



Universidade Federal do Pará



Instituto de geociências



Faculdade de Geologia

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SUÍTE ARQUEANA PLANALTO E GRANITOIDES VILA JUSSARA, PROVÍNCIA
CARAJÁS: UM ESTUDO MORFOLÓGICO E COMPOSICIONAL DE ZIRCÃO
ATRAVÉS DE MEV-CL-ERE-EDS

GEOCIÊNCIAS
U F P A

BELÉM-PARÁ
FEVEREIRO 2015

RENAN MALONE BRITO CUNHA

SUÍTE ARQUEANA PLANALTO E GRANITOIDES VILA JUSSARA, PROVÍNCIA
CARAJÁS: UM ESTUDO MORFOLÓGICO E COMPOSICIONAL DE ZIRCÃO
ATRAVÉS DE MEV-CL-ERE-EDS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de
Geologia da Universidade Federal
do Pará – UFPA, em cumprimento
às exigências para obtenção do
grau de Bacharel em Geologia.
Orientador: Prof. Dr. Cláudio Nery
Lamarão.

BELÉM-PARÁ

FEVEREIRO 2015

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/UFPA

Cunha, Renan Malone Brito 1989-

Suíte arqueana planalto e granitoides Vila Jussara, Província Carajás: um estudo morfológico e composicional de zircão através de MEV-CL-ERE-EDS / Renan Malone Brito Cunha. – 2015.

79f : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Cláudio Nery Lamarão

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia, Belém, 2015.

1. Granitos arqueanos.
2. Zircão.
3. MEV-EDS.
4. Catodoluminescência.
5. Elétrons retroespalhados. Carajás (Pará). I. Título.

CDD 22 ed. 552.3098115

RENAN MALONE BRITO CUNHA

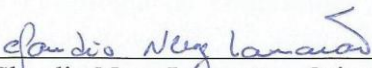
SUÍTE ARQUEANA PLANALTO E GRANITOIDES VILA JUSSARA, PROVÍNCIA
CARAJÁS: UM ESTUDO MORFOLÓGICO E COMPOSICIONAL DE ZIRCÃO
ATRAVÉS DE MEV-CL-ERE-EDS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geologia do
Instituto de Geociências da Universidade
Federal do Pará (UFPA), como requisito de
cumprimento às exigências para obtenção
do grau de Geólogo – Bacharel em
Geologia.

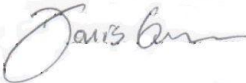
Data de Aprovação: ___/___/___

Conceito: _____

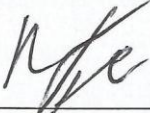
Banca Examinadora:



Prof. Claudio Nery Lamarão – Orientador
Doutor em Geologia
Universidade Federal do Pará



Prof. Davis Carvalho de Oliveira – Membro
Doutor em Geologia e Geoquímica
Universidade Federal do Pará



Prof. Hilton Túlio Costi – Membro
Doutor em Geologia
Museu Paraense Emílio Goeldi

AGRADECIMENTOS

-À Deus, que gerou este mundo me proporcionando a possibilidade de estudá-lo e por estar sempre presente em nossas vidas nos dando todo o apoio para sermos felizes.

-À minha família, em especial minha mãe, Maria da Graça Silva Brito, que não criou o mundo, mas lutou para ter uma vida nele, e me fez ser quem sou hoje com muita paciência, dedicação e principalmente amor. Muito obrigado mãe por todos seus sacrifícios que só uma mãe de verdade faria para ver um filho feliz.

-À minha esposa, Roberta Raiol Magalhães, que é o melhor presente de aniversário que Deus me deu e foi quem mais torceu pela finalização deste trabalho, agradeço por sempre estar comigo me apoiando e me ensinando várias coisas. Muito obrigado por todo seu carinho, paciência e por ser incrivelmente linda, externa e internamente. Te amo.

-Ao instituto de geociências da UFPA, onde conheci a geologia que me cativou.

-Ao LAB-MEV coordenado pelo Doutor Claudio Nery Lamarão, que é um verdadeiro mestre e uma pessoa que contagia ética, competência e cordialidade, muito obrigado por transmitir toda sua dedicação e conhecimento. És um modelo a ser seguido.

-Ao edital 001/2010 Vale/FAPESPA -que forneceu a bolsa de iniciação científica-intitulado: *“Evolução geodinâmica e aspectos metalogenéticos da província mineral de Carajás (PA): Implicações para gênese de depósitos minerais e perspectivas para novas descobertas”*. Coordenado pelo Doutor Davis Carvalho de Oliveira que sempre me tratou bem e me apoiou, nunca negando um pedido por menor que fosse.

-À todos os professores que conheci durante o curso, que são parte indispensável da minha formação.

-Ao Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) por estar recheado de pessoas competentes e que nunca se negaram em me ajudar, principalmente a todos os mestrandos e doutorandos que foram apoio fundamental na confecção deste trabalho.

-À engenheira química bolsista e operadora do MEV Ana Paula Picanso Corrêa e a mestranda Gisele Tavares Marques pelas conversas descontraídas, incentivos, ensinamentos e apoio.

-À técnica em mineração Joelma de Jesus Lobo, responsável pela coordenação do Laboratório de Laminação do PPGG-IG-UFPA, por ser muito competente e divertida, me auxiliando toda vez que eu ia até lá “perturbar”.

-Por fim, à toda minha turma de 2009 e 2010 que me receberam muito bem e me proporcionaram momentos épicos de diversão e aprendizado, não posso citar nomes, pois são muitas pessoas e não quero esquecer ninguém, mas a todos vocês... muito obrigado.

RESUMO

O zircão é um mineral acessório frequente em várias rochas ígneas, especialmente nas rochas félsicas. Cristais de zircão de diferentes magmas tendem a herdar assinaturas geoquímicas características de suas fontes. A estabilidade química relativamente elevada a alterações *subsolidus*, somada a presença de elementos traços como Hf, Y, Nb, Th, U, Ca, ETR e P na estrutura cristalina do zircão, têm permitido avanços importantes na caracterização de rochas fonte, na identificação de fracionamento de rochas ígneas e em estudos de proveniência. Portanto, as variações morfológicas, texturais e composicionais de cristais de zircão auxiliam no entendimento da sua história de cristalização e, conseqüentemente, de suas rochas hospedeiras. Nesse contexto, o presente trabalho discute os aspectos morfológicos e composicionais de cristais de zircão dos granitos arqueanos Planalto e Vila Jussara, situados na região de Canaã dos Carajás, sudeste do cráton Amazônico, e tenta definir uma assinatura geoquímica para eles. Imagens de Catodoluminescência (CL), obtidas com o uso da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), permitiram identificar feições internas importantes como zoneamentos composicionais, núcleos herdados, bordas de sobrecrecimento, inclusões, fraturas e feições indicativas de alteração. Em geral, os zircões dos granitos Planalto e Vila Jussara são morfológicamente semelhantes. Seus cristais são euédricos e luminescentes, apresentam zoneamento composicional bem definido, fraturas no sentido núcleo-borda, núcleos metamíticos e inclusões de F-apatita. Entretanto, zircões da amostra RD-02 do Granito Planalto, provenientes de uma área intensamente deformada relacionada à zona de cisalhamento Itacaiúnas, apresentaram cristais predominantemente anédricos a subédricos, com baixa intensidade de luminescência (escuras), isentos de zoneamento composicional evidente e intensamente fraturados. Composicionalmente esses zircões são mais enriquecidos em Ca (0,4-1,2%), possuem os menores conteúdos de Nb (3,9-4,4%) e as mais baixas razões Nb/Ta (4,0-5,8) e Zr/Hf (21-32) quando comparados aos zircões da amostra RD-05 situada fora da zona deformada. Tal fato permite inferir que a percolação de fluidos através das fraturas provavelmente contribuiu para os teores mais elevados de Ca encontrado nesses zircões e a conseqüente diminuição do Nb por reações de substituição. Os zircões do Granito Vila Jussara possuem conteúdos de Ca entre 0,1 e 0,2%, de Nb entre 4,2 e 7,7% e razões Zr/Hf variando de 21 e 36,5. A aplicação de MEV-EDS-ERE-CL em zircão confirma a sua importância como ferramenta complementar em estudos petrológicos.

Palavras-chave: Granitos arqueanos. Zircão. MEV-EDS. Catodoluminescência. Elétrons retroespalhados. Carajás (Pará).

ABSTRACT

Zircon is a common accessory mineral in many igneous rocks, especially in felsic rocks. Zircon grains from different magmas tend to inherit geochemical signatures characteristic of their sources. The relatively high chemical stability to subsolidus changes, coupled with the presence of trace elements such as Hf, Y, Nb, Th, U, Ca, P and ETR in the crystal structure of zircon have allowed important advances in the characterization of source rocks, in identifying fractionation of igneous rocks, and in provenance studies. Therefore, morphological, textural and compositional variations in zircon crystals assist in the understanding of their history of crystallization and hence its host rock. In this context, this paper discusses the morphological and compositional aspects of zircons from Archean Planalto and Vila Jussara granites, located in the Canaã dos Carajás region, southeastern Amazonian craton, with the goal of establishing a morphological signature and geochemical feature of these bodies. Cathodoluminescence (CL) images, obtained using Scanning Electron Microscopy (SEM), allowed identifying internal features such as compositional zoning, inherited cores, edges of overgrowth, inclusions, fractures and features indicative of alterations. In general, the zircons from Planalto and Vila Jussara granites are morphologically similar. Their crystals are euhedral and luminescent, have well-defined compositional zoning, fractures towards core-edge, metamict cores and inclusions of F-apatite. However, zircons the sample RD-02 of Planalto Granite, from an area intensely deformed related to Itacaiúnas shear zone, presented dominantly anhedral to subhedral crystals with low intensity of luminescence (dark), free of obvious compositional zoning, and intensely fractured. These zircons are more compositionally enriched in Ca (0.4-1.2%), have the lowest Nb content (3.9-4.4%) and the lowest Nb/Ta (4.0 to 5, 8) and Zr/Hf (21-32) ratios, when compared to the zircon of RD-05 sample located outside the deformed region. This fact allows to infer that the percolation of fluids through fractures probably contributes to the occurrence of the higher Ca contents observed in these zircons, as well the reduction of the Nb contents by means of replacement reactions. The zircons from Vila Jussara Granite have Ca content between 0.1 and 0.2%, Nb between 4.2 and 7.7% and Zr/Hf ratios ranging from 21 to 36.5. The application of SEM-EDS-ERE-CL in zircon confirms its importance as a complementary tool in petrological studies.

Keywords: Archean granites. Zircon. SEM-EDS. Cathodoluminescence. Electrons backscattered. Carajás (Pará).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-	Localização dos corpos estudados. (A) Mapa geológico simplificado da Província Carajás, mostrando os limites aproximados entre os Domínios Rio Maria e Carajás e também entre o Subdomínio de Transição e a Bacia Carajás. (B) Mapa geológico de detalhe dos corpos graníticos mostrando a localização das amostras estudadas.....	15
Figura 2-	Mapa de localização da área de Canaã dos Carajás, com destaque para a área a sul de vila Feitosa onde se localizam os corpos.....	16
Figura 3-	Concentrados de zircão fornecidos para análise; à esquerda: concentrados RD-02 e RD-05; à direita: concentrados AMP-27; MD-01 e MD-02.....	19
Figura 4-	Exemplo de polimento manual das seções. Laboratório de Laminação (PPGG-IG-UFPA).....	21
Figura 5-	Seções polidas de cada amostra contendo os zircões estudados	22
Figura 6-	A) Microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostrando a localização do detector de elétrons retroespalhados (ERE) e dos acessórios: Catodoluminescência (CL) e Espectrometria por Dispersão de Energia (EDS); B) Metalizador a ouro utilizado. (LABMEV-UFPA).....	23
Figura 7-	Desenho esquemático ilustrando o princípio de funcionamento do MEV e seus componentes internos	24
Figura 8-	Exemplo de imagens em ERE, à direita: Cristal euédrico a subédrico de zircão em lâmina, mostrando fraco zoneamento e corrosão interna; à esquerda: Cristal euédrico a subédrico de zircão na forma de grão isolado, onde é possível visualizar microfraturas e inclusões.....	26
Figura 9-	Exemplo de análise química utilizando EDS. (LABMEV-UFPA)	26
Figura 10-	Exemplo de imagens em CL. À esquerda: Cristal de quartzo em lâmina; à direita: Cristal euédrico a subédrico de zircão. Em ambas as figuras é possível notar a diferença de qualidade com a imagem em ERE, o que permite melhor visualização de zoneamentos, inclusões, entre outras características dos cristais.....	27
Figura 11-	Alguns tipos de formas de energia, que são liberadas em consequência da interação do feixe de elétrons com a amostra.....	28
Figura 12-	Demonstração do uso das técnicas deste trabalho, permitindo a realização dos estudos morfológicos e químicos nos cristais de zircão; neste exemplo são mostradas imagens de CL e ERE do mesmo cristal.....	28
Figura 13-	Fluxograma resumindo as atividades empregadas durante a pesquisa e confecção do Trabalho.....	29
Figura 14-	Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico: à esquerda Tassinari e Macambira (2004); à direita Santos et al. (2006)	30

Figura 15-	Províncias Geocronológicas do Cráton Amazônico, modificado de Almeida et al. (2011). (a) Mapa de localização do Cráton Amazônico; (b) Destaque para os blocos presentes no Cráton; (c) Delimitação do Bloco Carajás; (d) Mapa geológico simplificado da Província Mineral de Carajás (FEIO et al., 2011).....	31
Figura 16-	Aspecto geral da fácies Hornblenda-Biotita Monzogranito intensamente a moderadamente deformado: a) concentração de minerais ferromagnesianos, onde predominam cristais de hornblenda, biotita, minerais opacos, titanita e zircão; b) aspecto geral da fácies, mostrando cristais de quartzo ao lado dos cristais de feldspato e plagioclásio, além da fase de granulação mais fina produzida por recristalização; c) Minerais opacos com coroas de titanita associados aos concentrados máficos; d) megacrystal de allanita euédrico e alterado; e) cristais de biotita com inclusões de titanita e zircão; f) Intercrescimento entre plagioclásio e quartzo, caracterizando as mirmequitas em bulbo.....	40
Figura 17-	Aspecto geral da lâmina AMP-27: a) visualização dos níveis de minerais máficos, onde predominam cristais de hornblenda e biotita que se encontram grosseiramente estirados seguindo uma direção preferencial; b) mesma imagem na ortoscopia, onde é possível ver a distribuição de quartzo, plagioclásio e K-feldspato; c) textura poiquilitica em hornblenda contendo inclusões de titanita e finas lamelas de biotita; d) agregados de titanita associados a biotita, é possível visualizar uma inclusão de zircão na biotita no canto inferior direito da imagem.....	43
Figura 18-	Aspecto geral da lâmina MAR-119: a) aspecto isotrópico da lâmina com diversos minerais de allanita dispostos por toda amostra; b) mesma imagem na ortoscopia, onde é possível ver a distribuição de quartzo, plagioclásio e K-feldspato; c) mineral opaco em contato com titanita amorfa, também é possível visualizar anfibólio (verde) e biotita (marrom) abaixo do mineral; d) mesma imagem da anterior com o uso da ortoscopia, destaque para o maclamento xadrez dos K-feldspatos mostrando sua abundância na amostra.....	45
Figura 19-	Aspecto geral da lâmina MAR-16: a) aspecto anisotrópico da lâmina com minerais de biotita e, secundariamente, finos cristais de anfibólio orientados formando níveis entre os outros minerais; b) mesma imagem na ortoscopia, onde é possível ver a distribuição de quartzo, plagioclásio e K-feldspato; c) titanita na sua forma de ocorrência mais comum, formando agregados associados a biotita; d) cristal de hornblenda levemente estirado e com finas inclusões de minerais opacos, zircão e apatita nos planos de clivagem, também pode ser visualizado um cristal de epidoto no centro do mineral e com biotitas lamelares e bem formadas nas bordas.....	47
Figura 20-	Imagem de ERE. Visão geral dos zircões selecionados da amostra RD-02	48
Figura 21-	Imagens de catodoluminescência representativas dos zircões da amostra RD-02. F-Ap= flúor apatita; Ab= Albita; Fl= fluorita	49
Figura 22-	Imagens em ERE analisadas por EDS, de alguns cristais de zircão da seção RD-02, mostrando os conteúdos de Hf, Nb e Ca (% em peso)	50

