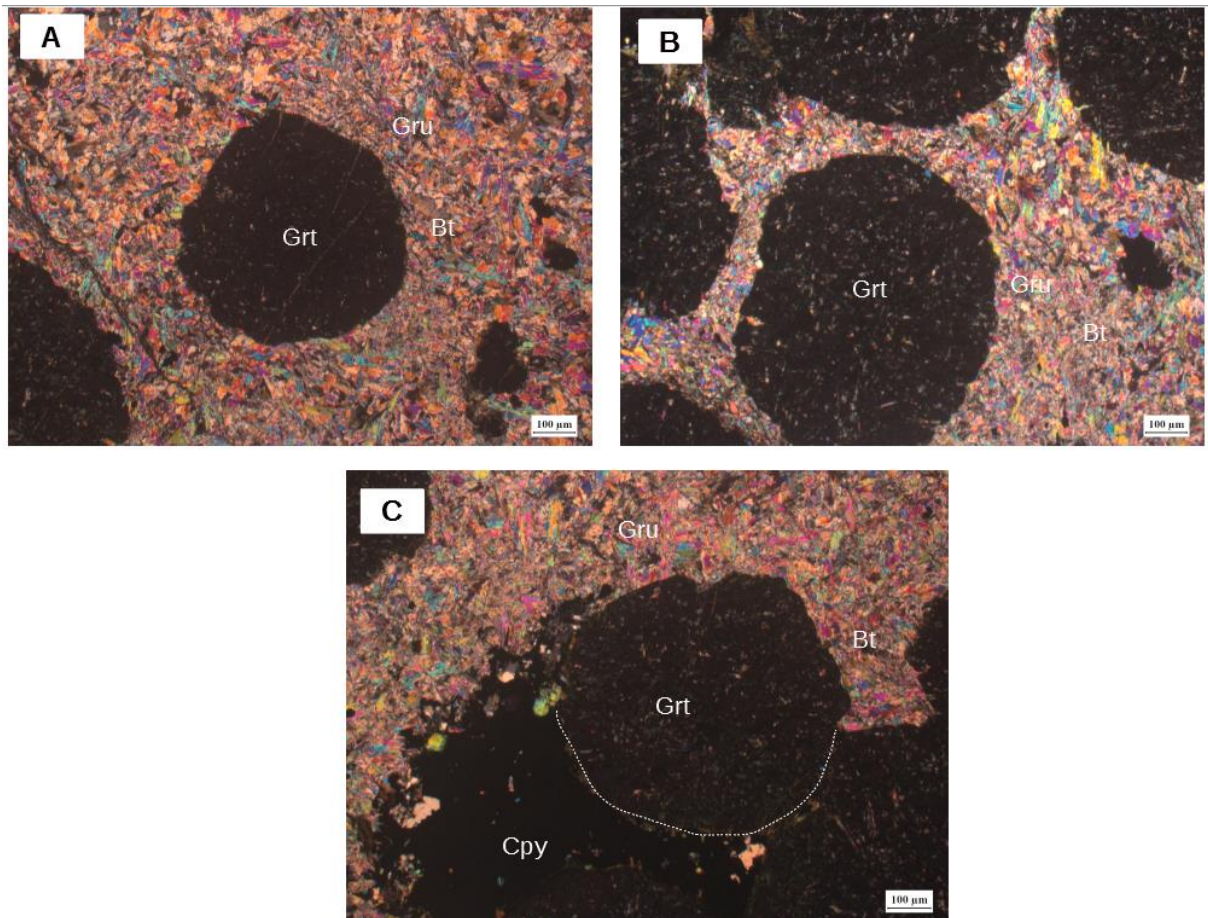


Figura 6.14 - Aspectos gerais da lâmina do depósito Grota Funda. (A) Cristal de granada em matriz decussada rica em grunerita e biotita. (B) Cristais de granada constituindo a maior parte da imagem e matriz decussada. (C) Cristal de granada com borda marcada por curva pontilhada, parte está em matriz rica em grunerita e biotita e parte em matriz de calcopirita. Abreviações: Grt = granada, Bt = biotita e Gru = grunerita.

Os cristais de granada ocorrem dispersos na matriz da rocha. Zonas com foliação e cristais deformados são raros. Os cristais de granada são subédricos e poiquiloblásticos, esféricos, incolores e geralmente envoltos por grunerita. Alguns cristais de granada ocorrem parcial ou totalmente inclusos em calcopirita (Fig. 6.14C, 6.15A) e, nestes casos, é observada fina borda de biotita (Fig. 6.15B). Apresentam baixo número de fraturas que, quando presentes, ocorrem preenchidas por biotita. São observáveis também inclusões de quartzo, grunerita, biotita e magnetita.

As texturas e formas de ocorrência dos cristais de granada do depósito Grota Funda sugerem que não há grandes diferenças apontando para distintos tipos texturais de granada.

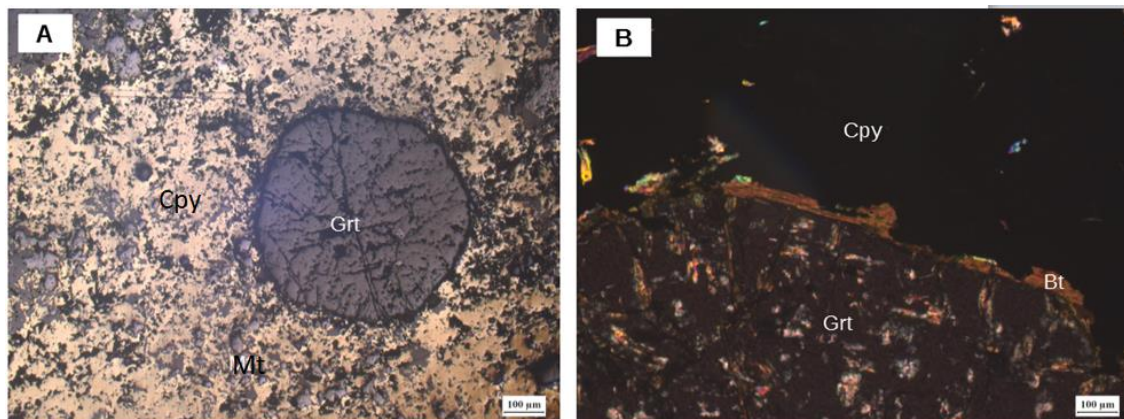


Figura 6.15 - Aspectos da granada inclusa em calcopirita; (A) Cristal arredondado de granada imerso em matriz de calcopirita e magnetita. (B) Borda de biotita na granada inclusa em calcopirita. Abreviações: Grt = granada, Mt = magnetita, Cpy = calcopirita e Bt = biotita.

6.2.2 Variação composicional da granada por microscopia eletrônica de varredura

Foram selecionados cristais de granada, presentes em lâminas de rocha do depósito Grotta Funda, para as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) tanto envoltos por calcopirita, quanto imersos em matriz com predominância de grunerita. A partir das análises por MEV-EDS foi possível a confecção de perfis pontuais de borda até o núcleo dos cristais e a elaboração de mapas composicionais dos principais elementos maiores da granada.

Diferente da granada do depósito Salobo, a granada do depósito Grotta Funda se mostrou homogênea na descrição petrográfica, não apresentando características que a separe em tipos distintos, mesmo quando ocorrendo em matrizes muito diferentes, como será mostrado a seguir.

Através do perfil composicional do cristal envolto em calcopirita observa-se pequenas variações nos óxidos FeO, SiO₂, Al₂O₃, MnO e MgO (Fig. 6.16B). Os dados de composição química da granada do depósito Grotta Funda podem ser consultados no Apêndice B. O spot 14, situado na borda do cristal de granada, é o que apresenta maior variação nos óxidos analisados, apresentando concentração elevada de FeO, que apresenta valor 41,44% neste spot, sendo que nos demais a concentração deste óxido é de aproximadamente 37%, e de MgO que apresenta valor 5,65% neste spot e ocorre nos demais spots como valor de aproximadamente 1%. Já os outros óxidos citados apresentam uma diminuição em seus valores neste spot quando comparados com os valores dos mesmos nos demais spots da granada do Grotta Funda, com SiO₂ variando de aproximadamente 35% para 31,68%, Al₂O₃ variando de aproximadamente 19% para 15,24% e MnO variando de aproximadamente 3,16% para 0,28%. Nos outros spots as variações observadas nos óxidos são muito sutis.