Figura 23-	Imagem de ERE. Visão geral dos zircões selecionados da amostra RD-05	52
Figura 24-	Imagens de catodoluminescência representativas dos zircões da amostra RD-05. F-Ap= flúor apatita; Kfs= K-feldspato; Qz= quartzo	53
Figura 25-	Imagens em ERE analisadas por EDS, de alguns cristais de zircão da seção RD-05, mostrando os conteúdos de Hf, Nb e Ca (% em peso)	54
Figura 26-	Diagramas geoquímicos mostrando a distribuição dos zircões estudados no Granito Planalto em termos de Nb, Ta e Ca (% em peso) e das razões Zr/Hf e Zr/Ca	56
Figura 27-	Imagem de ERE. Visão geral dos zircões selecionados da amostra AMP-27	57
Figura 28-	Imagens de catodoluminescência representativas dos zircões da amostra AMP-27. F-Ap= flúor apatita; Kfs= K-feldspato; Qz= quartzo	58
Figura 29-	Imagens em ERE analisadas por EDS, de alguns cristais de zircão da seção AMP-27, mostrando os conteúdos de Hf, Nb e Ca (% em peso)	59
Figura 30-	Imagem de ERE. Visão geral dos zircões selecionados da amostra MD-01	61
Figura 31-	Imagens de catodoluminescência representativas dos zircões da amostra MD-01. F-Ap= flúor apatita; Kfs= K-feldspato; Qz= quartzo	62
Figura 32-	Imagens em ERE analisadas por EDS, de alguns cristais de zircão da seção MD-01, mostrando os conteúdos de Hf, Nb e Ca (% em peso)	63
Figura 33-	Imagem de ERE. Visão geral dos zircões selecionados da amostra MD-02	65
Figura 34-	Imagens de catodoluminescência representativas dos zircões da amostra MD-02	66
Figura 35-	Imagens em ERE analisadas por EDS, de alguns cristais de zircão da seção MD-02, mostrando os conteúdos de Hf, Nb e Ca (% em peso)	67
Figura 36-	Diagramas geoquímicos mostrando a distribuição dos zircões estudados no granito Vila Jussara em termos de Nb, Ta, Ca (% peso) e das razões Zr/Hf, Zr/Nb	69
Figura 37-	Diagramas geoquímicos mostrando a distribuição dos zircões estudados em termos de Nb, Ta, Ca e razões Zr/Hf, Zr/Ca	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Quantidade de zircões e seções polidas estudadas neste trabalho.....	22
Tabela 2-	Resultado das análises em EDS dos cristais de F-apatita inclusas nos zircões, amostra RD-02.....	50
Tabela 3-	Resultados das análises químicas por EDS dos zircões da seção RD-02, mostrando os teores médios de O, Si, Ca, Nb, Ta, U, Zr, Hf e das razões Zr/Hf, Zr/Ca e Nb/Ta, com destaque para as maiores concentrações de Ca dentre todos os zircões analisados.....	52
Tabela 4-	Resultado das análises em EDS dos cristais de F-apatita inclusas nos zircões, amostra RD-05.....	54
Tabela 5-	Resultados das análises químicas dos zircões da seção RD-05, mostrando os teores médios dos elementos O, Si, Ca, Nb, Ta, U, Zr, Hf e das razões Zr/Hf, Zr/Ca e Nb/Ta, com destaque para a ocorrência de dois grupos de zircões apresentando teores de Nb muito distintos.....	56
Tabela 6-	Resultado das análises em EDS dos cristais de F-apatita inclusas nos zircões, amostra AMP-27.....	59
Tabela 7-	Resultados das análises de EDS dos zircões da amostra AMP-27, mostrando os teores médios de O, Si, Ca, Nb, Ta, U, Zr, Hf e das razões Zr/Hf, Zr/Ca e Nb/Ta, com destaque para as concentrações mais elevadas de Nb dentre as amostras do Granito Vila Jussara estudadas.....	60
Tabela 8-	Resultado das análises em EDS dos cristais de F-apatita inclusas nos zircões, amostra MD-01.....	63
Tabela 9-	Resultados da análise química dos zircões da seção MD-01, mostrando os teores médios de O, Si, Ca, Nb, Ta, U, Zr, Hf e das razões Zr/Hf, Zr/Ca e Nb/Ta, com destaque para os menores valores de Nb dentre todos os zircões do Granito Vila Jussara analisados.....	64
Tabela 10-	Resultados da análise química dos zircões da seção MD-02, mostrando os teores médios de O, Si, Ca, Nb, Ta, U, Zr, Hf, e das razões Zr/Hf, Zr/Ca e Nb/Ta.....	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Apresentação	13
1.2	Localização dos corpos amostrados	14
1.3	Justificativa	17
1.4	Objetivos	18
2	METODOLOGIA DE TRABALHO	19
2.1	Revisão bibliográfica	19
2.2	Confecção de seções polidas	19
2.3	Microscopia eletrônica de varredura	23
2.3.1	Elétrons retroespalhados.....	25
2.3.2	Espectroscopia de raios-X por dispersão de energia.....	26
2.3.3	Catodoluminescência	27
3	CONTEXTO GEOLOGICO	30
3.1	Geologia regional	30
3.1.1	Província Mineral de Carajás.....	31
3.1.2	Subdomínio de Transição.....	33
3.2	Geologia local	36
3.2.1	Granito Planalto.....	36
3.2.2	Granito Vila Jussara.....	37
4	PETROGRAFIA	38
4.1	Granito Planalto	38
4.2	Granito Vila Jussara	41
4.2.1	Lâmina AMP-27.....	41
4.2.2	Lâmina MAR-119.....	43
4.2.3	Lâmina MAR-16.....	45

5	RESULTADOS	48
5.1	Morfologia e geoquímica dos zircões do Granito Planalto	48
5.1.1	Seção RD-02.....	48
5.1.2	Seção RD-05.....	52
5.1.3	Diagramas geoquímicos dos zircões do Granito Planalto.....	56
5.2	Morfologia e geoquímica dos zircões do granito Vila Jussara	57
5.2.1	Seção AMP-27.....	57
5.2.2	Seção MD-01.....	61
5.2.3	Seção MD-02.....	65
5.2.4	Diagramas geoquímicos dos zircões do Granito Vila Jussara.....	69
6	DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	70
6.1	Estudo comparativo dos zircões dos granitos Planalto e Vila Jussara	70
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O presente trabalho refere-se à aplicação de microscopia eletrônica de varredura, catodoluminescência, imagens de elétrons retroespalhados e análises químicas por espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (MEV-CL-ERE-EDS) em cristais de zircão de dois plutons arqueanos distintos, Granito Planalto e Granito Vila Jussara, situados na porção sudeste do Cráton Amazônico, domínio da Província Carajás, com a finalidade de realizar estudos morfológicos e composicionais desses zircões utilizando as metodologias mencionadas. Não houve uma etapa de mapeamento geológico, os corpos foram amostrados em estudos anteriores (SANTOS,2009; SOUZA, 2009; SILVA,2009) que produziram os concentrados de zircão (Figura 3) e as lâminas analisadas neste trabalho.

Huhn et al. (1999) denominaram de Granito Planalto um *stock* de composição granítica, milonitizado nas bordas, situado a oeste da Serra do Rabo, às proximidades de Vila Planalto, Província Carajás (Figuras 1,2). Datações através do método de evaporação de Pb em zircão forneceram idades de 2747 ± 2 Ma (HUHN et al., 1999) e 2734 ± 4 Ma (SARDINHA et al., 2004), interpretadas como idades de colocação/cristalização do corpo. Gomes (2003) correlacionou corpos graníticos lenticulares, variando de sienogranitos, monzogranitos a álcali feldspato-granitos contendo anfibólio e biotita da região leste de Canaã dos Carajás, ao Granito Planalto (Figura 1). Sardinha et al. (2006) estudaram os corpos graníticos Serra do Rabo e Igarapé Gelado e Barros et al. (2009) o Complexo Granítico Estrela, todos com características de granitos tipo A e idade neoarqueana situados nos domínios da Bacia Carajás (Figura 1).

Imediatamente a sul da Bacia Carajás, outros corpos graníticos alongados e mostrando características de granitos tipo A foram agrupados na Suíte Planalto. Feio et al. (2012) estudaram corpos lenticulares em Canaã dos Carajás, concluindo que os mesmos se encontram em áreas de forte deformação e orientados concordantemente ao *trend* regional E-W, localmente NE-SW ou N-S. Geoquimicamente são rochas subalcalinas, metaluminosas a fracamente peraluminosas, com assinatura de granitos tipo A e pertencentes à Suíte Planalto. Datações por evaporação de Pb em monocristais de zircão e LA-ICP-MS (*Laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry*) obtidas em diferentes plutons da Suíte Planalto na região de Canaã dos Carajás indicaram que essas rochas cristalizaram num intervalo de tempo entre 2730 e 2700 Ma (FEIO et al., 2012).

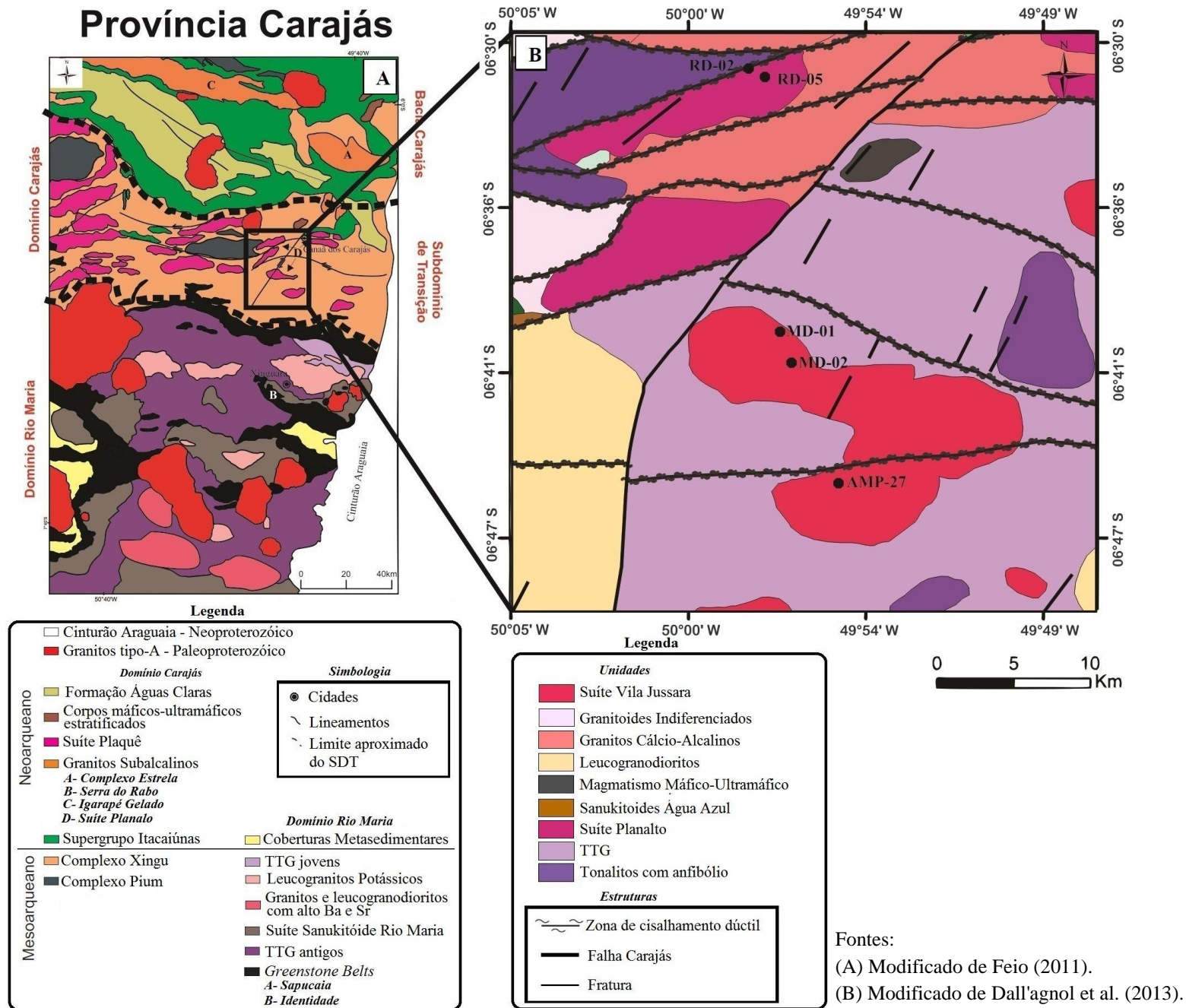
Silva (2009) e Silva (2014) descreveram na região de Vila Jussara uma associação de granitos, granodioritos e tonalitos com anfibólio denominados de Granitoides Vila Jussara; tais rochas mostram semelhanças texturais e geocronológicas com as rochas da Suíte Planalto descritas por Oliveira et al. (2010). Entretanto, os Granitos da suíte Vila Jussara apresentam quimismo particular por exibirem caráter oxidado e maior volume de tonalitos e granodioritos que a Suíte Planalto, sugerindo outro contexto geológico para sua formação (SILVA, 2014; TEIXEIRA, 2013). Souza (2009) e Silva (2009) dataram os zircões do granito Vila Jussara pelo método de evaporação de Pb em zircão; a primeira coletou zircões em um corpo localizado na parte norte da associação e a segunda em um corpo na parte sul que forneceram idades médias de 2748 ± 2 Ma e $2752 \text{ Ma} \pm 2.2$, respectivamente, para a cristalização de cada corpo.

1.2 Localização dos corpos amostrados

A Suíte Planalto e o Granito Vila Jussara ocorrem na região de Canaã dos Carajás sudeste do Estado do Pará, mais especificamente no Subdomínio de Transição (FEIO et al., 2013) do Craton Amazônico, que corresponde a região situada entre o Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM) e a Bacia Carajás. Araújo et al. (1988) realizou os primeiros trabalhos de mapeamento na região denominada de Complexo Xingu, posteriormente intitulada de Subdomínio de Transição (SDT) por Feio et al. (2013), onde foram definidas as áreas de ocorrência dos granitoides da Suíte Plaqué. De modo geral o SDT é constituído por vários plútons de composição monzogranítica a sienogranítica, alongados na direção E-W e intrusivos no complexo máfico Pium e no Supergrupo Itacaiúnas. É delimitado por zonas de cisalhamento e orientado concordantemente com o *trend* regional (FEIO et al., 2012). As amostras selecionadas para este estudo possuem a seguinte nomenclatura: RD-02 e RD-05 representando o Granito Planalto (SANTOS, 2009); AMP-27 (SILVA, 2009), MD-01 e MD-02 representando o Granito Vila Jussara (SOUZA, 2009). Ambos os corpos estão inseridos na Folha SB-22-Z-A-III e localizam-se a sul de Vila Feitosa (Figura 2). Nos últimos anos, novos estudos vêm sendo realizados na região de Canaã dos Carajás por pesquisadores do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides-GPPG do IG-UFPA e empresas de exploração mineral (Vale) em escala de maior detalhe.

A Figura 1 mostra o mapa de localização dos corpos e das amostras estudadas, enquanto a Figura 2 o acesso ao município de Canaã dos Carajás.

Figura 1- Localização dos corpos estudados. (A) Mapa geológico simplificado da Província Carajás, mostrando os limites aproximados entre os Domínios Rio Maria e Carajás e também entre o Subdomínio de Transição e a Bacia Carajás. (B) Mapa geológico de detalhe dos corpos graníticos mostrando a localização das amostras estudadas.



Fontes:
 (A) Modificado de Feio (2011).
 (B) Modificado de Dall'agnol et al. (2013).

1.3 Justificativa

O zircão ($ZrSiO_4$) ocorre como mineral acessório em uma grande variedade de rochas ígneas, sendo comum nas rochas félsicas e raro nas máficas e ultramáficas (HEAMAN; TARNEY, 1989). Levando em conta fatores como efeitos da temperatura, pressão, fugacidade de oxigênio e composição inicial do magma, pode-se admitir que cristais de zircão cristalizados a partir de diferentes magmas herdem assinaturas geoquímicas características de suas fontes (BELOUSOVA; GRIFFIN, 2002). Sua estabilidade química relativamente elevada a alterações *subsolidus*, somada a presença em sua estrutura cristalina de elementos traços característicos como Hf, Y, Nb, Th, U, Ca, ETR e P, têm permitido avanços importantes na caracterização de rochas fonte, na identificação de fracionamento de rochas ígneas e no estudo de proveniências (MURALI et al., 1983; HEAMAN et al., 1990; HOSKIN; IRELAND, 2000). Além disso, como na maioria das rochas ígneas saturadas em sílica o zircão é o principal mineral contendo Hf, a razão Zr/Hf do cristal deve ser próxima da razão do magma original (WANG et al., 2010). De acordo com Wang et al. (2000), zircões ricos em Hf são típicos de granitos evoluídos enriquecidos em metais raros (Sn, Mo, Ta, W, Li) e sua ocorrência seria indicativa da transição de granitos para pegmatitos a metais raros. Além disso, granitos especializados e corpos de greisens associados possuem zircões com enriquecimento significativo em Hf e baixas razões Zr/Hf, indicando que a composição desse mineral pode ser utilizada preliminarmente na prospecção de granitos e greisens mineralizados em Sn e metais associados (WANG et al., 2000; KEMPE et al., 2004; LAMARÃO et al., 2007, 2010, 2014b).

Cristais de zircão mostram, portanto, grande variação morfológica, textural e composicional que podem ser úteis para o entendimento de sua história de cristalização e de suas rochas hospedeiras. Zoneamentos composicionais em zircão marcam domínios geoquímicos distintos formados, provavelmente, em épocas diferentes. Tais zoneamentos comumente refletem variações nos conteúdos de Zr e Si, além de Hf, Y, Th, U, P e elementos terras raras (ETR) encontrados na sua estrutura (HEAMAN et al., 1990; KEMPE et al., 1997, 2004; UHER, 1998; HOSKIN; IRELAND, 2000; PUPIN, 2000; WANG et al., 2000; BELOUSOVA; GRIFFIN, 2002). A utilização de imagens de CL e ERE acompanhadas de análises químicas pontuais por EDS, microsonda eletrônica ou LA-ICP-MS têm sido empregadas para identificar variações elementares na estrutura de zircão magmático (HANCHAR; MILLER, 1993; HANCHAR; RUDNICK, 1995; FOWLER et al., 2002), núcleos herdados, zoneamentos composicionais, bordas de sobrecrescimento (VAVRA et al., 1996; CORFU et al., 2003; WANG et al., 2010) e inclusões de outros minerais.