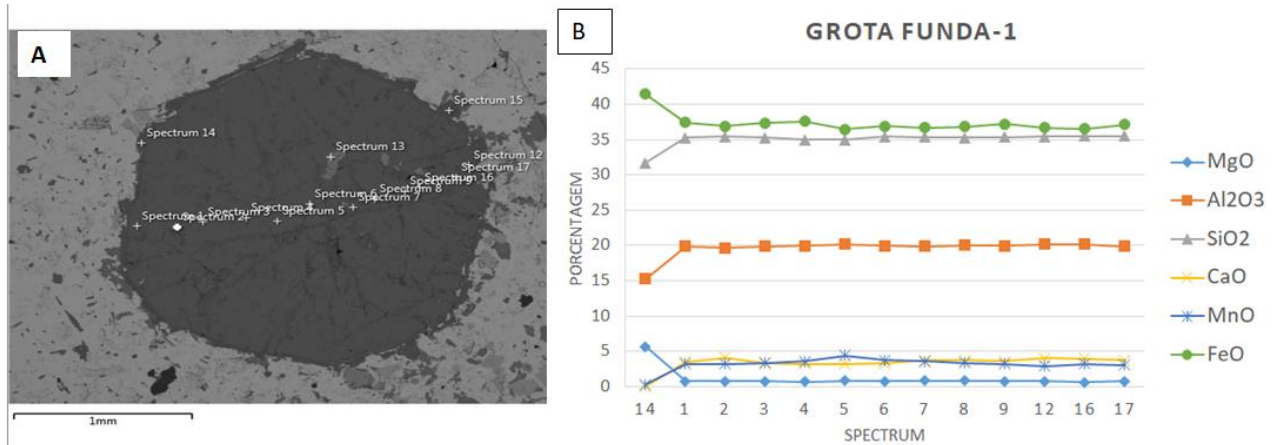


Figura 6.16 - Análises de MEV-EDS da granada do depósito Grota Funda, cristal envolto por calcopirita; A) Imagem de elétrons retroespalhados dos cristal de granada com os spots do EDS; B) Perfis elementares dos spots de EDS cortando o cristal de granada de uma borda a outra.

Este cristal exibe textura porfiroblástica, e se encontra envolto por uma massa de calcopirita, o que é bem destacado pelos mapas de S, Fe e Cu (Fig. 6.17A, B, E). As análises de EDS mostram que não há variação composicional entre núcleo e borda neste cristal (Fig. 6.17A).

Observa-se um aumento na quantidade de K especialmente relacionado às fraturas da granada e nos minerais que a bordejam, o que condiz com o observado no microscópio óptico, onde biotita foi identificada (Fig. 6.17G). Através dos mapas de Ca e Ti é possível observar que estes elementos são expressivos em diferentes minerais que ocorrem como inclusões da granada (Fig. 6.17F e H).

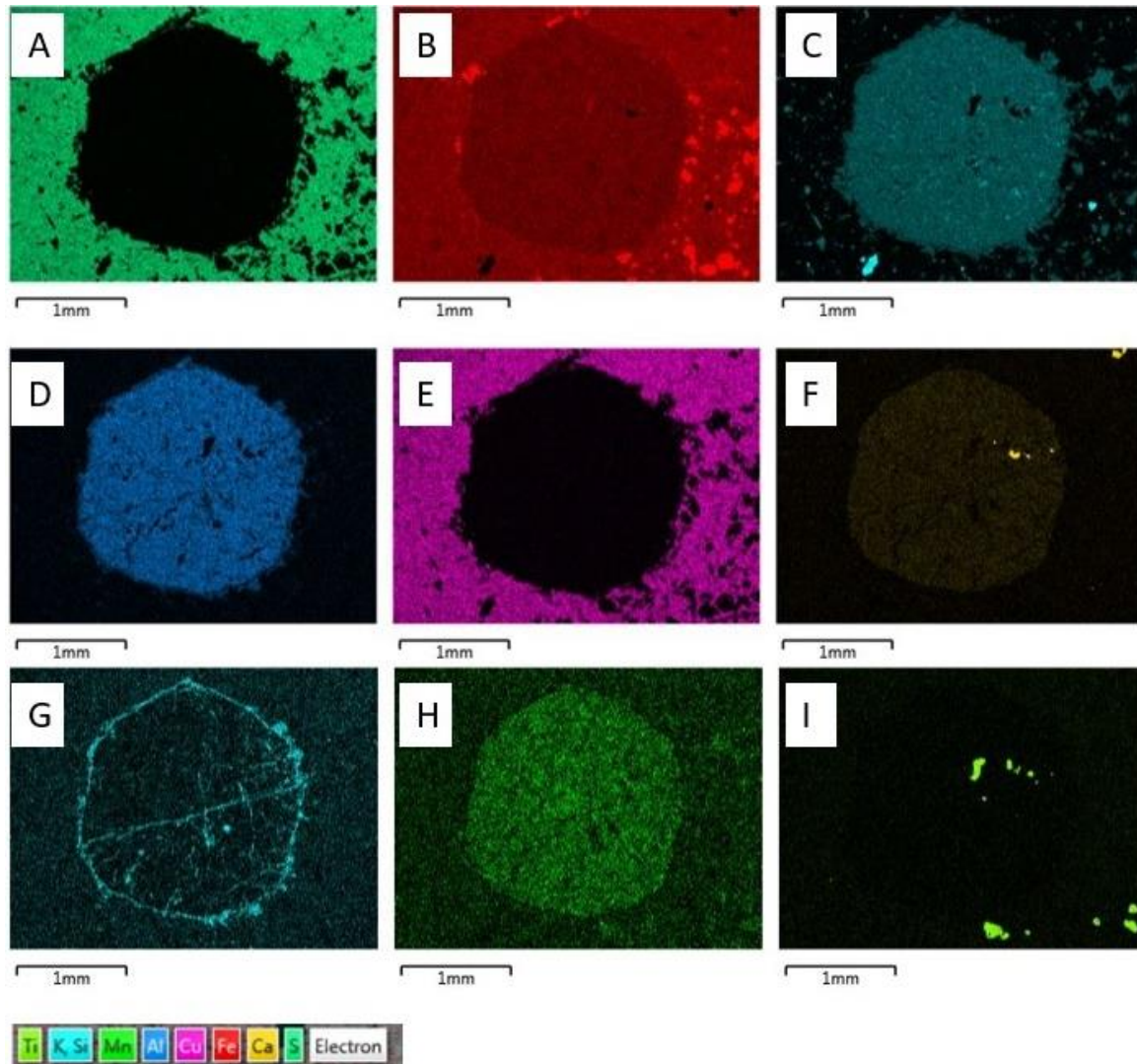


Figura 6.17 – Mapas composicionais de cristal de granada do depósito Grota Funda envolto por calcopirita: A) mapa composicional realçando o elemento S; B) mapa composicional realçando o elemento Fe; C) mapa composicional realçando os elementos Si; D) mapa composicional realçando o elemento Al; E) mapa composicional realçando o elemento Cu; F) mapa composicional realçando o elemento Ca; G) mapa composicional realçando o elemento K e H) mapa composicional realçando o elemento Mn e I) mapa composicional realçando o elemento Ti.

Neste depósito também é comum a granada ocorrer imersa em uma matriz rica em grunerita (Fig. 6.18A), com características texturais praticamente idênticas às dos cristais envoltos por calcopirita.