1.4 Objetivos

A Linha de Pesquisa em Quartzo e Zircão (LPQZ), vinculada ao Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Federal do Pará (UFPA), vem desenvolvendo trabalhos de caracterização desses minerais em rochas graníticas utilizando microscopia eletrônica de varredura, catodoluminescência, elétrons retroespalhados e análises semiquantitativas por espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (MEV-CL-ERE-EDS), equipamentos pertencentes ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LABMEV) do IG-UFPA. Este trabalho é uma consequência dos avanços que a LPQZ vem alcançando no transcorrer dos anos e seus objetivos são destacados a seguir:

1- Gerar imagens de ERE e CL em um MEV permitindo identificar feições internas dos cristais de zircão tais como, zoneamentos composicionais, núcleos herdados, bordas de sobrecrecimento, inclusões, entre outras, além da realização de análises químicas pontuais semiquantitativas utilizando a espectrometria por dispersão de energia (EDS) nessas feições intracristalinas;

2- Através de diagramas geoquímicos específicos, comparar as análises químicas dos zircões presentes em cada corpo buscando assinaturas geoquímicas características;

3- Avaliar o potencial de utilização da composição do zircão como indicativo da natureza do magma granitoide que o gerou.

2 METODOLOGIA DE TRABALHO

2.1 Revisão Bibliográfica

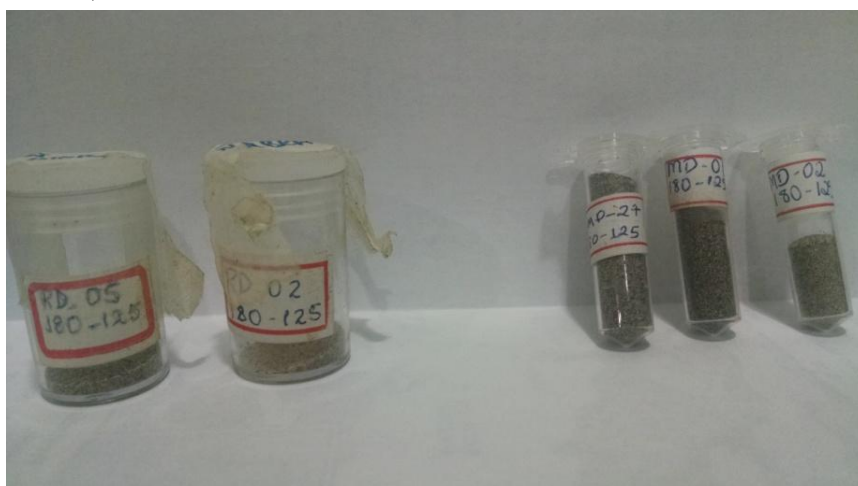
Esta etapa de trabalho envolveu o levantamento bibliográfico que foi utilizado como base para a construção do trabalho, sendo consultados:

- Dissertações e publicações versando sobre a geologia e a geoquímica da região e dos corpos graníticos estudados (p.ex. HUHNS et al., 1999; TASSINARI; MACAMBIRA, 2004; OLIVEIRA et al., 2010; FEIO, 2011; FEIO et al., 2012; DALL'AGNOL et al., 2013);
- Livros e apostilas envolvendo princípios básicos e aplicações em MEV (p.ex. REED, 1996; ANA MARIA MALISKA, Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Mecânica – LABMAT);
- Publicações referentes ao estudo morfológico e composicional de zircões através de MEV-CL-ERE-EDS (p.ex. UHER et al., 1998; PUPIN, 2000; WANG et al., 2000; BELOUSOVA; GRIFFIN, 2002; CORFU et al., 2003; KEMPE et al., 2004; LAMARÃO et al., 2007, 2010, 2014b).

2.2 Confeção de seções polidas

Foram fornecidos cinco concentrados de zircão (Figura 3) provenientes dos trabalhos de Santos (2009), Silva (2009) e Souza (2009) para confecção de cinco seções polidas (Figura 5), que foram utilizadas nos estudos morfológicos e composicionais através de MEV-ERE-CL-EDS. Cada seção contém aproximadamente 100 zircões representativos dos diferentes corpos graníticos estudados; os cristais de zircão foram selecionados manualmente com o auxílio de uma lupa binocular e dispostos em lâmina para posterior confecção das seções polidas.

Figura 3- Concentrados de zircão fornecidos para análise; à esquerda: concentrados RD-02 e RD-05; à direita: concentrados AMP-27, MD-01 e MD-02.



A seguir são descritos os procedimentos de preparação e polimento das seções após a fase de coleta dos zircões; este processo foi realizado no Laboratório de Laminação do PPGG-IG-UFPA, sob a coordenação da técnica em mineração Joelma de Jesus Lobo, que forneceu todas as informações citadas abaixo, referentes as etapas de preparação das amostras.

Etapa 1- Identificação da amostra

- 1- Separar a amostra;
- 2- Lavar com álcool isopropílico;
- 3- Identificar e colocar para secar em estufa a temperatura de 40 graus por 18 horas.

Etapa 2- Preparação da forma

- 1- Em uma lâmina de vidro limpa e seca (45x25mm), espalhar, com um bastão de vidro, desmoldante PVC (Separol) em quantidade suficiente para cobrir uma das faces; deixar secar na chapa aquecedora a 50°;
- 2- Após secagem, prender uma tira de fita dupla face sobre a superfície da lâmina na qual foi passado o separol;
- 3- Escolher um molde circular (geralmente de plástico) com diâmetro adequado; em seguida deve-se limpar e secar a seção cobrindo toda a área interna com uma camada generosa de separol. Deixe secar na chapa aquecedora a 50°.
- 4- Na lupa, com o auxílio de uma agulha, dispor os cristais de zircão de maneira que se obtenha uma malha com no máximo 10 colunas por 10 linhas. Cada seção (*mount*) deve ter no máximo 100 cristais, com os cristais maiores colocados sempre nas extremidades;

Etapa 3- Montagem da seção

- 1- A montagem deve ser feita em capela com sistema de exaustão eficiente, observando-se todas as normas de segurança;
- 2- Em um vidro de relógio, preparar a solução para montagem com uma proporção de três partes de resina epóxi GY-837(AROTEC) para uma parte de endurecedor HY-951(AROTEC), aquecer rapidamente na placa aquecedora a 50 graus para que a solução fique homogênea;
- 3- Após, preencher a forma com a solução anteriormente preparada, utilizando um bastão de vidro; distribuir gota a gota a solução até o total preenchimento;
- 4- Em seguida, colocar a seção em câmara de impregnação à vácuo (EPOVAC-STRUELR) por 15 minutos para que a sessão fique isenta de bolhas de ar;
- 5- Deixar secar em temperatura ambiente dentro da capela, por vinte e quatro horas.

Etapa 4- Polimento

Material necessário:

- Placa de vidro 300x300mm;
- Lixa d'água 1200, 2500 e 4000micra marca BUEHLER;
- Pano para polimento metalográfico modelo RAM e SUPRA marca Arotec e MICROCLOT marca BUEHLER;
- Pasta de diamante para polimento metalográfico AROTEC de 1 e 0,25micra;
- Lubrificante azul(não ferrosos) para polimento metalográfico AROTEC.

01- Sacar a seção manualmente, forçando para que ela se desprenda da placa de vidro;

02- Lixar manualmente, primeiramente com a lixa de 1200 sobre a placa de vidro (Figura 4) em movimentos circulares, exercendo pouca pressão, até retirar toda a fita dupla face, após lavar em ultrassom por 5 mim; trocar pela lixa de 2500 e continuar o lixamento repetindo o mesmo movimento, após, lavar em ultra som; e lixar utilizando a lixa 4000 repetindo o mesmo movimento, após, lavar em ultra som;

03- Montar superfície para polimento, utilizando para isso um pano de polimento (Ram-AROTEC) com pasta para polimento diamantado de 1# diluída com óleo lubrificante (AROTEC) sobre placa de vidro; repetindo os mesmos movimentos circulares; após, lavar em ultra som;

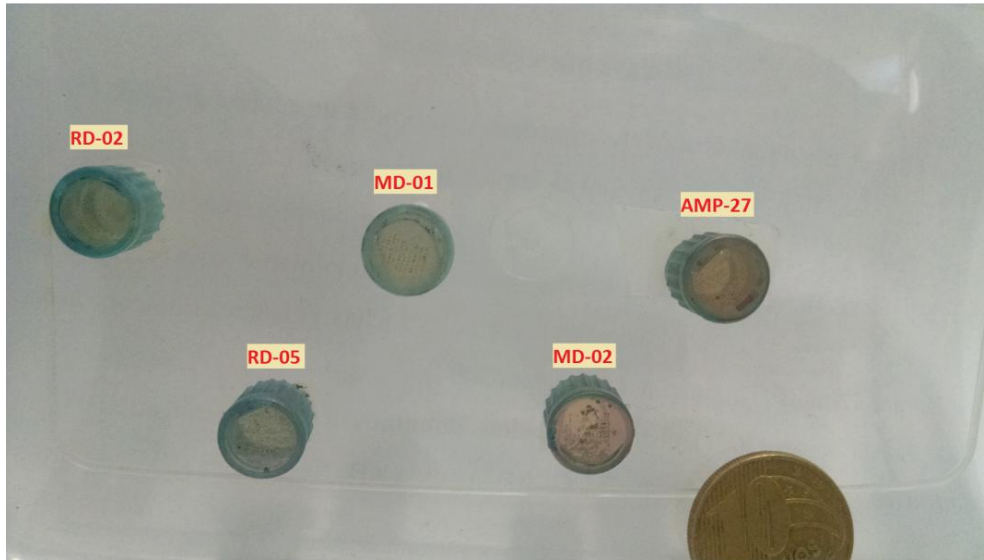
04- Montar superfície para polimento, utilizando para isso um pano de polimento (Ram-AROTEC) com pasta para polimento diamantado de ¼ de micra(AROTEC) sobre placa de vidro;

Figura 4- Exemplo de polimento manual das seções. Laboratório de Laminação (PPGG-IG-UFGA).



A figura abaixo mostra as seções polidas concluídas para a aplicação no MEV, e a Tabela 1 mostra a relação das seções utilizadas e a quantidade de zircões analisados neste trabalho.

Figura 5- Seções polidas de cada amostra contendo os zircões estudados.



Fonte: este estudo.

Cada seção possui aproximadamente 100 zircões, porém a quantidade analisada é menor, pois nem todos os cristais forneceram boas imagens.

Tabela 1- Quantidade de zircões e seções polidas estudadas neste trabalho.

Granitos	Seções	Zircões analisados
Planalto	RD-02	20
	RD-05	21
Vila Jussara	AMP-27	32
	MD-01	38
	MD-02	20
Total	5	131

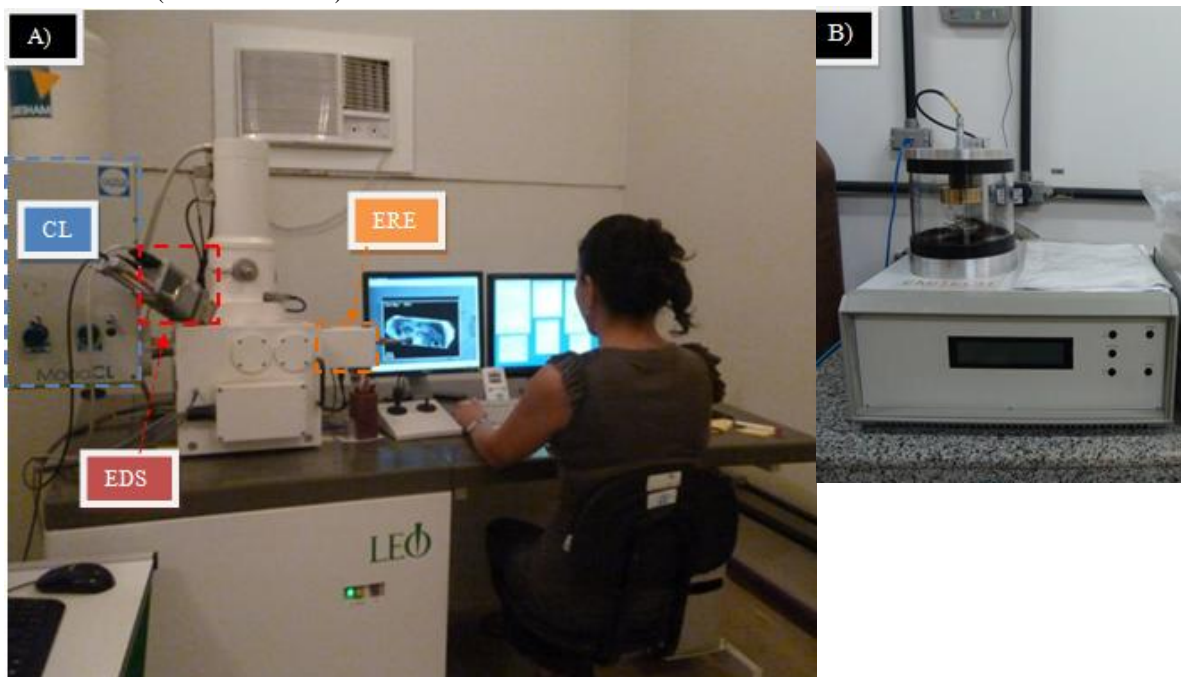
Fonte: este estudo.

2.3 Microscopia eletrônica de varredura

As análises de MEV foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura-LABMEV do IG-UFGA (Figura 6a) sob orientação do Prof. Claudio Nery Lamarão e auxílio da bolsista Ana Paula Picanço Correa.

O MEV utilizado foi o LEO-ZEISS 1430 do IG-UFGA com sistema de Mono-CL da Gatan e detector de EDS Sirius-SD acoplados. As seções polidas foram metalizadas durante 30s com ouro (Figura 6b) para o imageamento de CL e mais 30s para ERE e análises de EDS. As condições de operação para obtenção de imagens de ERE e análises por EDS foram: corrente do feixe de elétrons = 90 μ A, voltagem de aceleração constante = 20 kV, distância de trabalho = 15 mm. As imagens de CL foram obtidas sob as mesmas condições, exceto a voltagem de aceleração que foi de 10 KV e a distância de trabalho de 13 mm. As análises de EDS utilizaram o padrão ZAF ($Z=n^{\circ}$ atômico, A =absorção atômica, F =fluorescência de Raios-X), que já vem instalado com o *software* EDS 2008 e faz correções entre pico e *background* do elemento. O tempo de aquisição das análises de EDS foi de 30s com 4000 a 5000 contagens/segundo para cada análise. Foram realizadas análises nas diferentes zonas composicionais dos cristais evitando-se, com a ajuda de imagens de ERE e CL, regiões de fraturas e inclusões. Os elementos analisados foram: O, Si, Zr, Hf, Ce, Nb, Ta, P, Y, Th, U, Ba e Ca. Os resultados foram tratados e interpretados em diagramas geoquímicos através do programa GCDkit 3.0. Os elementos Zr, Hf, Nb, Ca e Ta apresentaram concentrações distintas e foram utilizados como parâmetros de diferenciação geoquímica entre os grupos de zircão estudados.

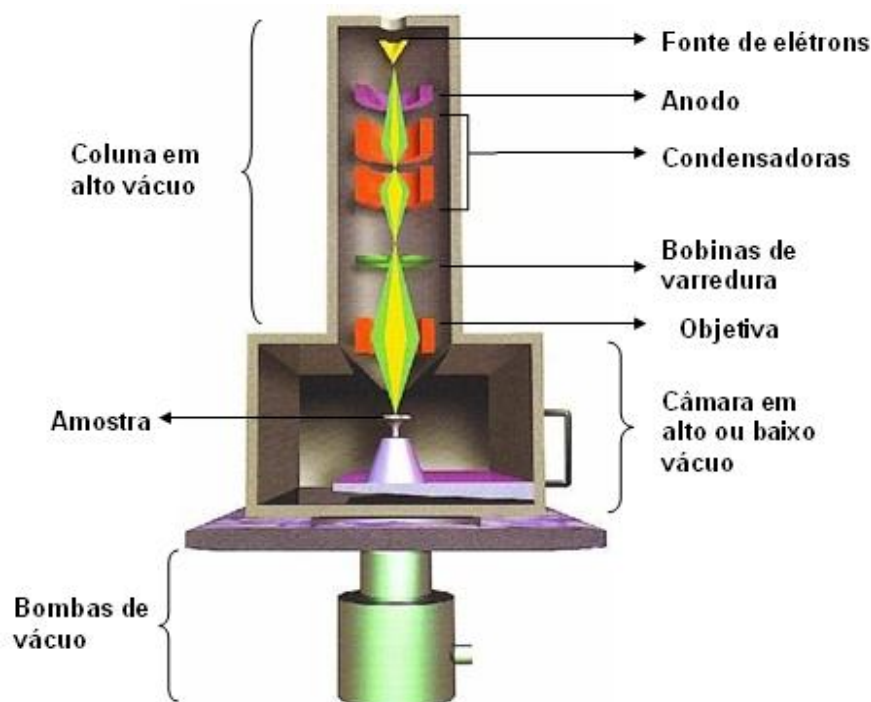
Figura 6- A) Microscópio eletrônico de varredura (MEV) mostrando a localização do detector de elétrons retroespalhados (ERE) e dos acessórios: Catodoluminescência (CL) e Espectrometria por Dispersão de Energia (EDS); B) Metalizador a ouro utilizado. (LABMEV-UFGA).



O princípio de funcionamento do MEV (Figura 7) consiste na emissão de um feixe de elétrons para geração das imagens, pois estes apresentam comprimento de onda menor que a luz visível, possibilitando a obtenção de imagens com resoluções em escala micrométrica (μ) e nanométrica (n). Os feixes são gerados por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 200 V a 30 KV. Essa variação de voltagem provoca o aquecimento do filamento permitindo a modificação da aceleração dos elétrons. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando na aceleração em direção ao mesmo. A correção do percurso dos feixes é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva. As bobinas de varredura são responsáveis pela varredura do feixe sobre a amostra e a objetiva ajusta o foco dos feixes de elétrons antes dos elétrons atingirem a amostra analisada, todo este processo ocorre dentro da coluna em alto vácuo.

Dentro da câmara de vácuo está situado o detector de elétrons retroespalhados responsável pela geração das imagens ERE, e o detector de elétrons secundários que originam imagens com grandes ampliações e melhor resolução. As imagens de catodoluminescência e as análises químicas por EDS são geradas somente com o uso de equipamentos complementares como a Mono-CL da Gatan e o EDS Sirius-SD da IXRF Systems, usados neste estudo (Figura 6).

Figura 7- Desenho esquemático ilustrando o princípio de funcionamento do MEV e seus componentes internos.



Abaixo são dissertados conceitos básicos sobre as técnicas utilizadas neste trabalho, tendo objetivo didático e de exemplificação. Estas informações são apresentadas de modo mais aprofundado no livro de Reed (1996) e na apostila de Ana Maria Maliska Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Mecânica – LABMAT.

2.3.1 Elétrons retroespalhados

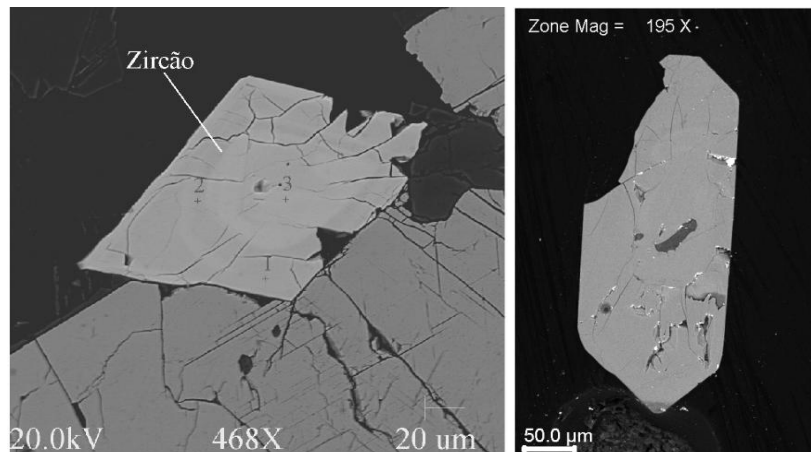
Antes de comentar sobre este tipo de imageamento, é válido mencionar que existe uma variação da velocidade do feixe de elétrons quando estes interagem com a amostra. As interações onde ocorre a mudança na trajetória do elétron, sem que resulte na variação da sua energia cinética são denominadas de interações elásticas. Aquelas em que há transferência de energia do elétron primário para os átomos da amostra são chamadas de interações inelásticas. Como resultado de uma sequência de interações elásticas e inelásticas o elétron pode se tornar um elétron retroespalhado (ERE), que produz um sinal muito importante para a obtenção de imagens no MEV. Quando a energia máxima é igual ou próxima à energia do elétron primário (neste caso ocorreu somente uma única colisão), os elétrons sofreram espalhamento elástico e são estes que formam a maior parte do sinal de ERE.

Se o elétron penetra no átomo de maneira a alcançar o núcleo, o potencial *coulombiano* do núcleo carregado positivamente irá influenciar na velocidade do elétron. Classicamente, este mecanismo de interação é conhecido como espalhamento Rutherford e o desvio do elétron da sua trajetória inicial pode ser calculado com boa precisão. A força que atua sobre o elétron ao se aproximar do núcleo é a força de Coulomb, portanto diretamente proporcional a carga do núcleo, ou seja, ao número atômico Z .

A proporção de ocorrência do espalhamento elástico com relação ao espalhamento inelástico depende da profundidade de penetração dos elétrons na amostra, e isto está absolutamente vinculado a composição do material que está sendo atingido pelo feixe de elétrons. O espalhamento inelástico causa a redução na velocidade do feixe de elétrons sendo mais intenso para os materiais com elevados Z do que para materiais com baixo número Z . Assim sendo, apesar do espalhamento elástico aumentar para materiais com elevado Z , a profundidade de penetração é menor do que para materiais de baixo número atômico.

Com isso, o sinal gerado pelos elétrons retroespalhados é diretamente proporcional ao valor médio do Z do material atingido pelo feixe (Figura 8), este é o mais importante mecanismo de contraste dos ERE. Quanto maior o Z do material, menor o volume de interação, e conseqüentemente maior o brilho da imagem produzida.

Figura 8- Exemplo de imagens em ERE, à direita: Cristal euédrico a subédrico de zircão em lâmina, mostrando fraco zoneamento e corrosão interna; à esquerda: Cristal euédrico a subédrico de zircão na forma de grão isolado, onde é possível visualizar microfraturas e inclusões.

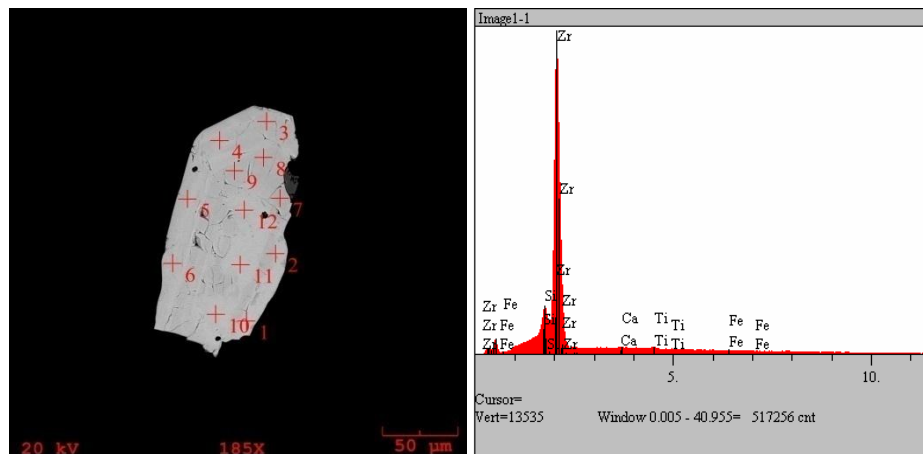


Fontes: à direita: modificado de Lamarão et al. (2007); à esquerda: este estudo.

2.3.2 Espectroscopia de raios-X por dispersão de energia (EDS)

As análises de EDS podem ser resumidas do seguinte modo: o feixe de elétrons ao incidir sobre um mineral excita os elétrons mais internos dos seus átomos, deslocando-os de suas órbitas, criando vacâncias e assim ionizando o átomo. Para retornar o átomo a um estado mais equilibrado possível, elétrons das camadas mais externas são trazidos para preencher as vacâncias. Quando esses elétrons são transferidos para os orbitais mais internos, são bruscamente desacelerados, e a diferença de energia cinética entre os orbitais é então emitida na forma de fóton com comprimento de onda no espectro de Raios-X, uma forma elevada de energia. Neste caso, o detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esses elétrons. Considerando que, no ponto de incidência do feixe, os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível determinar quais elementos químicos estão presentes naquele local e, assim, identificar a composição química do mineral que está sendo observado. Esta informação é processada pelo *software* EDS 2008 e ilustrada na tela do computador, mostrando os picos de cada elemento químico, tornando possível a identificação do mineral (Figura 9).

Figura 9- Exemplo de análise química utilizando EDS. (LABMEV-UFGA).



2.3.3 Catodoluminescência

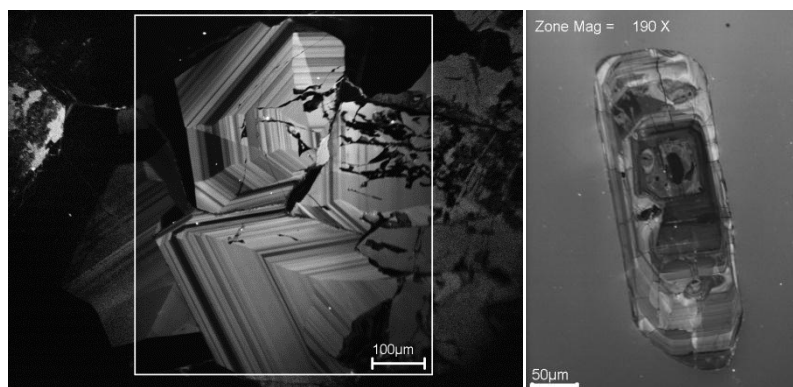
A incidência do feixe de elétrons estimula a emissão de luz pelo processo conhecido como Catodoluminescência (CL); a grande maioria dos materiais não metálicos fornece CL. Sumarizando, quando o feixe de elétrons atinge este tipo de material ocorre excitação dos elétrons na amostra, que, assim como no caso anterior, promove o deslocamento dos elétrons da banda de valência para outros níveis energéticos, a partir do qual eles retornam ao seu estado original em uma ou mais etapas. O excedente de energia dissipada pode ser de várias maneiras (Figura 11), uma das quais é a emissão de fótons (do mesmo modo como na emissão de Raios -X). Somente energias relativamente baixas (alguns elétrons volt) são envolvidas, e os comprimentos de onda caem dentro da região visível (por vezes, se estendendo para o ultravioleta ou infravermelho).

Como visto anteriormente, os raios-X são uma forma de energia muito elevada e de valores característicos que proporcionam a identificação dos elementos presentes. A CL está associada com energia de transição muito mais baixa, por isso ela não é governada pelos elementos presentes e nem é utilizada como uma técnica de análise de elementos; sua intensidade de emissão é fortemente influenciada pela densidade de defeitos na amostra, sendo comandada por fatores físico-químicos tais como, temperatura, estrutura cristalina, tensão, deformação, etc.

Minerais que exibem CL incluem o diamante, zircão, quartzo, coríndon, rutilo, cassiterita, espinélio, fluorita, calcita, apatita, esfalerita, feldspato, fosterita, entre outros.

Em materiais geológicos o uso desta técnica revela fases, núcleos e zoneamentos mineralógicos importantes, além de fraturas e informações diagenéticas frequentemente não observáveis com outras técnicas microscópicas (Figura 10). Em materiais semicondutores, diferentes microestruturas, defeitos de crescimento, perturbações em dispositivos e distribuição de impurezas podem ser observadas.

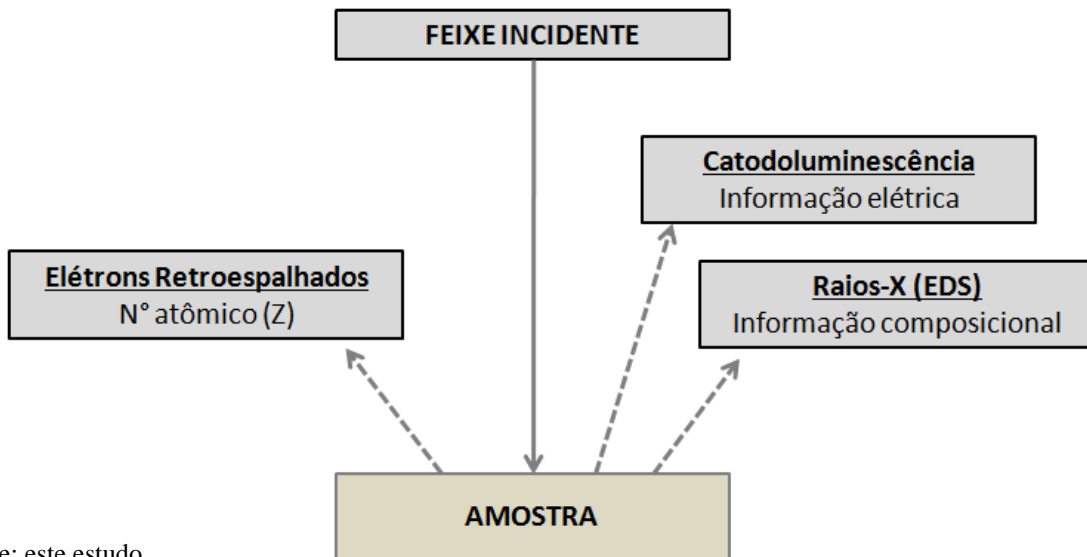
Figura 10- Exemplo de imagens em CL. À esquerda: Cristal de quartzo em lâmina; à direita: Cristal euédrico a subédrico de zircão. Em ambas as figuras é possível notar a diferença de qualidade com a imagem em ERE, o que permite melhor visualização de zoneamentos, inclusões, entre outras características dos cristais.



Fontes: à direita: Lamarão et al. (2014a); à esquerda: este estudo.

A figura abaixo resume, de maneira simplificada, a trajetória do feixe de elétrons que perde energia no seu caminho através do material. Esta energia é então liberada da amostra de diferentes formas, dependendo do tipo de interação entre o elétron primário e os átomos da amostra.

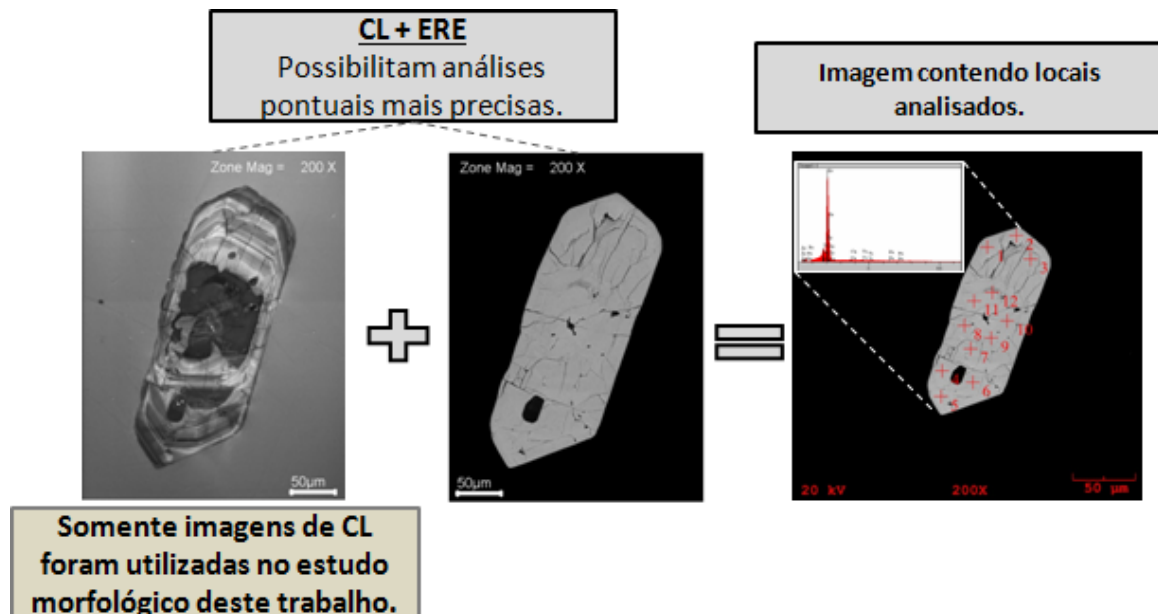
Figura 11- Alguns tipos de formas de energia, que são liberadas em consequência da interação do feixe de elétrons com a amostra.



Fonte: este estudo.

Em suma, os estudos morfológicos e as análises químicas efetuadas nos cristais de zircão foram possíveis com a aplicação das técnicas acima (Figura 12). As imagens de CL tornam possível o estudo morfológico e também revelam áreas de fraturas e inclusões que podem ser evitadas na análise química. O conjunto das imagens de CL e ERE permite a visualização de regiões nos cristais de zircão que serão analisadas pontualmente por EDS.