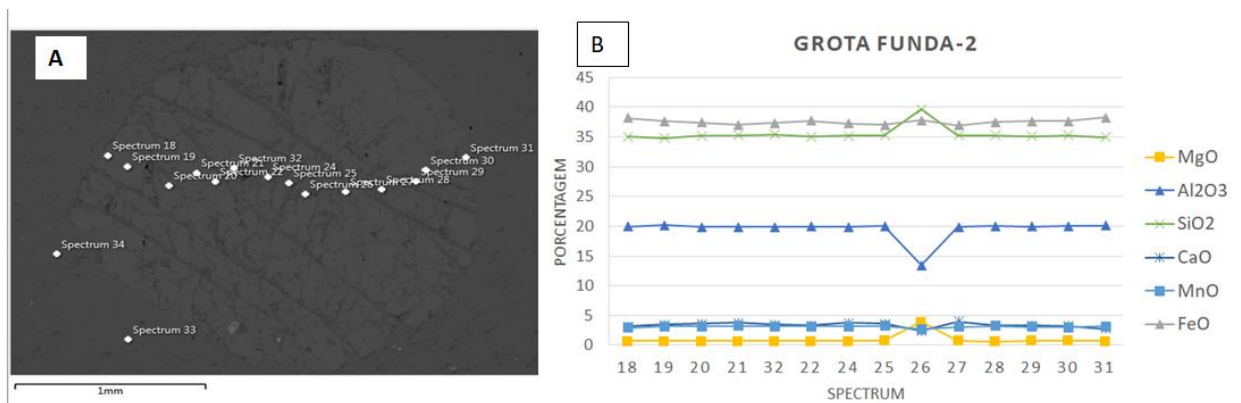


Figura 6.18 – Análises EDS acoplado a MEV da granada imersa em matriz rica em grunerita; A) Imagem de elétrons retroespalhados dos cristal de granada com os spots do EDS; B) Perfis elementares dos spots de EDS cortando o cristal de granada de uma borda a outra;

No perfil composicional da granada inclusa em matriz rica em grunerita (Fig. 6.18A, B) observa-se, de forma pontual, variação na concentração dos óxidos SiO₂, Al₂O₃, MnO e MgO na porção central do cristal. A curva do SiO₂ apresenta um pico no spot 26 com valor 39,65%. Por outro lado, no mesmo spot o valor do Al₂O₃ sofre um declínio, apresentando valor de 13,46% e o MgO aumenta a concentração para 3,96%. O MnO tem um declínio suave no spot 26, apresentando valor de 2,75%. Praticamente não há variação nos outros pontos analisados.

Analisando o mapa composicional deste cristal, nota-se que a granada é homogênea. De forma geral, as grandes diferenças ocorrem entre o cristal e a matriz, como no caso do Ca da granada que é maior que o Ca da mineralogia que a envolve (Fig. 6.19B). Os elementos Al e Mn ocorrem de forma homogênea no cristal (Fig. 6.19C, F). Os elementos Mg e K ocorrem de forma expressiva no mineral que preenche as fraturas, típico da biotita identificada também por microscópio ótico (Fig. 6.19D, E). Pode-se observar conteúdo expressivo de Mg e Si na matriz, quando comparada ao cristal de granada (Fig. 6.19C e F).

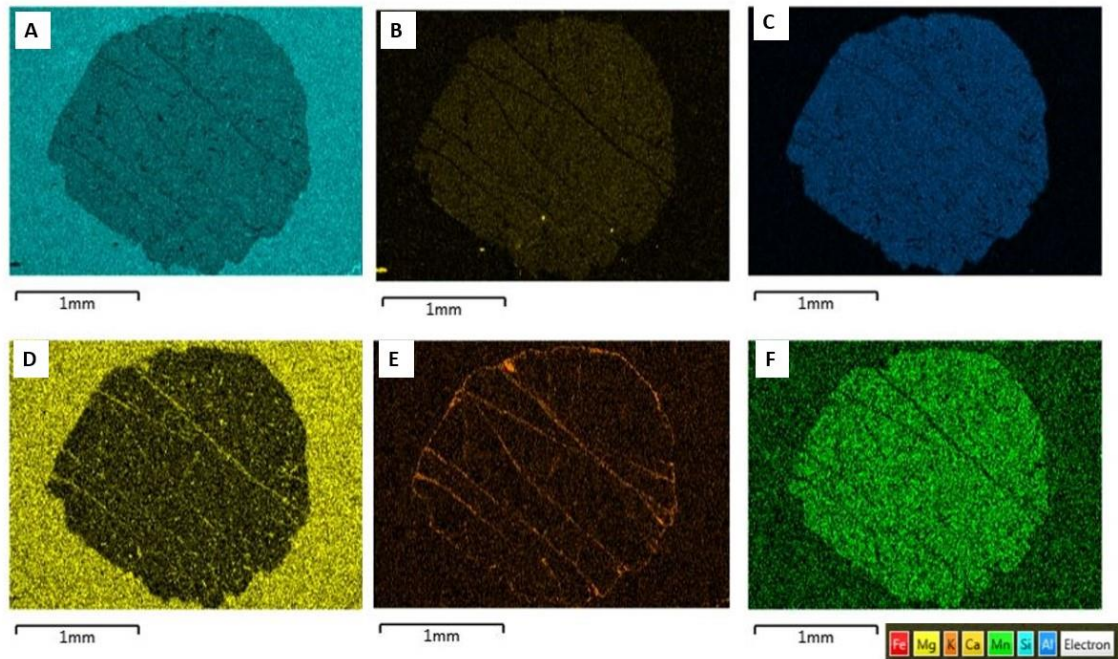


Figura 6.19 - A) mapa composicional realçando o elemento Si; B) mapa composicional realçando o elemento Ca; C) mapa composicional realçando o elemento Al; D) mapa composicional realçando o elemento Mg; E) mapa composicional realçando o elemento K; F) mapa composicional realçando o elemento Mn;

O diagrama triangular AFM de Irvine & Baragar (1971) (Figura 6.20) mostra que há pouca variação composicional dos cristais. Em termos gerais, a granada no depósito Grota Funda é férrica, embora, ainda que sutis, variações para granada magnesiânica também sejam observadas (Apêndice B).

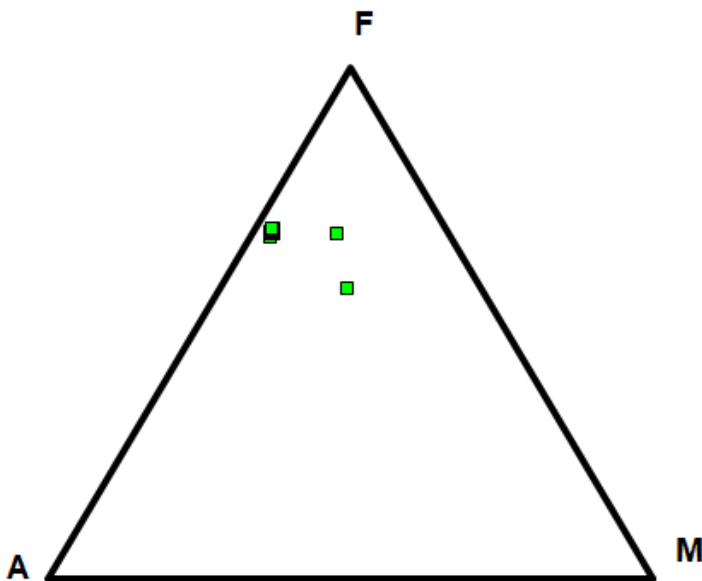


Figura 6.20 - Diagrama triangular AFM segundo Irvine & Baragar (1971) com dados da granada do depósito Grota Funda.

7.1 COMPARAÇÃO DA GEOLOGIA DOS DEPÓSITOS

Os dois depósitos selecionados para esse estudo compreendem importantes alvos cupríferos no Cinturão Norte do Cobre na Província Carajás e apresentam rochas hospedeiras muito distintas, caracterizando contextos geológicos diferentes. Enquanto o depósito Salobo é um dos principais depósitos IOCG do mundo e a principal mina de cobre do Brasil, o depósito Grota Funda representa um prospecto cuprífero em avaliação pela empresa Vale S.A.