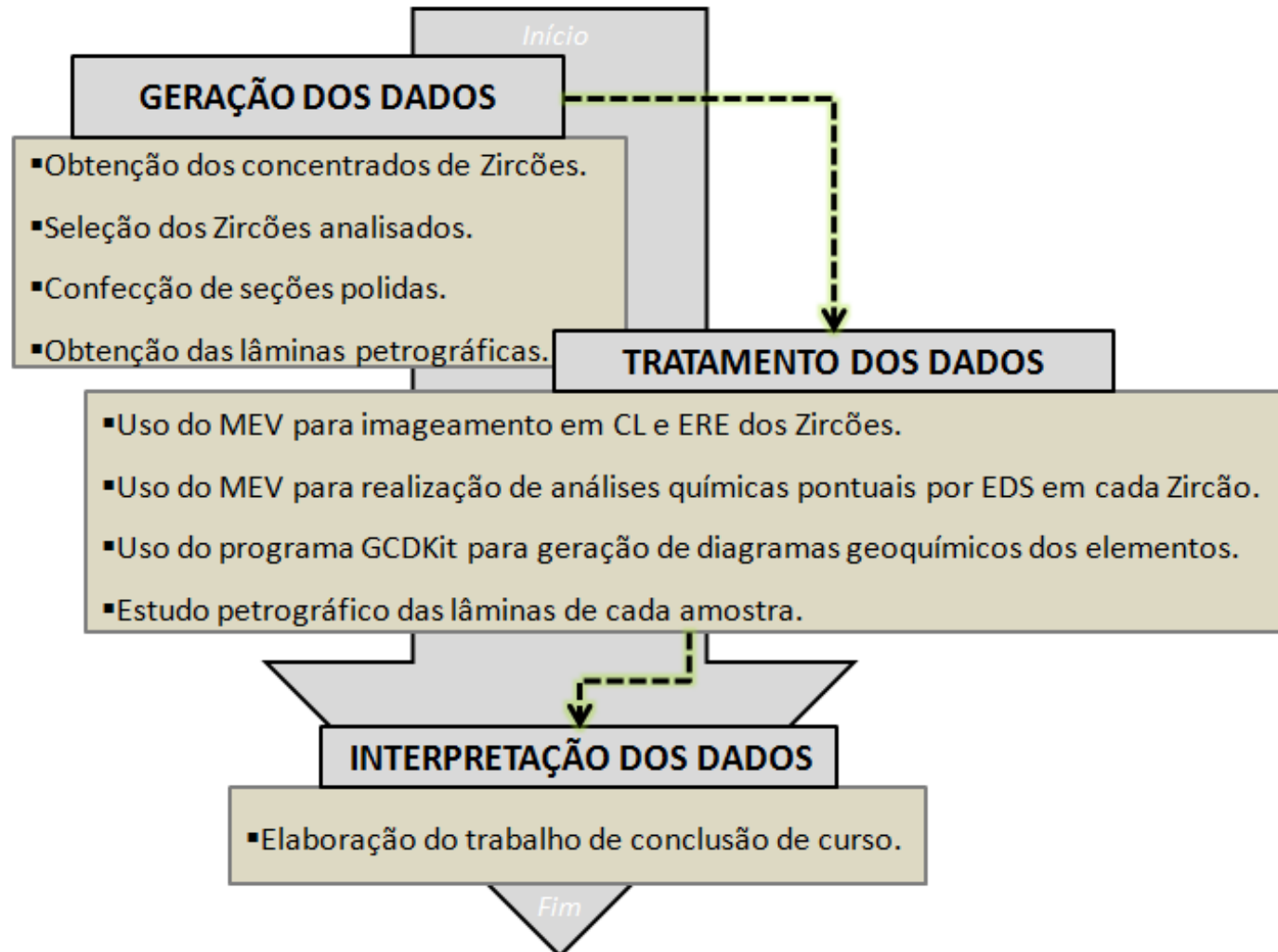
Figura 12- Demonstração do uso das técnicas deste trabalho, permitindo a realização dos estudos morfológicos e químicos nos cristais de zircão; neste exemplo são mostradas imagens CL e ERE do mesmo cristal.



Fonte: este estudo.

Uma síntese das atividades pode ser observada no fluxograma abaixo:

Figura 13- Fluxograma resumindo as atividades empregadas durante a pesquisa e confecção do Trabalho.



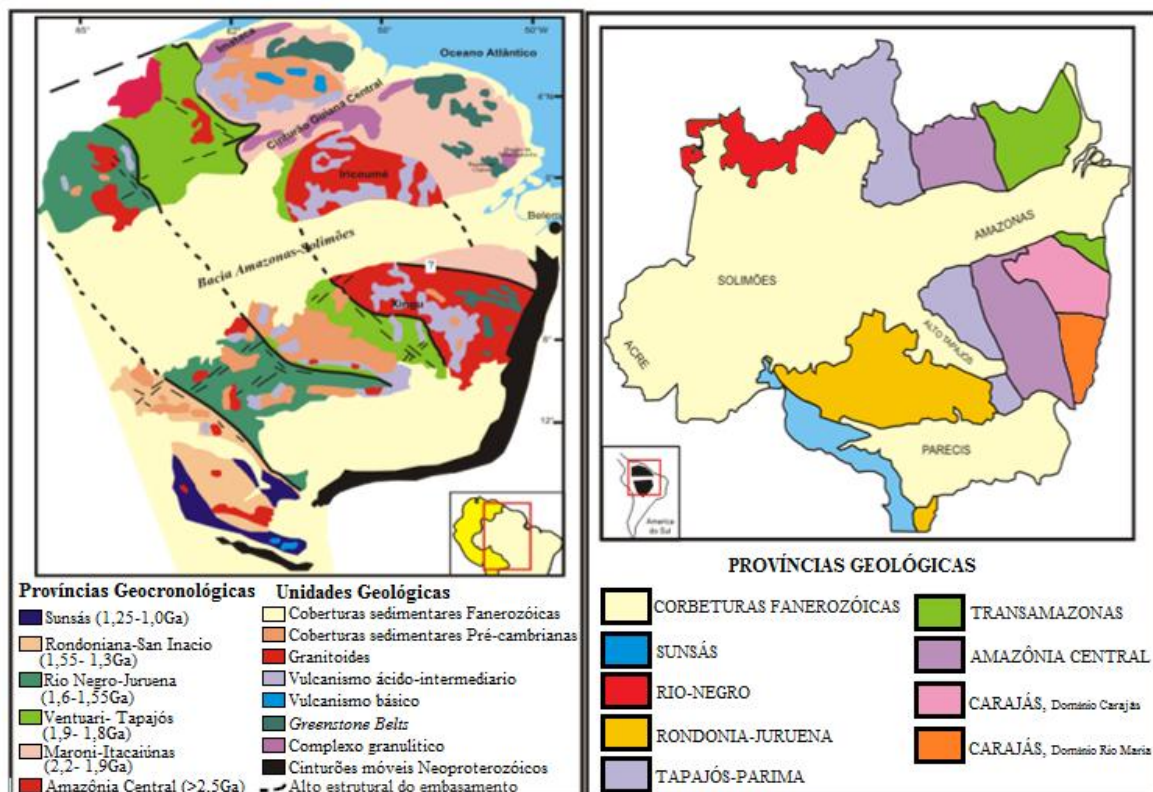
Fonte: este estudo.

3 CONTEXTO GEOLOGICO

3.1 Geologia regional

A Província Carajás está localizada na porção sudeste do Cráton Amazônico, o qual representa uma das principais unidades tectônicas da Plataforma Sul-Americana possuindo aproximadamente 4.500.000 km² de extensão e abrangendo a parte norte do Brasil, Guiana Francesa, Venezuela, Guiana, Suriname, Colômbia e Bolívia. É constituído pelos escudos das Guianas e Brasil Central, separados pelas bacias sedimentares fanerozóicas do Solimões e Amazonas (Figura 14). O mesmo é subdividido em províncias geocronológicas com idades e padrões estruturais distintos e evoluções geodinâmicas particulares (TASSINARI; MACAMBIRA, 2004, SANTOS et al., 2000). Tassinari e Macambira (2004) consideram que a Província Amazônia Central é o segmento mais antigo do Cráton Amazônico, sendo separada em dois blocos tectônicos principais: Carajás e Xingu-Iricoumé (Figura 14). Santos et al. (2000) consideram o bloco Arqueano de Carajás como uma província independente denominada Província Mineral de Carajás. Mas os diferentes autores concordam que a evolução do Cráton Amazônico é resultante de sucessivos episódios de acreção crustal durante o Paleoproterozóico e o Mesoproterozóico, em volta de um núcleo mais antigo, estabilizado no final do Arqueano, e que o mesmo constitui o principal núcleo arqueano do Cráton Amazônico.

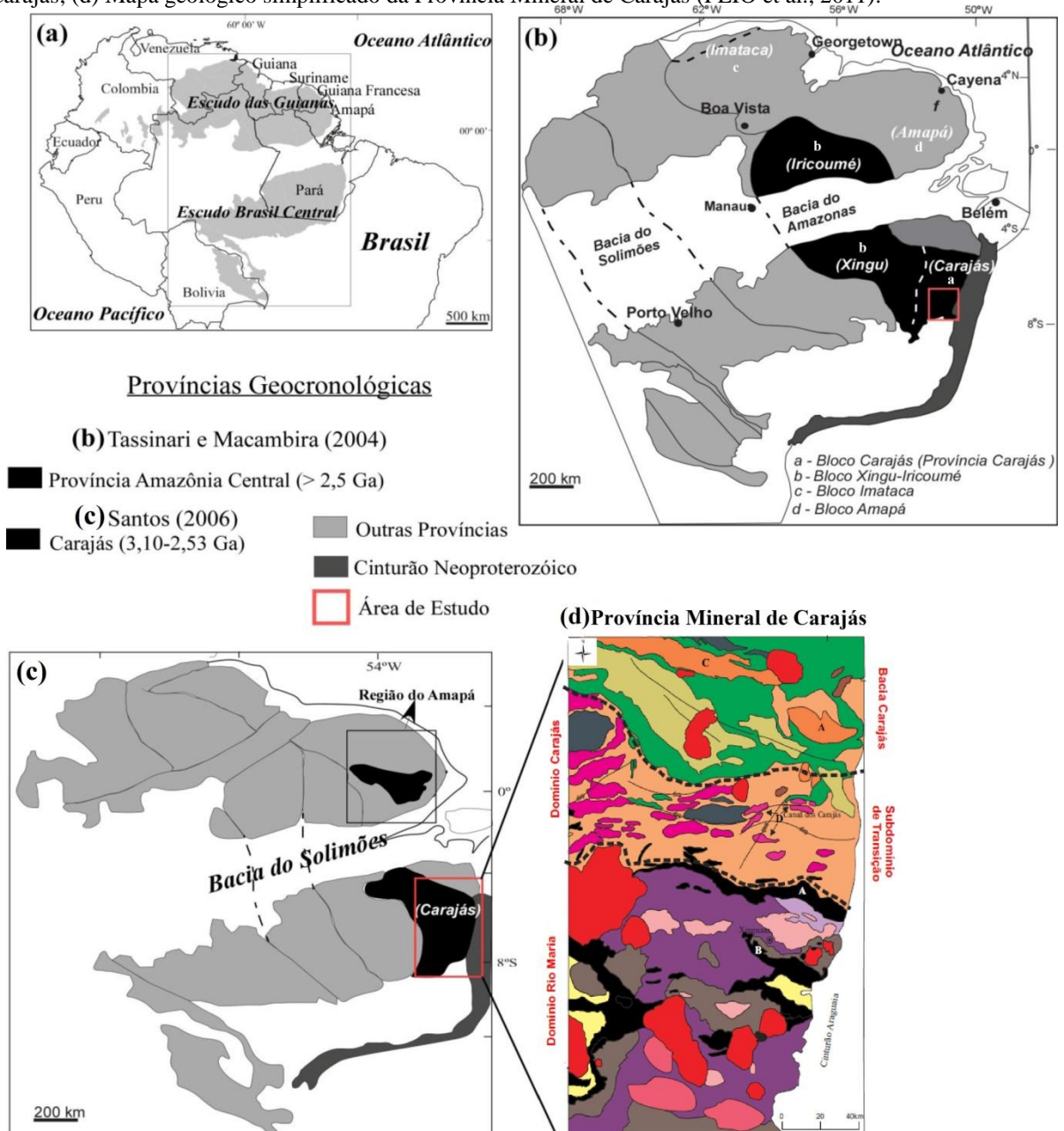
Figura 14- Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico: à esquerda Tassinari e Macambira (2004); à direita Santos et al. (2006).



3.1.1 Província Mineral de Carajás

A Província Mineral de Carajás, (Figuras 1,15d) é dividida ao norte em Domínio Carajás, que contém a Bacia Carajás e o Subdomínio de Transição, e ao sul em Domínio Rio Maria que contém o Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM) (SANTOS et al., 2000; TASSINARI; MACAMBIRA, 2004; DALL’AGNOL et al., 2005; VASQUEZ et al., 2008; FEIO, 2011). Ela é formada por intrusões graníticas anorogênicas do Paleoproterozóico em terrenos arqueanos, sendo limitada a norte pela Província Maroni-Itacaiúnas, formada durante o Evento Transamazônico (2.2-2.1 Ga), a leste pelo Cinturão Araguaia do Neoproterozóico, relacionado ao Ciclo Brasileiro (Pan-Africano), e a oeste por granitoides paleoproterozóicos e sequências vulcano-plutônicas do Supergrupo Uatumã, com idades próximas de 1.88 Ga (TEIXEIRA et al., 2002).

Figura 15- Províncias Geocronológicas do Cráton Amazônico, modificado de Almeida et al. (2011). (a) Mapa de localização do Cráton Amazônico; (b) Destaque para os blocos presentes no Cráton; (c) Delimitação do Bloco Carajás; (d) Mapa geológico simplificado da Província Mineral de Carajás (FEIO et al., 2011).



O magmatismo na **Bacia Carajás** não é inteiramente conhecido, gerando muitas dúvidas e contradições a respeito de sua evolução. A unidade litoestratigráfica mais marcante presente na bacia é expressa pelo Supergrupo Itacaiúnas (DOCEGEO, 1988, MACHADO et al., 1991, DALL'AGNOL et al., 2006) constituído principalmente por vulcanismo máfico e formações ferríferas. Ademais, tem-se o magmatismo máfico-ultramáfico do Complexo Luanga (MACHADO et al., 1991) e abundante número de intrusões graníticas subalcalinas: Complexo Granítico Estrela, granitos Serra do Rabo, Igarapé Gelado e Velho Salobo (MACHADO et al., 1991, BARROS et al., 2004, 2009, SARDINHA et al., 2006), seguido de extensa sedimentação representada pela formação Águas Claras (NOGUEIRA et al., 1995).

Segundo Souza et al. (2001) o **Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria**, foi derivado a partir de uma crosta oceânica composta principalmente de lavas basálticas e komatiíticas, metamorfozadas na fácies xisto verde. As suítes TTG foram originadas a partir de fontes geoquimicamente similares aos basaltos do Supergrupo Andorinhas (ALTHOFF et al., 2000; LEITE, 2001; ALMEIDA et al., 2011).

Segundo Almeida et al. (2013) os dados isotópicos de Nd, sugerem que a crosta do TGGRM foi formada durante o Mesoarqueano. Sua evolução magmática ocorreu entre 2,98 a 2,86 Ga e foi descrita ao longo de diversos trabalhos na região (PIMENTEL; MACHADO, 1994; MACAMBIRA; LAFON, 1995; ALTHOFF et al., 2000; DALL'AGNOL et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2009; ALMEIDA, 2011, 2013; FEIO, 2011) sendo dividida com base em características geocronológicas, geoquímicas e petrográficas, em cinco grupos principais:

(1) **Série tonalítica-trondhjêmica mais antiga**, representadas por *greenstone belts* do Supergrupo Andorinhas (2,98-2,90 Ga; metakomatiitos e metabasaltos com rochas metavulcânicas félsicas e intermediárias subordinadas, além de rochas metassedimentares) e por suítes TTG geradas em dois eventos distintos, o primeiro e mais antigo é representado pelo Tonalito Arco Verde (2,98 a 2,93 Ga) e Trondhjemito Mogno (~2,96 Ga), e o evento posterior é expresso pela formação do Complexo Tonalítico Caracol (~2,93 Ga) e do Tonalito Mariazinha (~2,92 Ga);

(2) **Granitoides predominantemente granodioríticos com alto Mg**, formados após um intervalo de 50 M.a., representados pela suíte sanukitóide Rio Maria com idade de 2,87 Ga; Compreende granodioritos, Quartzo-dioritos e rochas intermediárias e máficas associadas;

(3) **Suítes de leucogranodioritos e leucogranitos cálcico-alcalinos** ricos em Ba e Sr (2,87 Ga) oriundos da diferenciação de magmas sanukitóides, representados pela Suíte Guarantã, Granodiorito Grotão e rochas similares;

(4) **Granitoides da Série tonalítica-trondhjemitica** mais jovem representadas pelo Trondhjemitito Água Fria (~2,86 Ga.), gerados pela ascensão dos magmas sanukitoides que promoveram a fusão de metabasaltos localizados na base da crosta de Rio Maria;

(5) **Leucogranitos potássicos** (~2,86 Ga) possivelmente formados pela fusão de granitoides TTG, compostos pelos granitos Xinguara e Mata Surrão, além de rochas similares; de acordo com Leite et al. (1999) o Granito Xinguara é produto de cristalização de um magma formado por baixo grau de fusão de granitoides arqueanos tipo TTG ou afins do Granodiorito Rio Maria.

Os corpos amostrados se localizam na área de Canaã dos Carajás situada na região nordeste do subdomínio de Transição (SDT), este contido entre a região de Xinguara e a porção sul da Bacia de Carajás correspondente à região meridional do Domínio Carajás (DALL'AGNOL et al., 2006).

3.1.2 Subdomínio de Transição

Este subdomínio representa um segmento da Província Mineral de Carajás, localizado no Domínio Carajás (Figura 1), o qual foi interpretado como uma possível extensão do Domínio Rio Maria afetado pelos eventos neoarqueanos que moldaram a Bacia de Carajás (DALL'AGNOL et al., 2006). De modo geral o subdomínio é dominado por granitoides arqueanos com rochas granulíticas ou charnoquíticas subordinadas (VASQUEZ et al., 2008). Ele é constituído por sequências metavulcano-sedimentares, *greenstone belts* e diversos tipos de granitoides de idade Mesoarqueana (TTG, tonalitos a granodioritos cálcico-alcalinos, leucogranitos de afinidade cálcico-alcalina) e intrusões de granitoides neoarqueanos (granitos subalcalinos, tonalitos e trondhjemitos com alto Zr, Y e Ti e charnoquitos) onde se incluem o Granito Planalto e o Granito Vila Jussara. Araújo e Maia (1991) caracterizam cinematicamente o SDT como um regime compressivo oblíquo de orientação geral E-W, onde incluem unidades rochosas dos complexos Xingu e Pium, do grupo Sapucaia e granitos estratoides tipo Plaquê. No Paleoproterozóico, essas rochas foram cortadas por granitos anorogênicos (HUHN et al., 1988; DALL'AGNOL et al., 1997, 2006).

O **Complexo Pium** se dispõe na forma de corpos alongados com direção EW, sendo representado por granulitos intrusivos (DOCEGEO, 1988) ou sincrônicos e intimamente associados à zonas de cavalgamento (ARAÚJO et al., 1988). Santos et al. (2008) não consideram que o Complexo Pium seja constituído por rochas granulíticas, mas sim por rochas ígneas gabróicas, fundamentalmente noritos, quartzo-gabros e dioritos maciços a foliados, com variedades ricas em quartzo. Com isso, os granulitos e charnockitos a

enderbitos, da região entre a Aldeia Indígena Chicrim e o rio Cateté seriam considerados os únicos representantes do embasamento granulítico do Domínio Carajás, denominados por Vasquez et al. (2008) como ortogranulito Chicrim-Cateté.

O **Complexo Xingu** foi inicialmente denominado por Silva et al. (1974) para designar uma associação heterogênea de rochas compostas por granulitos, gnaisses, migmatitos, faixas de *greenstone belts*, complexos básicos-ultrabásicos e diversos granitoides (DOCEGEO, 1988). Atualmente este complexo se encontra restrito apenas ao Bloco Carajás onde apresenta amplas áreas de ocorrências, porém a escassez de informações sobre as rochas pertencentes à série TTG, assim como outros granitoides presentes, pode significar que o Complexo Xingu representa uma associação de unidades ainda não individualizadas e não um verdadeiro complexo, da mesma maneira como se verificou no TGGRM (DALL'AGNOL et al., 1997). Trabalhos recentes mostram que na região compreendida entre os municípios de Canaã dos Carajás e Água Azul do Norte, rochas anteriormente relacionadas ao Complexo Xingu, estão sendo individualizadas em corpos de composições variadas e áreas de ocorrência bem definidas (SANTOS, 2009; SILVA, 2009; SOUZA, 2009; FEIO, 2011).

A **Suíte Plaquê** foi definida originalmente por Araújo e Maia (1991) como corpos de leucogranitos foliados e alongados em contato intrusivo com rochas do Complexo Xingu, controladas por um *trend* E-W. Esta suíte é composta por muscovita-biotita-leucogranitos com assinatura metaluminosa a peraluminosa, o que levou Araújo et al. (1988) a caracterizarem tais granitoides como do tipo S. Avelar (1996) obteve a idade mínima de 2,72 Ga pelo método de Pb-Pb em zircão para cristalização desses corpos.

Estudos atuais no SDT (OLIVEIRA et al., 2010; GABRIEL, 2012; FEIO et al., 2013; SILVA, 2014; SANTOS, 2013; TEIXEIRA, 2013) proporcionaram uma melhor explicação para o seu contexto geológico. Trabalhos desenvolvidos na área de Canaã dos Carajás, na porção norte do SDT junto à borda sul da Bacia Carajás, destacaram a ocorrência de rochas granitoides mesoarqueanas, representadas pelo Granito Canaã dos Carajás, Trondhjemitó Rio Verde, Complexo Tonalítico Campina Verde, Granitos Bom Jesus, Cruzadão e Serra Dourada (FEIO et al., 2013), estas seccionadas pelos granitos da Suíte Planalto (FEIO et al., 2012) e tonalitos e trondhjemitos da Suíte Pedra Branca (GOMES; DALL'AGNOL, 2007; FEIO et al., 2013), todos de idade neoarqueana. Feio et al. (2013) mostraram evidências geológicas e isotópicas que a região de Canaã dos Carajás apresenta evolução distinta daquela do Domínio Rio Maria, enfraquecendo assim a hipótese de que a porção norte do SDT represente uma simples extensão daquele domínio, retrabalhada durante o neoarqueano.

Os estudos efetuados na porção centro-leste do SDT, se estendendo de Água Azul do Norte até as proximidades de Sapucaia, no limite do Cráton Amazônico com o Cinturão Araguaia, revelaram um quadro geológico bem distinto daquele de Canaã dos Carajás e mais próximo do que se observa no Domínio Rio Maria. Nesta área dominam amplamente associações TTG e granodioritos de alto Mg, representados pelos Granodioritos Água Azul e Água Limpa (GABRIEL, 2012), todos de idade mesoarqueana, assim como rochas tonalíticas distintas das associações TTG clássicas (Tonalito São Carlos), leucogranodioritos (Granodiorito Pantanal e similares) e granitos afins, respectivamente, daqueles da Suíte Guarantã e dos granitos potássicos do Domínio Rio Maria. Estas unidades são seccionadas pelos granitoides neoarqueanos das suítes Planalto e Vila Jussara.

Com os dados obtidos nestes estudos Dall’Agnol et al. (2013a) e Dall’Agnol et al., (2013b), dividem o SDT em dois domínios distintos: Domínio Canaã dos Carajás e Domínio Sapucaia. O primeiro corresponde à porção norte do SDT e é caracterizado pela dominância de granitos *stricto sensu* e associações charnockíticas com raras ocorrências de TTGs. Ele se estende de Canaã dos Carajás para oeste aparentemente até a área da reserva Chicrim-Cateté, os diferentes granitoides se mostram imbricados e alongados e revelam um padrão muito distinto do observado nos domínios Sapucaia e Rio Maria. As rochas do Domínio Canaã dos Carajás são o provável embasamento da Bacia Carajás.

O segundo domínio ocupa a porção sul do SDT, se estende de Água Azul do Norte no sentido leste até o limite com o Cinturão Araguaia, sendo delimitado por expressiva zona de cisalhamento que exhibe orientação próxima de E-W nas proximidades de Água Azul do Norte e mostra inflexão para NE, passando nas cercanias de Canaã dos Carajás e se estendendo para a Serra do Rabo. A zona de cisalhamento E-W se estende até o limite com o Cinturão Araguaia e é marcada por corpos de granitoides neoarqueanos das suítes Planalto e Vila Jussara. É provável que esta zona seja o limite aproximado de ocorrência para sul dos granitoides neoarqueanos. Estes granitoides são característicos do Domínio Rio Maria, porém diferem do mesmo por se encontram intensamente recristalizados, estando assim relacionados ao SDT.

3.2 Geologia local

3.2.1 Granito Planalto

O Granito Planalto pertence à suíte homônima e foi originalmente descrito por Huhn et al. (1999) na região de Canaã dos Carajás, nas proximidades de Vila Planalto, onde era inicialmente inserido no contexto da suíte Plaquê de Araújo e Maia (1991). Foi caracterizado como um *stock* granítico milonitizado nas bordas e com baixa taxa de deformação em sua porção central. São corpos metaluminosos e peraluminosos e demonstram características geoquímicas típicas de granitos tipo A (FEIO et al., 2012). Apresentam ainda idades coincidentes, entre 2,74 Ga e 2,73 Ga, obtidas pelo método Pb-Pb em zircão (HUHN et al., 1999; SARDINHA et al., 2004; SANTOS, 2009), interpretadas como as idades de cristalização/colocação do granito.

A suíte Planalto é composta por granitos com composição variando de monzogranito a sienogranito, com feldspato alcalino-granito subordinado e conteúdos modais diversificados de biotita e hornblenda. Relíquias de clinopiroxênio em coronas de anfibólio estão presentes em algumas amostras. Os minerais acessórios primários são zircão, apatita, allanita, ilmenita ± magnetita ± titanita ± fluorita. E os minerais secundários são epidoto, muscovita, clorita ± escapolita ± carbonato ± titanita ± turmalina (FEIO et al., 2012).

Sardinha (2005) caracterizou a oeste de Canaã dos Carajás, sul da localidade de Vila Feitosa, mais uma ocorrência de granitos do tipo Planalto, correlacionando-os aos granitos do tipo A neoarqueanos da Bacia Carajás. Isto foi corroborado em estudos mais detalhados que mostraram que o magmatismo granítico da região de Vila Feitosa possui idade Pb-Pb em zircão de 2734 ± 2 Ma, sendo formado por rochas de composição monzogranítica, subordinadamente sienogranítica, com diferentes razões anfibólio/biotita, além de ocorrências locais de pulsos magmáticos isotrópicos, similares aos corpos anorogênicos da Província Mineral de Carajás (SANTOS; OLIVEIRA, 2008; SANTOS, 2009).

O trabalho de Feio et al. (2012) descreve em detalhes a suíte Planalto, indicando que ela consiste em vários plútons graníticos com menos de 10 km na sua maior dimensão, alongados na direção E-W em coerência com o *trend* estrutural regional EW presente no SDT. Estes plútons são intrusivos em granitoides mesoarqueanos, no Complexo Pium e no Supergrupo Itacaiúnas de idade neoarqueana. No geral esta suíte é preferencialmente associada com as rochas máficas do Complexo Pium e com a Suíte Pedra Branca.

A origem magmática da Suíte Planalto foi definida por Feio et al. (2012). O modelamento geoquímico realizado com o uso do *software* Genesis 4.0 (TEIXEIRA, 2005), revelou que as rochas do Complexo Pium, com destaque para o norito e a associação quartzo-gabro, poderiam ser as principais fontes dos magmas a partir do qual cristalizaram as rochas da Suíte Planalto. O modelamento geoquímico também sugere que a suíte Planalto poderia ser derivada da fusão parcial de rochas máficas a intermediárias toleíticas portadoras de ortopiroxênio, que são similares as rochas do Complexo Pium. Este segundo tipo de fonte está relacionado ao padrão de magmas reduzidos, como é o caso do Granito Planalto que apresenta razão $\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO}) > 0.88$ (FEIO et al., 2012).

3.2.2 Granito Vila Jussara

O Granito Vila Jussara pertence à suíte homônima que é formada por granitoides que afloram em cinco corpos alinhados segundo E-W nas proximidades de Vila Jussara. É constituída por granitos, granodioritos e tonalitos com assinatura geoquímica alcalina, caráter ferroso, baixo conteúdo de Al_2O_3 e enriquecimento em Zr, Y e Nb, indicando afinidade com granitos tipo A oxidados. As rochas dominantes são biotita-anfibólio granitos que formam as porções centrais dos corpos maiores ou a totalidade dos corpos menores (SILVA, 2014; TEIXEIRA, 2013).

Datações geocronológicas preliminares pelo método de evaporação de Pb em zircão em biotita-anfibólio granodioritos/tonalitos forneceram idades variáveis entre 2748 ± 2 Ma e $2752 \text{ Ma} \pm 2$ (SOUZA, 2009; SILVA, 2009).

4 PETROGRAFIA

As lâminas analisadas neste estudo foram adquiridas de trabalhos anteriores (SANTOS, 2009; SOUZA, 2009; SILVA, 2009) que fornecem uma análise petrográfica mais completa sobre os corpos graníticos. Neste trabalho, o estudo petrográfico é inteiramente descritivo e com o objetivo de classificar as rochas tornando possíveis as considerações e comparações geoquímicas entre os zircões e os corpos graníticos amostrados.

4.1 Granito Planalto

Não foram encontradas as lâminas pertencentes aos pontos amostrados no granito Planalto, as descrições são de lâminas que representam pontos próximos daqueles amostrados e que são designados pela fácies Hornblenda-Biotita Monzogranito intensamente a moderadamente deformado (SANTOS, 2009).

As lâminas são constituídas mineralogicamente por cristais de quartzo (45,64%), K-feldspato (16,65%), plagioclásio (22,25%) e minerais máficos como biotita (6,73%) e anfibólio (7,73%), além de minerais acessórios (zircão, titanita, allanita, apatita e opacos).

Minerais essenciais

Quartzo: São cristais anédricos e inequigranulares de granulação fina a média oriundas provavelmente da deformação, com raros cristais possuindo granulação grossa (Figura 16 B). Os cristais de granulação fina apresentam extinção ondulante moderada a forte, ocorrem como produto de recristalização e concentram-se em certas zonas das rochas onde formam agregados entre si ou com cristais de feldspatos, exibem contatos retilíneos a levemente curvos, por vezes poligonais. Este mineral também ocorre localmente, na forma vermicular ou de gotículas, gerando intercrescimento mimerquítico associado aos plagioclásios (Figura 16 F).

K-Feldspato (Microclina): seus cristais são predominantemente subédricos apresentando granulação fina a grossa, com formação de fenocristais apresentando microfraturamento preenchidos por quartzo, biotita e inclusões de zircão. Eles também ocorrem na forma de agregados com contatos retilíneos a levemente curtos entre si ou com cristais de quartzo, sugerindo recristalização. Exibem maclamento do tipo xadrez difuso, com extinção ondulante e alteração para argilo-minerais. Observa-se freqüentemente, exsolução peritética resultando em grande quantidade de lamelas de albita, dando um caráter

mesopertítico para os cristais. Subordinadamente nota-se textura poiquilítica, com a microclina como mineral hospedeiro e inclusões de quartzo.

Plagioclásio: ocorre na forma de cristais predominantemente subédricos possuindo granulação fina a grossa. Apresentam contatos retilíneos a levemente curvos entre si, e em geral interlobados com os demais minerais. Apresentam composição de oligoclásio (An_{25-26}) e extinção ondulante fraca a moderada e alguns cristais apresentam-se por vezes fraturados com preenchimento de quartzo e biotita. Vários cristais possuem zoneamento com alteração para sericita.

Minerais varietais

Biotita: apresenta-se como cristais predominantemente subédricos de granulação fina à média. Dispõem-se de forma lamelar com pleocroísmo forte a moderado variando de marrom avermelhado a castanho amarelado (Figura 16 E). Exibe contatos retilíneos e subretilíneos com os demais minerais sendo comum a ocorrência de biotita formando agregados com a hornblenda, titanita, minerais opacos, zircão (Figura 16 A) e também a substituição da hornblenda por cristais mais finos de biotita ao longo de seus planos de clivagem, bem como a transformação desta para minerais opacos. Quando se apresenta em lamelas dispersas, os cristais mais finos ocupam os interstícios ou preenchem microfraturas em cristais de microclina juntamente com cristais de quartzo.

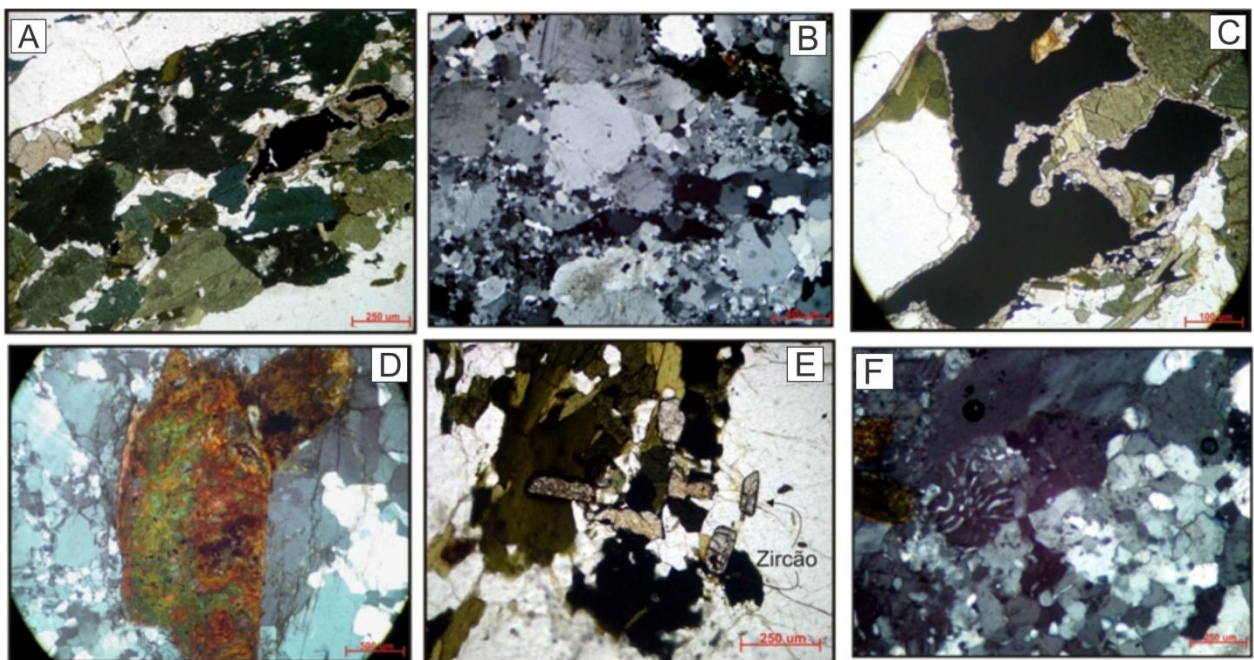
Hornblenda: seus cristais são predominantemente subédricos, com granulação fina à média e contatos retilíneos entre si e com a biotita. Seu pleocroísmo é bastante variado com minerais apresentando cor verde claro ou castanho pálido no menor eixo (b) e verde escuro ou verde azulado no maior eixo (c). Geralmente formam agregados com biotita, opacos, titanita e zircão (Figura 16 A). Nas partes internas de alguns cristais foi visualizado corrosão parcial, principalmente ao longo dos planos de clivagem, nestas regiões alteradas ocorrem cristais muito finos a finos de opacos e/ou feldspato e/ou quartzo e/ou biotita e/ou titanita. Alguns minerais apresentam alteração para biotita. O processo de recristalização gerou neoblastos de hornblenda que adquiriram uma orientação preferencial, formando níveis que se intercalam com quartzo, microclina e plagioclásio.