O depósito Salobo é hospedado principalmente por rochas granitoides e gnaisses meso e neoarqueanos (Réquia *et al.* 2003; Melo *et al.* 2016). Por outro lado, o depósito Grota Funda é hospedado por sequências de rochas preservadas de metamorfismo, que incluem basaltos, gabros e BIFs (Hunger *et al.* 2019). Em ambos depósitos essas rochas exibem forte deformação dúctil com o desenvolvimento de extensas zonas miloníticas. Essa deformação parece ser acompanhada de intenso processo de alteração hidrotermal de alta temperatura.

Apesar do contexto geológico em termos de rochas hospedeiras completamente distintas, os dois depósitos mostram evolução paragenética do sistema hidrotermal muito similar. No depósito Salobo os estágios de alteração hidrotermal incluem: i) alteração cálcico-sódica caracterizada por hastingsita e uma assembleia de actinolita \pm escapolita marialítica \pm titanita \pm calcopirita \pm allanita \pm dravita; ii) silicificação associada a múltiplas gerações de quartzo hidrotermal; iii) enriquecimento férrico pronunciado (grunerita-almandina-faiálita-magnetita) e alteração potássica com biotita acompanhada pela formação de magnetita e que parece ser coeva a precipitação do minério (Melo *et al.* 2016).

Já a evolução hidrotermal no depósito Grota Funda inclui estágios de: 1) alteração sódico-cálcica representada por dois conjuntos diferentes, o primeiro caracterizado por fraturas de albita \pm quartzo que cortam a rocha dacítica e o segundo caracterizado por hastingsita + escapolita que sobrepõe zonas com albita hidrotermal; (2) metassomatismo férrico marca principalmente a zona central do depósito Grota Funda, sendo representado por precipitação maciça de magnetita (I) – grunerita-almandina \pm clorita (I) –quartzo, tendo a magnetita como fase mineral mais importante associada a este estágio e com o teor de almandina aumentando em direção às zonas ricas em ferro; 3) alteração potássica com biotita que afeta todos os tipos de rocha; 4) mineralização sulfetada principal representado por brechas que ocorrem na forma de veios ou disseminado; 5) cloritização, mais identificada em áreas distais da zona central do depósito e que consiste em domínios onde biotita e

anfíbólio são convertidos em clorita rica em Fe (chamosita) e 5) veios de quartzo carbonático tardios, marcando o último estágio (Hunger *et al.* 2019).

Idades relativas ao processo hidrotermal e mineralização foram obtidas em ca. 2,55 Ga para ambos depósitos (Réquia *et al.* 2003, Hunger *et al.* 2019). Em conjunto, os dados de evolução do sistema hidrotermal aliados às idades de mineralização, sugerem que processos mineralizantes atuaram de forma sincrônica em ambos depósitos. Isso pode evidenciar que processos em escala regional que, no entanto, atuam de forma diferente em escala de depósito e formaram depósitos minerais com grandes diferenças em teor e tonelagem.

7.2 CARACTERÍSTICAS DOS CRISTAIS DE GRANADA NOS DEPÓSITOS SALOBO E GROTA FUNDA E IMPLICAÇÕES PARA A REGIÃO

Este estudo permitiu a identificação e caracterização de três tipos texturais de granada no Depósito Salobo de acordo com a forma de ocorrência. A granada do tipo (i) ocorre de forma idioblástica e sem relação com a foliação, enquanto a granada do tipo (ii) ocorre estirada, com presença de sombra de pressão e contornada pela foliação da rocha, sugerindo ser proveniente de zonas deformadas e a granada do tipo (iii) ocorre de forma fraturada e, por vezes, alterada por clorita e biotita, sugerindo advir de regiões de maior alteração, talvez onde houve maior percolação de fluido hidrotermal.

As inclusões observadas nas granadas dos tipos (i) e (ii) foram as mesmas, além disso é observada semelhança na mineralogia que bordejia a granada desses tipos, sendo encontrado grunerita, biotita e quartzo. Já na granada do tipo (iii) foram identificadas, com uso do MEV, inclusões de ilmenita, monazita e magnetita e comumente biotita e clorita preenchendo as fraturas e no entorno dos cristais.

Em contrapartida, as análises composicionais por MEV-EDS não apresentaram diferenças significativas entre cada tipo textural. Essas análises mostraram que não há variação composicional entre núcleo e borda em nenhum dos três tipos de granada do depósito Salobo, evidenciando que a granada é homogênea. Pequenas variações de SiO₂, FeO e Al₂O₃ foram observadas, porém de forma muito pontual e não sistemática entre os cristais. Apesar de não ter sido possível a obtenção do mapa composicional da granada da geração (ii), com base no perfil composicional sugere-se que também não haja variação composicional entre núcleo e borda nesta granada. Quando verificada alguma variação composicional, esta está relacionada às inclusões minerais e não à composição dos cristais de granada. A presença de bornita como inclusão na granada do depósito Salobo mostra que a precipitação inicial de sulfetos pode ter precedido a formação da granada.

Desta forma, o modo de ocorrência, as inclusões e as associações minerais parecem mostrar que as granadas (i) e (ii) são os mesmos tipos em porções com intensidade de deformação distintas nas rochas ricas em granada-grunerita-biotita no depósito Salobo. A granada (iii), apesar de mais fraturada e alterada pode apenas representar uma zona de deformação heterogênea mais alterada por alteração tardia (ex. cloritização, Melo *et al.* 2016), representada pelos minerais biotita e clorita.

Diferente da granada do depósito Salobo, no Grota Funda a granada foi considerada como pertencente a um único tipo textural, que ocorre de forma idioblástica, com alteração nas bordas quando inclusa em calcopirita, exibindo leve faturamento e sem zoneamento composicional.

Foram identificados, com uso do MEV-EDS, os minerais grunerita, biotita, calcopirita e quartzo bordejando os cristais de granada do depósito Grota Funda. Contudo, a calcopirita também foi descrita como mineral em que a granada se encontra inclusa, o que pode ser observado nos mapas de S (Fig. 6.17A e 6.19C), Cu (Fig. 6.17E e 6.19D) do Depósito Grota Funda. Isso parece evidenciar que a formação de granada antecedeu a precipitação de calcopirita.

De acordo com as análises pôde-se observar que os cristais são homogêneos, não apresentando variação composicional entre núcleo e borda. Variação pontual de SiO₂, Al₂O₃, MnO e MgO foi observada (Fig. 6.15A, B, 6.17A e B), ocorrendo de forma não representativa nos cristais. Mapas de K, Fe e Mg evidenciam a presença de biotita nas fraturas e bordejando cristais (Fig.6.16G, B, Fig. 6.18E e D).

Através dos diagramas triangulares Alm-Sps-Pyr (almandina-espessartita-piropo) para os depósitos Salobo (Fig. 7.1A) e Grota Funda (Fig. 7.1B) tem-se que a granada de ambos os depósitos têm composição semelhante, apresentando elevado teor de almandina e baixo teor de espessartita e piropo. De forma muito similar, dados de química mineral por microsonda eletrônica em granada do depósito Furnas também evidenciam composição essencialmente almandina (Jesus 2016), o que também pode ser o caso da granada reportada por Toledo *et al.* (2019) no depósito GT-46. No caso dos depósitos Salobo e Grota Funda, há uma relação textural-espacial com a presença de sulfetos (ex. bornita, calcocita e calcopirita) e magnetita que permite concluir que a formação de granada pode ter ocorrido de forma anterior à mineralização. Possíveis evidências de núcleos mais antigos não foram encontradas.