Minerais acessórios: são representados por titanita, zircão, allanita, apatita e minerais opacos. A primeira se constitui no mineral acessório mais expressivo e possui formas subédricas de granulação fina a média com alguns cristais possuindo seções quadráticas. Os minerais são levemente pleocróicos, variando de tons amarronzados a amarelados e ocorrem associados à biotita, hornblenda e minerais opacos que estão

envolvidos por coroas de titanita (Figura 16 C). O zircão em geral é fino, prismático, euédrico, moderadamente fraturado e associa-se a hornblenda e/ou biotita, na forma de inclusões (Figura 16 E). Os cristais de apatita são muito finos, euédricos, hexagonais ou prismáticos e associam-se também aos máficos, ocorrendo como inclusões nos mesmos. A allanita (Figura 16 D) apresenta-se geralmente como cristais euédricos a subédricos apresentando zoneamento e com pleocroísmo variando de amarelo pálido a vermelho castanho. Possui forma prismática e geralmente ocorre associada ou inclusa na biotita. Os minerais opacos são predominantemente euédricos a subédricos, com formas anédricas subordinadas. Estão associados aos agregados máficos como inclusões no anfibólio e biotita.

Minerais secundários: os principais minerais secundários são sericita-muscovita e epidoto, ambos ocorrendo como resultado da transformação do plagioclásio. Também ocorrem argilo-minerais que resultam da transformação do feldspato potássico e são pouco abundantes. A clorita ocorre como produto de alteração da biotita. A fluorita forma pequenos cristais no interior do plagioclásio, também pode estar associada aos agregados de minerais máficos mais intensamente transformados ou como pequenos grãos intersticiais.

Figura 16- Aspecto geral da fácies Hornblenda-Biotita Monzogranito intensamente a moderadamente deformado: a) concentração de minerais ferromagnesianos, onde predominam cristais de hornblenda, biotita, minerais opacos, titanita e zircão; b) aspecto geral da fácies, mostrando cristais de quartzo ao lado dos cristais de feldspato e plagioclásio, além da fase de granulação mais fina produzida por recristalização; c) Minerais opacos com coroas de titanita associados aos concentrados máficos; d) megacristal de allanita euédrico e alterado; e) cristais de biotita com inclusões de titanita e zircão; f) Intercrescimento entre plagioclásio e quartzo, caracterizando as mirmequitas em bulbo.



Fonte: Santos (2009).

4.2 Granito Vila Jussara

As lâminas estudadas foram AMP-27, MAR-119 e MAR-16, a primeira oriunda do trabalho de Silva (2009) e as duas últimas são provenientes do trabalho de Souza (2009). A lâmina MAR-119 é a mais representativa de um conjunto de lâminas que se referem ao ponto amostrado MD-01 e a MAR-16 ao ponto MD-02.

4.2.1 Lâmina AMP-27

Esta é representada pela fácies Titanita-Biotita-Hornblenda Sienogranito, que é constituída por quartzo (30,0-34,0%), K-feldspato (37,0-43,0%), e plagioclásio (10,3-13,7%) como minerais essenciais; hornblenda (6,0-9,0%), biotita (3,5-8,0%) e titanita (<1,4%) como varietais; opacos e zircão como minerais acessórios; sericita, epidoto, argilo-minerais e clorita como secundários (SILVA, 2009).

Minerais essenciais

Quartzo: Os cristais de quartzo são anédricos de granulação média, com alguns cristais mais finos como produtos de recristalização, seus contatos são irregulares com os outros minerais com presença de reentrâncias e alguns cristais encontram-se levemente estirados (Figura 17 B).

K-Feldspato (Microclina): são cristais anédricos a subédricos de granulação média com alguns fenocristais alterando para argilo-minerais, são feldspatos peritéticos ora mostrando um nítido maclamento xadrez, ora somente as lamelas de exsolução; alguns cristais, muito finos, ocorrem nos interstícios da rocha, sendo produto de recristalização.

Plagioclásio: minerais predominantemente subédricos de granulação fina a média, com composição oligoclásio (An_{17-18}), apresentam maclamento albita e alguns cristais possuem porções moderadamente saussuritizadas (descalcificados) com alteração para sericita e pequenos cristais de epidoto.

Minerais varietais

Biotita: apresenta-se como cristais predominantemente subédricos de granulação média, com pleocroísmo forte a moderado variando de marrom a castanho amarelado. Possuem forma lamelar e exibem contatos retilíneos e subretilíneos com os demais minerais, as bordas dos cristais também apresentam um aspecto de corrosão; podem ocorrer como agregados com a hornblenda, titanita, minerais opacos, zircão ou como minerais levemente estirados em uma direção preferencial formando níveis intercalados entre minerais de quartzo, k-feldspato e plagioclásio (Figura 17 A).

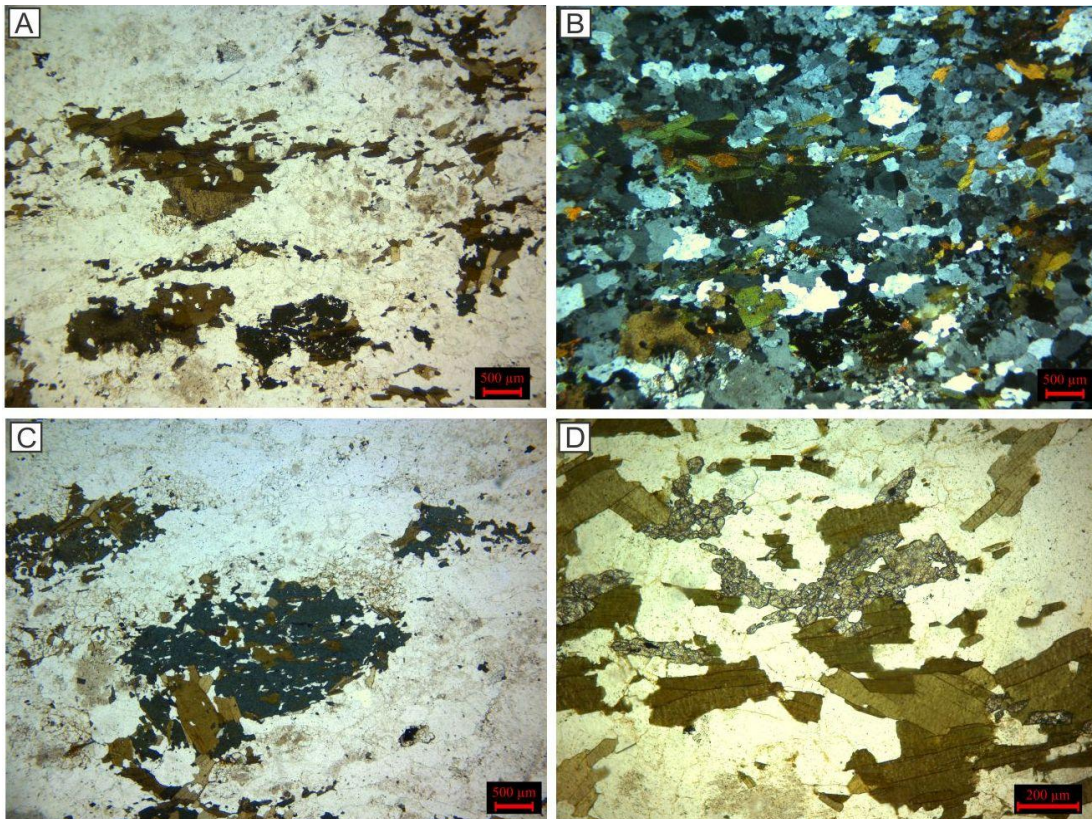
Hornblenda: seus cristais são predominantemente subédricos, com granulação média e apresenta bordas corroídas e contatos irregulares com os demais minerais. Seu pleocroísmo varia de cor verde claro no menor eixo (b) e verde escuro ou verde azulado no maior eixo (c). Geralmente formam agregados com biotita, opacos, titanita e zircão (Figura 17 A). Alguns minerais apresentam alteração para biotita e assim como a mesma alguns cristais estão levemente estirados em uma direção preferencial formando níveis intercalados entre minerais de quartzo, k-feldspato e plagioclásio, também foi visualizado um cristal possuindo textura poiquilítica com inclusões de biotita e titanita (Figura 17 C).

Titanita: Os minerais de titanita possuem formas predominantemente anédricas estão moderadamente fraturados com coloração marrom pálido em luz natural e ocorrem por toda lâmina de três maneiras: alguns cristais ocorrem de maneira isolada como pontos dispersos ou estão associados à biotita na forma de aglomerados (Figura 17 D) ou como inclusões na mesma e na hornblenda.

Minerais acessórios: são representados por zircão e minerais opacos. O zircão em geral é prismático, subédrico, moderadamente fraturado e associa-se a hornblenda e/ou biotita, na forma de inclusões (Figura 17 D). Os minerais opacos são anédricos e predominam nos aglomerados máficos de biotita e hornblenda na forma de inclusões.

Minerais secundários: sericita e epidoto ocorrem com resultado da transformação do plagioclásio. Também foi visualizado argilo-minerais como produto da transformação do K-feldspato. A clorita é bem escassa e ocorre como produto de alteração da biotita.

Figura 17- Aspecto geral da lâmina AMP-27: a) visualização dos níveis de minerais máficos, onde predominam cristais de hornblenda e biotita que se encontram grosseiramente estirados seguindo uma direção preferencial; b) mesma imagem na ortoscopia, onde é possível ver a distribuição de quartzo, plagioclásio e K-feldspato; c) textura poiquilítica em hornblenda contendo inclusões de titanita e finas lamelas de biotita; d) agregados de titanita associados a biotita, é possível visualizar uma inclusão de zircão na biotita no canto inferior direito da imagem.



Fonte: este estudo.

4.2.2 Lâmina MAR-119

Esta é representada pela fácies Alanita-Hornblenda Sienogranito, que é isotrópica e refere-se ao ponto MD-01. É constituída por quartzo (35,47%), K-feldspato (45,2%), e plagioclásio (14,2%) como minerais essenciais; hornblenda (3,1%) e allanita (1,4%) e pequenas quantidades de biotita como varietais; opacos, zircão e titanita como minerais acessórios; epidoto e argilo-minerais como secundários (SOUZA, 2009).

Minerais essenciais

Quartzo: Os cristais de quartzo são anédricos de granulação média, com alguns cristais mais finos como produtos de recristalização, seus contatos são irregulares com os

outros minerais com presença de reentrâncias e alguns cristais encontram-se levemente estirados (Figura 18 B).

K-Feldspato (Microclina): são cristais anédricos a subédricos de granulação média com alguns fenocristais alterando para argilo-minerais; os cristais apresentam maclamento xadrez e ocorrem de forma abundante por toda lâmina (Figura 18 B, D).

Plagioclásio: minerais predominantemente subédricos de granulação fina a média, com composição oligoclásio (An_{25}), são bem escassos e apresentam leve maclamento albita com alguns poucos cristais alterando para sericita.

Minerais varietais

Biotita: mineral bastante escasso com apenas alguns cristais anédricos ocorrendo associado ao anfibólio geralmente na forma de reentrâncias, apresenta pleocroísmo moderado variando de marrom a castanho amarelado, com contatos irregulares com os demais minerais, geralmente ocorrem como produtos de alteração do anfibólio (Figura 18 C).

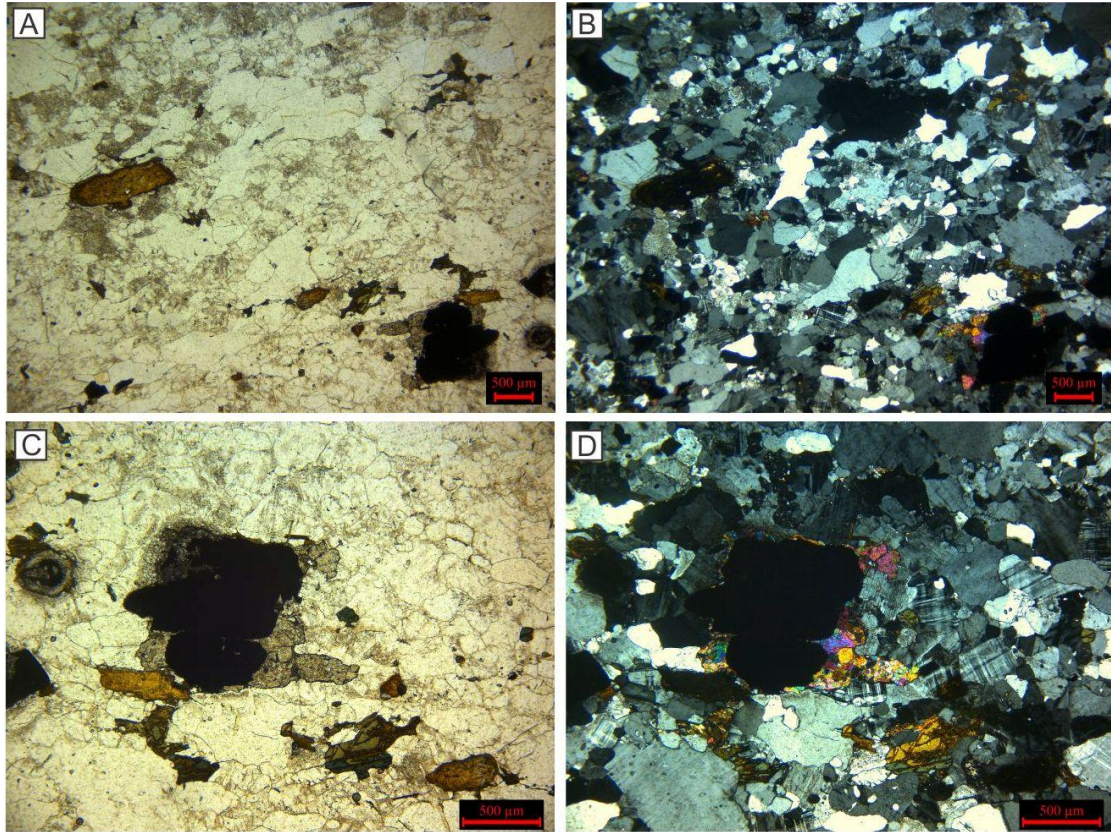
Hornblenda: ocorre como cristais anédricos contendo contatos irregulares com os demais minerais. Seu pleocroísmo é moderado e varia de verde claro a verde escuro. Ocorrem de forma esparsa pela lâmina e podem estar presentes de duas maneiras: como pequenos cristais amorfos entre quartzo, k-feldspato e plagioclásio ou associados a biotita sendo esta geralmente produto de alteração (Figura 18 C).

Allanita: A allanita por sua vez, está presente de forma significativa por toda lâmina em proporções superiores a 1%, apresentam-se predominantemente subédricas com pleocroísmo inexistente e coloração amarelo alaranjado (Figura 18 C). Ocorre como cristais isolados possuindo contatos irregulares com quartzo, K-feldspato e plagioclásio, e alguns apresentam zoneamento incipiente.

Minerais acessórios: são representados por titanita e minerais opacos. Os minerais de titanita são anédricos com pleocroísmo ausente e estão moderadamente fraturados com coloração marrom pálido em luz natural, ocorrem por toda lâmina de duas maneiras: alguns cristais ocorrem de maneira isolada como pontos dispersos ou na forma de agregados. Os minerais opacos são anédricos e alguns possuem titanita associada as suas bordas (Figura 18 C, D).

Minerais secundários: sericita como resultado da transformação do plagioclásio e argilo-minerais como produto da transformação do K-feldspato.

Figura 18- Aspecto geral da lâmina MAR-119: a) aspecto isotrópico da lâmina com diversos minerais de allanita dispostos por toda amostra; b) mesma imagem na ortoscopia, onde é possível ver a distribuição de quartzo, plagioclásio e K-feldspato; c) mineral opaco em contato com titanita amorfa, também é possível visualizar anfibólio (verde) e biotita (marrom) abaixo do mineral; d) mesma imagem da anterior com o uso da ortoscopia, destaque para o maclamento xadrez dos K-feldspatos mostrando sua abundância na amostra.



Fonte: este estudo.

4.2.3 Lâmina MAR-16

Esta é representada pela fácies Titanita-Biotita-Hornblenda Monzogranito, que refere-se ao ponto MD-02 e apresenta aspecto anisotrópico. É constituída por quartzo (47,4%), K-feldspato (17,1%), e plagioclásio (21,8%) como minerais essenciais; hornblenda (9,8%) e biotita (3,3%) como varietais; opacos, zircão e titanita como minerais acessórios; epidoto e argilo-minerais como secundários (SOUZA, 2009).

Minerais essenciais

Quartzo: São cristais anédricos e inequigranulares de granulação fina a média oriundas provavelmente da deformação, exibe contatos irregulares com os outros minerais e localmente retilíneos entre si, alguns cristais apresentam extinção ondulante e encontram-se como agregados policristalinos (Figura 19 B).

K-Feldspato (Microclina): seus cristais são predominantemente subédricos apresentando granulação média, alteração para argilo-minerais e contatos irregulares com outros minerais, exibem maclamento do tipo xadrez difuso, com extinção ondulante; também podem ser encontrados na forma de finos cristais em meio aos agregados policristalinos de quartzo recristalizado.

Plagioclásio: ocorre na forma de cristais predominantemente subédricos possuindo granulação fina a média. Apresentam contatos retilíneos a levemente curvos entre si, e geralmente irregulares com os demais minerais. Possuem composição de oligoclásio (An_{24}) com maclas da albita, e localmente albita-periclina, extinção ondulante fraca a moderada e alteração para sericita e pequenos cristais de epidoto.

Minerais varietais

Biotita: São cristais euédricos a subédricos inequigranulares finos a médios, de contornos e contatos irregulares, às vezes retilíneos entre si e com plagioclásio, quartzo e anfibólio. Possuem pleocroísmo forte variando de amarelo claro a marrom (Figura 19 C). Apresentam-se geralmente associadas aos cristais de anfibólios e aos minerais acessórios primários, como titanita e zircão. Apresentam-se fortemente orientados e paralelos aos cristais de anfibólio (Figura 19 A).