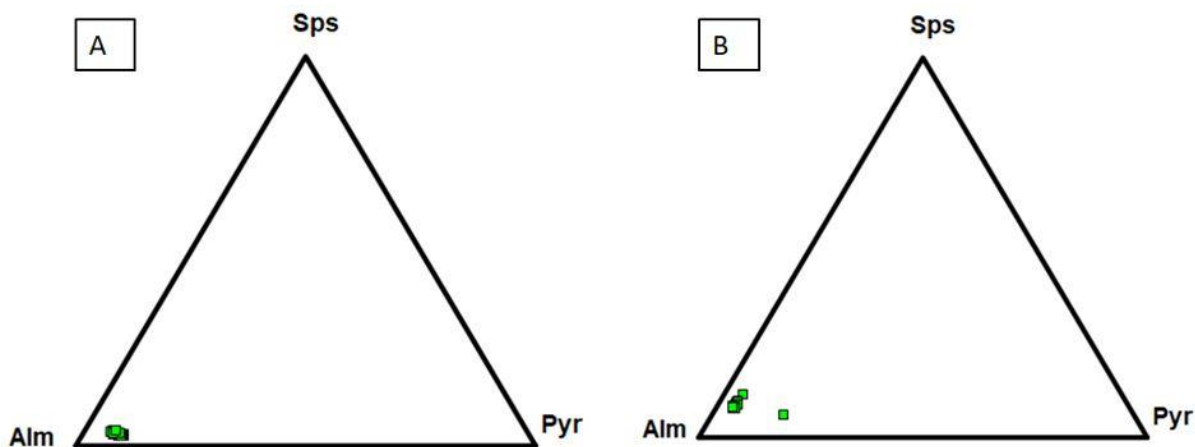


Figura 7.1 – Diagramas ternários composicionais de granada; A) Representação da granada do depósito Salobo. B) Representação da granada do depósito Grotta Funda. Siglas: Alm = almandina, Sps = espessartita e Pyp = piropo.

7.3 GRANADA NOS DEPÓSITO SALOBO E GROTA FUNDA: PROCESSOS HIDROTERMAIS OU METAMÓRFICOS?

A presença de granada nos depósitos IOCG da porção norte do Domínio Carajás vem sendo motivo de intenso debate. No depósito Salobo, os cristais de granada têm sido considerados como de origem exclusivamente hidrotermal a partir de um metassomatismo rico em ferro (Réquia *et al.* 2003, Melo *et al.* 2016). Por outro lado, estudos recentes apontam que essas paragêneses com granada podem ser resultadas de processos metamórficos (Prado 2019, Toledo *et al.* 2019).

Os resultados obtidos neste estudo nos depósitos Salobo e Grotta Funda mostram que as os cristais de granada são homogêneos e possivelmente formados em um único evento. O equilíbrio de P-T entre granada e o meio em que se formou (ex. fluidos hidrotermais) podem resultar em cristais homogêneos (Rotzler *et al.* 2008). Adicionalmente, processos induzidos por fluidos hidrotermais e intensa interação fluido-rocha (hospedeira) podem também explicar a cristalização da granada. Neste caso, ambos dissolução-reprecipitação ou completa substituição de minerais das rochas hospedeiras durante eventos hidrotermais efêmeros podem formar os cristais de granada em ambos depósitos (Nishimoto & Hoshida 2010, Ruiz-Agudo *et al.* 2014)

Desta forma, a (i) homogeneidade dos cristais de granada, a (ii) ausência de zoneamento entre núcleo e borda e (iii) de variações composicionais significativas pode mostrar que a formação dessa granada foi por hidrotermalismo e não metamorfismo regional. Ademais, Melo *et al.* (2019b) obtiveram temperaturas de formação da granada em torno de $565^{\circ} \pm 50^{\circ}\text{C}$ e sugeriram que fluidos de

alta temperatura possivelmente associado à colocação de corpos graníticos deram origem à essas paragêneses. No entanto, a transição do Domínio Carajás para o Domínio Bacajá ainda guarda muitas questões a serem respondidas, como um possível evento metamórfico regional resultante da colisão destes Domínios cuja existência não pode ser completamente descartada.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÃO

Os depósitos Salobo e Grota funda, embora parte de um mesmo sistema mineral, possuem características distintas em relação ao seu contexto geológico. Isso permitiu fazer uma abordagem detalhada sobre a granada nesses depósitos e interpretações a respeito de sua formação. Assim, os estudos petrográficos detalhados aliados à Microscopia Eletrônica de Varredura permitiram concluir que:

- 1) A partir de análises texturais microscópicas e do modo de ocorrência, a granada do depósito Salobo foi individualizada em três tipos distintos: (i) granada idioblástica e sem sombra de pressão, (ii) granada levemente estirada com sombra de pressão e (iii) granada extremamente fraturada, alterada e cortada por vênulas de clorita, que são as mesmas gerações em porções com intensidade de deformação distintas nas rochas ricas em granada-grunerita-biotita. Já a granada do depósito Grota Funda foi considerada como pertencente a um único tipo textural, que ocorre de forma idioblástica, exibe leve fraturamento e apresenta alteração nas bordas quando inclusa em calcopirita.
- 2) Diagramas triangulares Alm-Sps-Pyr (almandina-essartita-piropo) mostraram que a granada de ambos os depósitos apresenta composição semelhante, apresentando elevado teor de almandina e baixo teor de essartita e piropo.
- 3) De acordo com as análises pôde-se observar que os cristais são homogêneos, não apresentando variação composicional entre núcleo e borda, o que pode ser devido à processos induzidos por fluidos hidrotermais, como um efeito hidrotermal sob mineral metamórfico ou uma precipitação metamórfica;
- 4) No entanto, devido à transição entre os domínios Carajás e Bacajá ainda ser pouco compreendida, havendo ainda muito debate sobre um possível evento metamórfico resultante da colisão destes Domínios, não se descarta a possibilidade de um metamorfismo regional neoarqueano ter ocorrido na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araujo O.J.B., Maia R.G.N., Jorge Joao X.S., Costa J.B.S. 1988. A megaestruturacao arqueana da Folha Serra dos Carajás. In: SBG, 7o Congresso Latino Americano de Geologia, Belem, PA. Anais, 324-333.
- Avelar, V. G., Lafon J.M., Correia, F. C. Jr, Macambira B.E.M, 1999, O magmatismo arqueano da região de Tucumã, Província Mineral de Carajás, Amazônia Oriental, Brasil: novos dados geocronológicos: *Revista Brasileira de Geociências*, **29**:453–460.
- Barros C.E.M., Macambira M.J.B., Barbey P., Scheller T. 2004. Dados isotópicos Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela, Província Mineral de Carajás, Brasil: implicações petrológicas e tectônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**:531–538
- Barros, C.E.M., Sardinha, A.S., Macambira, M.J.B., Barbey, P., and Boullier, A.-M., 2009, Structure, petrology, geochemistry, and zircon U/Pb and Pb/Pb geochronology of the synkinematic Archean (2.7 Ga) A-type granites from the Carajás metallogenic province, northern Brazil. *Canadian Mineralogist*, **47**:1423–1440.
- Cox D.P. & Singer D.A. 2007. Descriptive and Grade-Tonnage Models and Database for Iron Oxide Cu-Au Deposits. Open-File Report 2007-1155. USGS. 13p.
- Crowe, D. E., Riciputu, L.R., Bezenek, S., Ignatiev, A., 2001. Oxygen isotope and trace element zoning in hydrothermal garnets: Windows into large-scale fluid-flow behavior. *Geological Society of America*, **29**:479-482.
- Dall’Agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M., 2006, Archean and paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian craton: Symposium on magmatism, crustal evolution and metallogenesis of the Amazonian Craton, Belém, Excursion Guide, 99–150.
- Deer, W.A.; Howie, R.A.; Zussman, J. 1992. An Introduction to the rock-forming minerals. 2 ed. Longman House, England, 696p.
- Delinardo da Silva, M.A., 2014, Metatexitos e diatexitos do Complexo Xingú na região de Canaã dos Carajás: Implicações para a evolução mesoarqueana do Domínio Carajás: Unpublished M.Sc. thesis, Campinas, Brazil, Universidade de Campinas, 102p.
- DOCEGEO 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. 35o Congresso Brasileiro de Geologia, Belém, SBG, Proceedings, 11–54.
- Dreher A.M., Xavier R.P., Taylor B.E., Martini S. 2008. New geologic, fluid inclusion and stable isotope studies on the controversial Igarapé Bahia Cu-Au deposit, Carajás Province, Brazil. *Mineralium Deposita*, **43**:161-184.
- Dziggel, A. Wulff, K., Kolb, J., Meyer, F. M., Lahaye, Y., 2009. Significance of oscillatory and bell-shaped growth zoning in hydrothermal garnet: Evidence from Navachab gold deposit, Namibia. *Chemical Geology*, **262**:262- 276.
- Feio GRL 2011. Magmatismo Granitóide arqueano da área de Canaã dos Carajás: Implicações para a evolução crustal da Província Carajás. Tese de Doutorado, UFPA, Brasil. 205p.
- Feio, G.R.L., Dall’Agnol, R., Dantas, E.L., Macambira, M.J.B., Gomes, A.C.B., Sardinha, A.S., Oliveira, D.C., Santos, R.D., and Santos, P.A., 2012, Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoproterozoic Planalto granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites?: *Lithos*, **151**:57–73.
- Feio, G.R.L., Dall’Agnol R., Dantas E.L., Macambira M.J.B., Santos J.O.S., Althoff F.J., Soares J.E.B., 2013, Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil: *Precambrian Research*, **227**:157-.
- Galarza M.A., Macambira M.J.B. Moura C.A.V. 2003. Geocronologia Pb–Pb e Sm–Nd das rochas máficas do depósito Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás (PA). VII Simpósio de Geologia da Amazônia, SBG, [CD-ROM]

Gibbs, A.K., Wirth, K.R., Hirata, W.K., e Olszewski Jr., W.J., 1986, Age and composition of the Grão Pará Group volcanics, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, **16**: 201–211.

Grainger C.J, Groves DI, Tallarico F.H.B., Fletcher I.R., 2008, Metallogensis of the Carajás Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil: varying styles of Archean through Paleoproterozoic to Neoproterozoic base- and precious-metal mineralization: *Ore Geology Reviews*, **33**:451–489.

Groves, D.I., Bierlein, F.P., Meinert, L.D., and 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**: 641-654.

Hirata W.K., Rigon J.C., Kadekaru K., Cordeiro A.A.C., Meireles E.M. 1982. Geologia regional da Provincia Mineral de Carajas. In: SBG, 1o Simposio de Geologia da Amazonia, Belem, PA, Anais, **1**:100-109.

Hitzman M.W., Oreskes N., Einaudi M. 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron-oxide (Cu, U, Au, REE) deposits. *Precambrian Research*, **58**:241-287.

Hitzman M.W. 2000. Iron oxide-Cu-au deposits: what, where, when, and why. In: Porter T.M. (ed.) Hydrothermal iron oxide cooper-gold and related deposits: a global perspective. *Austral. Miner. Fund*, Adelaide, 9-25.

Holdsworth, R., and Pinheiro, R., 2000, The anatomy of shallow-crustal transpressional structures: Insights from the Archean Carajás fault zone, Amazon, Brazil: *Journal of Structural Geology*, **22**:1105–1123.

Huhn S.B. & Nascimento J.A.S. 1997. Sao os depósitos cupríferos de Carajas do tipo Cu-Au-UETR? In: Costa M.L. & Angelica R.S. (eds.) Contribuições à geologia da Amazônia. Belem. FINEP/SBG, 143-160.

Huhn S.R.B., Macambira M.J.B., Dall'Agnol R. 1999. Geologia e geocronologia Pb/Pb do granito alcalino Arqueano Planalto, Regiao da Serra do Rabo, Carajás - PA. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 6, Manaus, Resumos Expandidos, 463-466.

Hunger, R.B. 2017. O depósito de óxido de ferro cobre-ouro (IOCG) Grota Funda, Domínio Carajás (PA): alteração hidrotermal, regime de fluidos e idade da mineralização. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UNICAMP, 92p.

Hunger, R.B., Xavier, R.P., Moreto, C.P.N., Gao, J.F., 2018. Hydrothermal Alteration, Fluid Evolution, and Re-Os Geochronology of the Grota Funda Iron Oxide Copper-Gold Deposit, Carajás Province (Pará State), Brazil. *Society of Economic Geology*, **113**:1769-1793.

Hunger, R.B., Xavier, R.P., Moreto, C.P.N., Gao, J. 2019. Hydrothermal Alteration, Fluid Evolution, and Re-Os Geochronology of the Grota Funda Iron Oxide Copper-Gold (IOCG) Deposit, Carajás Province (Pará State), Brazil: *Economic Geology*, **113**(8):1769-1794.

Irvine, T. N., Baragar, W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **8**:523-548.

Jamtveit, B., 1991. Oscillatory zonation patterns in hydrothermal grossular-andradite garnet: Nonlinear dynamics in regions of immiscibility. *American Mineralogist*, **76**:1319-1327.

Jamtveit, B. Wogelius, R.A., Fraser, D.G.1993. Zonation patterns of skarn garnets: Records of hydrothermal system evolution. *Geology*, **21**:113-116.

Jamtveit, B., Ragnarsdottir, K.V., Wood, B.J., 1995. On the origin of zoned grossular-andradite garnets in hydrothermal systems. *Eur. J. Mineral*, **7**:1399-1410.

Jesus, S. dos S.G.P., 2016, Múltiplos Estágios De Alteração Hidrotermal do Depósito de Óxido de Ferro-Cobre-Ouro Furnas, Província Carajás: Evolução Paragenética e Química Mineral. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 164 p.

Lancaster Oliveira, J., Fanton, J., Almeida, A.J., Leveille, R.A., and Vieira, S. 2000, Discovery and geology of the Sossego copper-gold deposit, Carajás district, Pará State, Brazil [abs.]: International Geological Congress, 31st, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Geologia, Abstract volume (CDROM).

Liebau, F., Meagher, E.P., Speer, J.A., Brown Jr, G.E., 1982. Orthosilicates, Review in Mineralogy. *Mineralogical Society of America*, **5**:25-58.

- Lindenmayer, Z.G., Pimentel, M.M., Ronchi, L.H., Althoff, F.J., Laux, J.H., Araújo, J.C., Fleck, A., Bortowski, D.C., Nowatzki, A.C., 2001. Geologia do depósito de Cu-Au do Gameleira, Serra dos Carajás, Pará. In: Jost, H., Brod, J.A., Quieroz, E.T. (Eds.), *Caracterização de Depósitos Auríferos Brasileiros*, ADIMB-DNPM, Brasília, 79–139.
- Lindenmayer Z.G. 2003, Depósito de Cu–Au do Salobo, Serra dos Carajás: Uma revisão, in Ronchi L.H., Althoff F.J., eds, *Caracterização e modelamento de depósitos minerais*, São Leopoldo, Editora Unisinos, 69–98.
- Lindenmayer Z.G., Fleck A., Gomes C.H., Santos A.B.S., Caron R., Castro Paula F., Laux J.H., Pimentel M.M., Sardinha A.S. 2005. Caracterização geológica do Alvo Estrela (Cu-Au), Serra dos Carajás, Pará. In: Marini, O.J., Ramos B.W., Queiroz E.T.(Eds), *Caracterização de Depósitos Minerais de Distritos Mineiros da Amazônia*. DNPM, CT-Mineral/FINEP, ADIMB, Brasília, 137-205.
- LOBATO L.M., ROSIÈRE C.A., SILVA R.C.F., ZUCCHETTI M., BAARS F.J. SEDANE J.C.S., JAVIER RÍOS F., PIMENTEL M., MENDES G.E., MONTEIRO A.M. 2005. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás – controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In: Marini, O.J., Ramos B.W., Queiroz E.T.(Eds), *Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia*. DNPM, CT-Mineral/FINEP, ADIMB, Brasília, 21-92.
- Macambira E.M.B. & Vale A.G. 1997. São Félix do Xingu: folha SB.22-Y-B, Estado do Pará, escala 1:250.000. Texto Explicativo. Brasília, CPRM, Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. 344p.
- Macambira, J.B., 2003, O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. Tese de doutorado, IG-UNICAMP, 217p.
- Machado, N., Lindenmayer, D. and Lindenmayer, Z.G. - 1988 - U-Pb Geochronology of the Carajás Metallogenic Province, Pará, Brazil. Preliminary Results. *Geol. Assoc. Canada - Programs with Abstracts*.
- Machado N., Lindenmayer Z., Krogh T.E., Lindenmayer D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajas area, Amazon Shield, Brazil. *Precambrian Research*, **49**:329-354.
- Martin, A.J., Ballèvre, M., Boulvais, P., Halfpenny, A., Vanderhaeghe, O., Duchêne, S., Delloule, E., 2011. Garnet re-equilibration by coupled dissolution-precipitation: evidence from textural, major element and oxygen isotope zoning of ‘cloudy’ garnet. *Journal of Metamorphic Geology*, **29**:213-231.
- Meagher, R.P. 1980. Silicate Garnets. Reviews in *Mineralogy*, **5**:25-66.
- Meirelles M.R & Dardenne M.A. 1991. Vulcanismo basáltico de afinidade shoshonítica em ambiente de arco arqueano, Grupo Grão Pará, Serra dos Carajás, Pa. *Revista Brasileira de Geociências*, **21**:41-50.
- Melo G.H.C. 2014. Evolução temporal do depósito de óxido de ferro-cobre-ouro de Salobo, Província Mineral de Carajás; 2014. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, UNICAMP, 99p.
- Melo, G.H.C., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Moreto, C.P.N., Santiago, E.B.S., Dufrane, S.A., Aires, B., Santos, A.F.F., 2016, Temporal evolution of the giant Salobo IOCG deposit, Carajás Province (Brazil): constraints from paragenesis of hydrothermal alteration and UPb geochronology. *Mineralium Deposita* **52**: 709-732.
- Melo, G.H.C., 2018. Evolução temporal e fonte de fluidos dos depósitos IOCG Salobo e Igarapé Bahia, Província Carajás; 2018. Dissertação de Doutorado, Instituto de Geociências, UNICAMP, 219p.
- Melo, G.H.C., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Moreto, C.P.N., Arquaz, R.M., Silva, M.A.D., 2019a, Evolution of the Igarapé Bahia Cu-Au deposit, Carajás Province (Brazil): Early syngenetic chalcopyrite overprinted by IOCG mineralization. *Ore Geology Reviews*, **111**, 102993p.
- Melo, G.H.C., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Moreto, C.P.N., and Santiago, E., 2019b, Tracing Fluid Sources for the Salobo and Igarapé Bahia Deposits: Implications for the Genesis of the Iron Oxide Copper-Gold Deposits in the Carajás Province, Brazil: *Economic Geology*, **114** : 697–718.
- Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Hitzman M.W., Carvalho E.R., Johnson C.A., Souza Filho C.R., Torresi I. 2008. Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide copper gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints. *Mineralium Deposita*, **43**: 129-159.

Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Amaral W.S., Santos T.J.S., Juliani C., Souza Filho C.R. 2011. Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications. *Mineralium Deposita*, **46**:789-811.

Moreto, C.P.N., 2013. Geocronologia U-Pb e Re-Os aplicada à evolução metalogénica do Cinturão Sul do cobre da Província Mineral de Carajás: Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 216p.

Moreto, C.P.N., Monteiro, L.V.S., Xavier, R.P., Creaser R.A., Dufrane, S.A., Tassinari, C.C.G., Sato, K. Kemp, A.I.S., Amaral, W.S., 2015a. Neoproterozoic and Paleoproterozoic Iron Oxide-Copper-Gold Events at the Sossego Deposit, Carajás Province, Brazil: Re-Os and U-Pb Geochronological Evidence. *Economic Geology*, **110**:809-835.

Moreto C.P.N., Monteiro L.V.S., Xavier R.P., Creaser R.A., Dufrane S. A., Melo G.H.C., Delinardo da Silva M.A., Tassinari C.C.G., Sato K. 2015b. Timing of multiple hydrothermal events in the iron oxide-copper-gold deposits of the Southern Copper Belt, Carajás Province, Brazil. *Mineralium Deposita*. Online first: DOI 10.1007/s00126-014-0549-9

Nishimoto Shoji, Hidekazu Yoshida. 2010. Hydrothermal alteration of deep fractured granite: Effects of dissolution and precipitation. *Lithos*, **115** (1-4): 153 – 162.

Nogueira A.C.R., Truckenbrodt W., Pinheiro R.V.L. 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescritção e redefinição litoestratigráfica. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, **7**:177-277.

Pestilho, A.L.S., 2011. Sistemática de isótopos estáveis aplicada à caracterização da evolução dos paleo-sistemas hidrotermais associados aos depósitos cupríferos Alvo Bacaba e Alvo Castanha, Província Mineral de Carajás, PA: Unpublished MSc. Dissertation, Campinas, University of Campinas.

Pidgeon R.T., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 2000. Th-UPb isotopic systems and internal structures of complex zircons from the Pium complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of the granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chemical Geology*, **166**:159- 171.

Pinheiro R.V., Kadekaru K., Soares, A. V. Freitas C., Ferreira S.N., Matos, F.M.V. 2013. Carajás, Brasil - Uma breve revisão tectônica. *Anais do 13º Simpósio de Geologia da Amazônia Belém*.

Prado, E.B.G., 2019. Geologia estrutural, petrologia e química mineral das rochas encaixantes da mineralização de Cu-Au IOCG do Salobo, Província Mineral de Carajás. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, UFRJ, 165p.

Réquia K., Stein H., Fontboté L. Chiaradia M. 2003. Re-Os and Pb-Pb geochronology of the Archean Salobo iron oxide copper-gold deposit, Carajás Mineral Province, northern Brazil. *Mineralium. Deposita*, **38**:727-738.

Ricci P.S.F. & Carvalho M.A. 2006. Rocks of the Pium-Area, Carajás Block, Brazil – A Deep seated High-T Gabbroic Pluton (Charnokitoid-Like) with Xenoliths of Enderbitic Gneisses Dated at 3002 Ma – The Basement Problem Revisited: 8thSimpósio de Geologia da Amazônia. (Proceedings)

Rigon J.C., Munaro P., Santos L.A., Nascimento J.A.S., Barreira C.F., 2000. Alvo 118 copper-gold deposit: geology and mineralization, Serra dos Carajás, Pará, Brazil. In *31st International Geological Congress*, Volume de Resumos.

Rotzler, J., Hagen, B., Hoernes, S., 2008. Geothermometry of ultrahigh-temperature Saxon granulites revisited. Part I: New evidence from key mineral assemblages and reaction textures. *Europe Journal of Mineralogy*, **20**: 1097-1115.

Ruiz-Agudo, E., Putnis, C. V., & Putnis, A. 2014. Coupled dissolution and precipitation at mineral-fluid interfaces. *Chemical Geology*, **383**: 132-146.

Salgado, S.S., Caxito, F.A., Queiroga, G.N., Castro, M.P., 2019. Stratigraphy, petrography and tectonics of manganese-bearing Buritirama Formation, Northern Carajás Domain, Amazon Craton. *Brazilian Journal of Geology*, **49**:1-15.

Santos, J.O.S., 2003, Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central, in Bizzi, L.A., ed, Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Brasília, CPRM, 169-226.

Sardinha A.S., Barros C.E. de M., Krymsky M., 2006. Geology, geochemistry and U-Pb geochronology of the Archean (2.74Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Metallogenetic Province, northern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **20**:327-339.

- Silva, A. O. M. D., & Porcher, C. C. 1996. Características dos padrões de zoneamento metamórfico em granadas de baixo e alto grau: uma comparação, Salão de Iniciação Científica, Livro de resumos, UFRGS, **8**:9-13.
- Silva M.G., Teixeira J.B.G., Pimentel M.M., Vasconcelos P.M., Arielo A., Rocha W.J.S.F. 2005. Geologia e mineralizações de Fe-Cu-Au do Alvo GT46 (Igarapé Cinzento, Carajás). In: Marini, OJ, Queiroz ET, Ramos BW (eds.), Caracterização de Depósitos Mineraiis em Distritos Mineiros da Amazônia, DNPM- FINEP-ADIMB, 94-151.
- Sobolev, N.V., 1965. Classification of rock forming garnets. Dokl. Acad. Sci. USSR, Earth Sci., **143**:105-107.
- Souza Z.S. Medeiros, H., Althoff, F.J., Dall'agnol, R. 1990. Geologia do terreno granito greenston arqueano da região de Rio Maria, Sudeste do Pará. In: Congresso Brasileiro de Geologia, Natal, SBG, **36**:2913-2928.
- Souza, S.R.B., Macambira, M.J.B., and Sheller, T., 1996, Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaiúnas (Serra dos Carajás, PA): Implicações estratigráficas: Simpósio de Geologia da Amazônia, 5th, Belém, Brazil, Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), 1996, *Proceedings*, 380–383.
- Souza, L.H., Vieira, E.A.E., 2000. Salobo 3 Alpha deposit: geology and mineralization. In: Porter, T.M., (ed), Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold & Related Deposits A Global Perspective, Austral Miner Fund, Adelaide, 213-224.
- Spear, F.S., 1988. Metamorphic fractional crystallization and internal metasomatism by diffusional homogenization of zoned garnets. *Contrib Mineral Petrol.* **99**:507-517.
- Tallarico F.H.B. 2003. O cinturão cupro-aurífero de Carajás, Brasil. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 229p.
- Tallarico, F.H.B., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., Figueiredo, B.R., Carvalho, J.B., Rego, J.L., and Nunes, A.R., 2004, Geological and SHRIMP II U-Pb constraints on the age and origin of the Breves Cu-Au-(W-Bi-Sn) deposit, Carajás, Brazil: *Mineralium Deposita*, **39**:68–86.
- Tallarico, F.H.B., Figueiredo B.R., Groves D.I., Kositcin N., McNaughton N.J., Fletcher I.R., e Rego J.L., 2005, Geology and SHRIMP U-Pb geochronology of the Igarapé Bahia deposit, Carajás copper-gold belt, Brazil: an Archean (2.57 Ga) example of iron-oxide Cu-Au-(U-REE) mineralization. *Economic Geology* **100**:7–28.
- Tassinari C.C.G., Mellito M.K., Babinski M., 2003, Age and origin of the Cu (Au-Mo-Ag) Salobo 3A ore deposit, Carajás Mineral Province, Amazonian Craton, northern Brazil. *Episodes*, **26**:2–9.
- Tavares, F. M., Trouw, R.A.J., Silva, C.M.G., Justo, A.P., Oliveira, J.K.M., 2018. The multistage tectonic evolution of the northeastern Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil: Revealing complex structural patterns. *Journal of South American Earth Sciences*, **88**:238-252.
- Teixeira, J.B.G., 1994. Geochemistry, Petrology, and Tectonic Setting of Archean Basaltic and Dioritic Rocks from the N4 Iron Deposit, Serra dos Carajás, Brazil. Tese PhD, The Pennsylvania State University, University Park, PA, EUA, 175p.
- Teixeira, J.B.G., Lindenmayer, Z.G., and Silva, M.G., 2010, Depósitos de Óxido de Fe, Cu-Au de Carajás. In: R.S.C. Brito, M.G. Silva, R.M. Kuyumjian. (Org.). Modelos de depósitos de cobre do Brasil e sua resposta ao intemperismo. Brasília, CPRM, **1**: 15-48
- Toledo P.I.F.T., Moreto C.P.N., Xavier R.P., Gao J.F., Matos J.H.S.N, 2019. Multistage evolution of the Neoproterozoic (ca. 2.7 Ga) Igarapé Cinzento (GT-46) IOCG deposit at Cinzento Shear Zone, Carajás Province, Brazil. *Economic Geology* **114**:1-34.
- Torresi, I., Xavier, R.P., Bortholoto, D.F.A., and Monteiro, L.V.S., 2012. Hydrothermal alteration, fluid inclusions and stable isotope systematics of the Alvo 118 iron oxide-copper-gold deposit, Carajás mineral province (Brazil): Implications for ore genesis: *Mineralium Deposita* **47**:299–323.
- VALE. 2012. Vale obtains operation license for Salobo. Disponível em <http://saladeimprensa.vale.com/en/release/interna.asp?id=22000>. Acessado em 04 fevereiro 2013.
- 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 Mineraiis 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 M.L, Rosa-Costa L.T. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM.

Williams P.J., Barton M.B., Johnson D.A., Fontboté L., Haller A., Mark G., Oliver N.H., Marschik R. 2005. Iron oxide copper-gold deposits: geology, space-time distribution, and possible modes of origin. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 371-405.

Winchell, A.N. 1933. *Optical Mineralogy II*, third edition, New York, John Wiley and Sons, Inc., 193p.

Wirth, K.R.; Gibbs, A.K.; Olszewski, W.J., 1986, U-Pb ages of zircons from the Grão Pará Group and Serra dos Carajás Granite, Pará, Brazil: *Revista Brasileira de Geociências*, **16** (2):195-200.

Xavier, R..P., Wiedenbeck, M., Trumbull, R.B., Dreher, A.M., Monteiro, L.V.S., Rhede, D., Araújo, C.E.G., Torresi, I., 2008. Tourmaline B-isotopes fingerprint marine evaporites as the source of high-salinity ore fluids in iron oxide-copper-gold deposits, Carajás Mineral Province (Brazil): *Geology*, **36**:743-746.

Xavier R.P., Monteiro L.V.S., Moreto C.P.N., Pestilho A.L.S., Melo G.H.C., Silva M.A.D., Aires B., Ribeiro C., Silva F.H.F. 2012. The Iron Oxide Copper-Gold Systems of the Carajás Mineral Province, Brazil. In: Hedenquist J.W. Harris M. Camus F. (Eds.) *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: a Tribute to Richard Sillitoe*. Littleton, *Society of Economic Geologists, Special Publications number*, **16**:433-455.

Zucchetti M. 2007. Rochas máficas do grupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 E N5, Carajás, PA: Dissertação de doutorado, Instituto de Geociências Universidade Federal de Minas Gerais, 165p.

(continuação)

Amostra	97.70 (tipo (ii))						579.20 (tipo (iii))			
	36	37	38	39	40	41	1	2	4	5
Spot										
MgO	0,67	0,74	0,64	0,68	0,69	0,7	2,02	1,99	1,39	1,71
Al₂O₃	18,67	18,83	19,09	19,15	18,89	18,9	19,8	19,8	19,55	19,69
SiO₂	32,42	32,85	32,73	32,8	33,06	33,55	34,34	33,99	33,87	33,88
CaO	1,03	1,39	1,48	1,63	1,86	1,92	0,99	0,99	1,45	1,44
MnO	1,52	1,7	1,91	1,98	2,17	2,68	0,74	0,82	1,11	0,85
FeO	45,69	44,5	44,14	43,76	43,32	42,25	42,1	42,4	42,63	42,44
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Si	2,70	2,73	2,72	2,72	2,74	2,78	2,82	2,79	2,79	2,78
Ti	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	1,83	1,84	1,87	1,87	1,85	1,85	1,91	1,91	1,90	1,91
Cr	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fe3+	0,76	0,70	0,69	0,68	0,67	0,59	0,46	0,51	0,52	0,53
Fe2+	2,42	2,39	2,37	2,35	2,34	2,34	2,43	2,40	2,41	2,39
Mn	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,19	0,05	0,06	0,08	0,06
Mg	0,08	0,09	0,08	0,08	0,09	0,09	0,25	0,24	0,17	0,21
Ca	0,09	0,12	0,13	0,14	0,17	0,17	0,09	0,09	0,13	0,13
Total	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
A	0,268	0,271	0,276	0,278	0,276	0,276	0,263	0,266	0,269	0,268
F	0,708	0,703	0,701	0,698	0,699	0,698	0,669	0,667	0,683	0,673
M	0,024	0,027	0,023	0,025	0,025	0,026	0,068	0,068	0,048	0,059
Almandine	89,544	87,725	87,297	86,472	85,301	83,992	86,317	86,108	86,519	85,797
Spessartine	3,971	4,383	4,943	5,113	5,560	6,766	1,825	2,043	2,776	2,125
Pyrope	3,081	3,358	2,915	3,091	3,111	3,110	8,769	8,728	6,118	7,524
Grossular	2,402	3,289	3,535	3,901	4,431	4,641	2,494	2,466	3,596	3,567
Andradite	1,002	1,245	1,310	1,423	1,598	1,491	0,595	0,654	0,991	0,987
Uvarovite	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