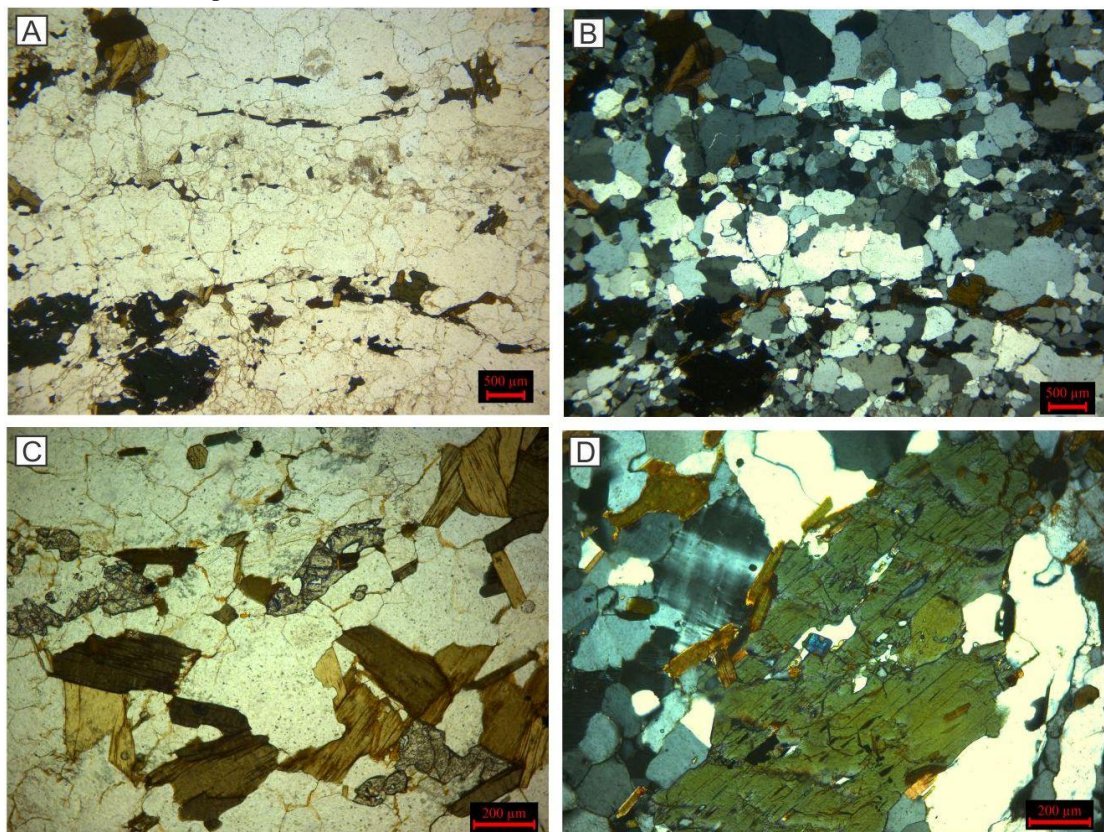
Hornblenda: Seus cristais são subédricos, equigranulares de granulação fina a média de contornos e contatos irregulares com outros minerais e localmente retos com finas lamelas de biotita quando contornados pela mesma. Geralmente seguem uma orientação preferencial (Figura 19 A) e possuem pleocroísmo forte, variando de verde oliva para verde claro. Ocorrem sempre associados à biotita, com inclusões de zircão, minerais opacos, apatitas e epidoto alguns desses dispendo-se nos planos de clivagem deste mineral (Figura 19 D).

Minerais acessórios: são representados por titanita, zircão, apatita, minerais opacos e epidoto. A titanita ocorre como cristais subédricos, estando associada aos cristais de biotita, ou localmente, na forma de pequenos cristais euédricos dispersos na lâmina. Apresenta contornos e contatos irregulares com a biotita e quartzo, as vezes retos com a biotita. Possuem pleocroísmo ausente e estão bastante fraturadas. O zircão ocorre como cristais predominantemente subédricos, e geralmente como inclusões na biotita, anfibólio e quartzo. A apatita foi visualizada nos planos de clivagem de alguns anfibólios, ocorrendo como cristais finos e alongados. Os minerais opacos são anédricos com contornos e contatos irregulares,

ocorrendo sempre associados aos agregados de titanita, biotita e anfibólio. O epidoto é subédrico e está associado aos anfibólios como pequenas inclusões.

Minerais secundários: o epidoto e sercicita ocorrem como produto de alteração do plagioclásio, e os argilo-minerais como produto de alteração do K-feldspato.

Figura 19- Aspecto geral da lâmina MAR-16: a) aspecto anisotrópico da lâmina com minerais de biotita e, secundariamente, finos cristais de anfibólio orientados formando níveis entre os outros minerais; b) mesma imagem na ortoscopia, onde é possível ver a distribuição de quartzo, plagioclásio e K-feldspato; c) titanita na sua forma de ocorrência mais comum, formando agregados associados a biotita; d) cristal de hornblenda levemente estirado e com finas inclusões de minerais opacos, zircão e apatita nos planos de clivagem, também pode ser visualizado um cristal de epidoto no centro do mineral e com biotitas lamelares e bem formadas nas bordas.



Fonte: este estudo.

5 RESULTADOS

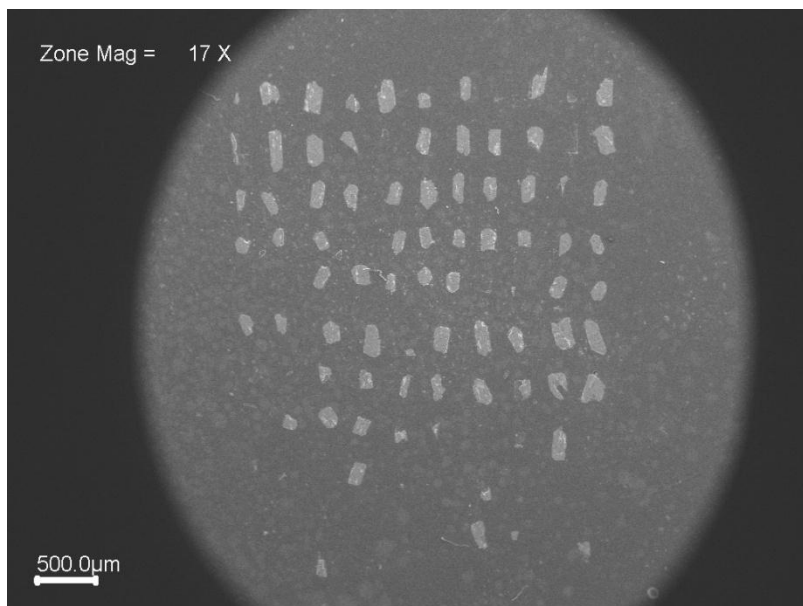
Neste trabalho foram analisados zircões presentes em dois corpos distintos: Granito Planalto e Granito Vila Jussara. No Granito Planalto foram tratadas duas amostras de concentrado de zircão e confeccionadas duas seções polidas, RD-02 e RD-05, para imageamento e análises de zircão, sendo estudados, respectivamente, 20 e 21 cristais de zircão. A amostra RD-02 localiza-se em uma zona intensamente deformada relacionada ao Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (ARAÚJO; MAIA, 1991) e a RD-05, em área pouco ou não deformada. No Granito Vila Jussara, sem deformação aparente, foram confeccionadas três seções polidas, sendo as seções MD-01 e MD-02, com 38 e 20 cristais de zircão analisados, respectivamente, provenientes da porção norte do granito, e a seção AMP-27, contendo 32 zircões, derivada da porção sul do corpo (Figura 1).

5.1 Morfologia e geoquímica dos zircões do Granito Planalto

5.1.1 Seção RD-02

A imagem abaixo mostra a seção RD-02 com aproximadamente 100 zircões; desses, 20 cristais foram imageados e estudados; os espaços vazios entre cristais representam o desgaste completo de alguns cristais de zircão durante o processo de polimento da seção.

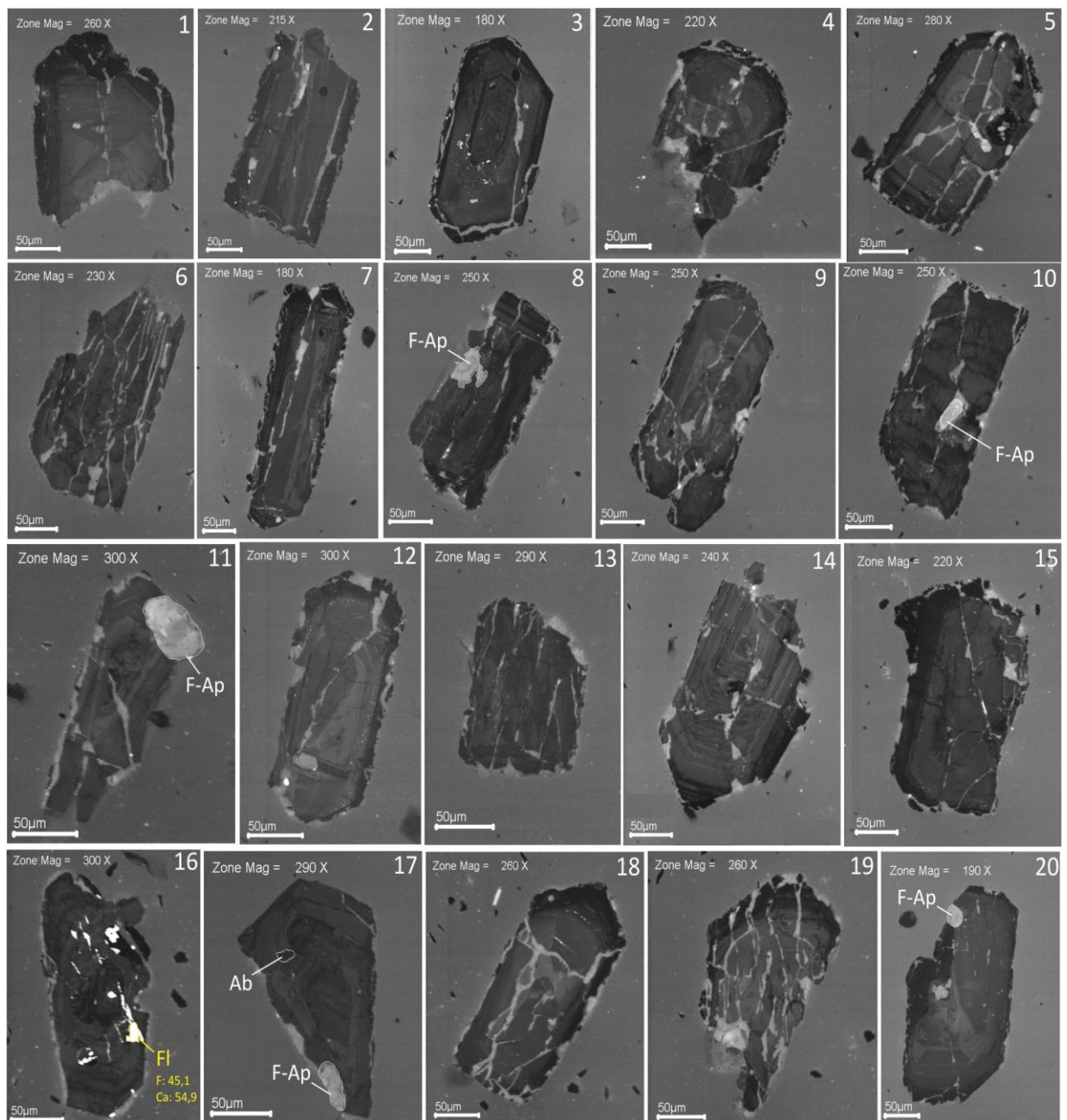
Figura 20- Imagem de ERE. Visão geral dos zircões selecionados da amostra RD-02.



Fonte: este estudo.

Os 20 cristais de zircão analisados são provenientes de uma amostra localizada sobre a Zona de Cisalhamento Itacaiúnas (Figura 1); esses zircões são predominantemente anédricos a subédricos e se mostram intensamente fraturados em resposta à deformação imposta nesta parte do corpo. Devido à intensidade das fraturas, os cristais adquiriram tonalidade escurecida e o zoneamento magmático pode estar parcial a totalmente obliterado (Figura 21). Inclusões de F-apatita ricas em Ce são comuns (Figura 21.8, 10, 11, 17, 20; Tabela 2), além de raros cristais de fluorita e albita (Figura 21. 16, 17).

Figura 21- Imagens de catodoluminescência representativas dos zircões da amostra RD-02. F-Ap= flúor apatita; Ab=Albita; Fl= fluorita.



Fonte: este estudo.

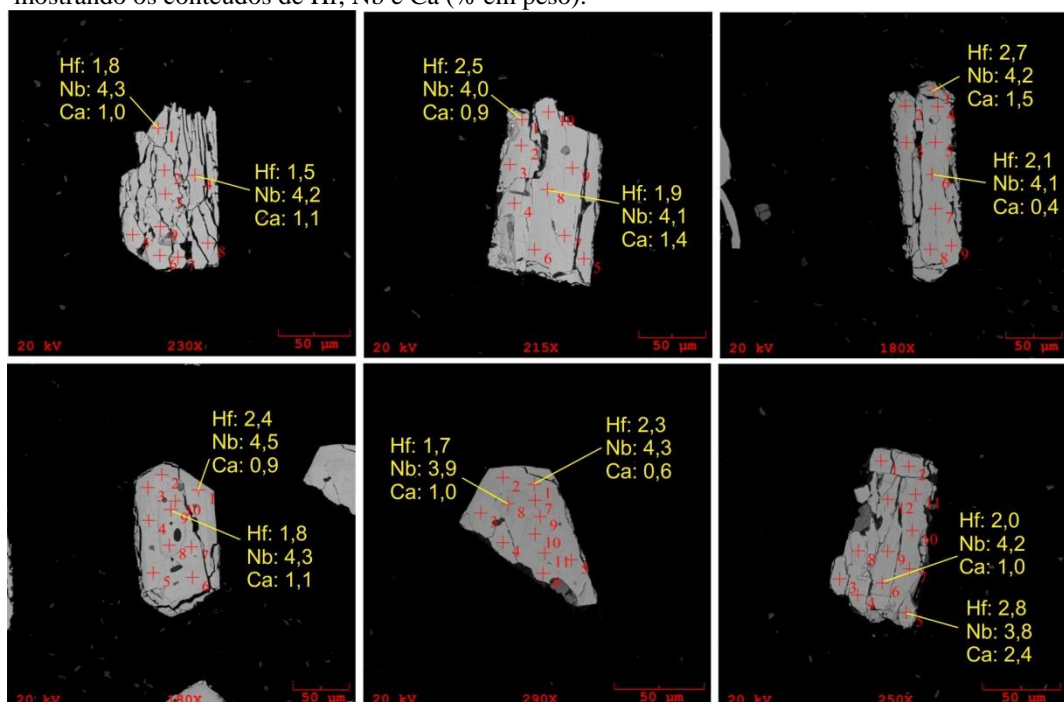
Tabela 2- Resultado das análises em EDS dos cristais de F-apatita inclusas nos zircões, amostra RD-02.

SEÇÃO	ZIRCÃO	O	F	P	Cl	Ca	Sr	La	Ce
RD-02	Zr 08	37,2	3,3	19,6	0,1	36,3	1,1	0,7	1,9
	Zr 10	33,8	2,9	21,1	0,0	38,6	0,7	1,0	1,9
	Zr 11	33,5	2,7	20,7	0,1	39,1	1,1	0,6	2,3
	Zr 17	36,7	3,1	20,1	0,0	35,9	0,7	1,0	2,4
	Zr 20	36,4	3,2	19,8	0,0	36,7	0,9	0,8	2,2

Fonte: este estudo.

Geoquimicamente, os zircões da amostra RD-02 apresentam as maiores concentrações de Ca, com valores variando de 0,4 a 2,4% (Figura 22), as menores concentrações médias de Nb (3,9 a 4,4%), Ta (0,7 a 0,9%) e Zr (56 a 58,9%) e as mais baixas razões Nb/Ta (4,0 a 5,8) e Zr/Ca (46,7 a 165,1) dentre os grupos de zircão analisados (Tabela 3; Figura 26). Segundo Breiter et al. (2014) elementos como Al, Ca, Fe, Mn e F provavelmente não são constituintes primários da estrutura cristalina do zircão e seriam incorporados a ele após sua parcial metamictização. Assim, os conteúdos mais elevados de Ca encontrados nos zircões da seção RD-02 seriam resultantes, provavelmente, do intenso fraturamento apresentado pelos cristais, o qual teria facilitado a percolação de soluções e sua parcial metamictização. Alguns cristais, apesar de intensamente fraturados, ainda preservam zoneamentos magmáticos, similarmente ao observado nos zircões da amostra RD-05, isentos de deformação. Tal fato indica que o cisalhamento foi decisivo nas transformações morfológicas e composicionais dos zircões dessa amostra.

Figura 22- Imagens em ERE analisadas por EDS, de alguns cristais de zircão da seção RD-02, mostrando os conteúdos de Hf, Nb e Ca (% em peso).



Fonte: este estudo.

Tabela 3- Resultados das análises químicas por EDS dos zircões da seção RD-02, mostrando os teores médios de O, Si, Ca, Nb, Ta, U, Zr, Hf e das razões Zr/Hf, Zr/Ca e Nb/Ta, com destaque para as maiores concentrações de Ca dentre todos os zircões analisados.

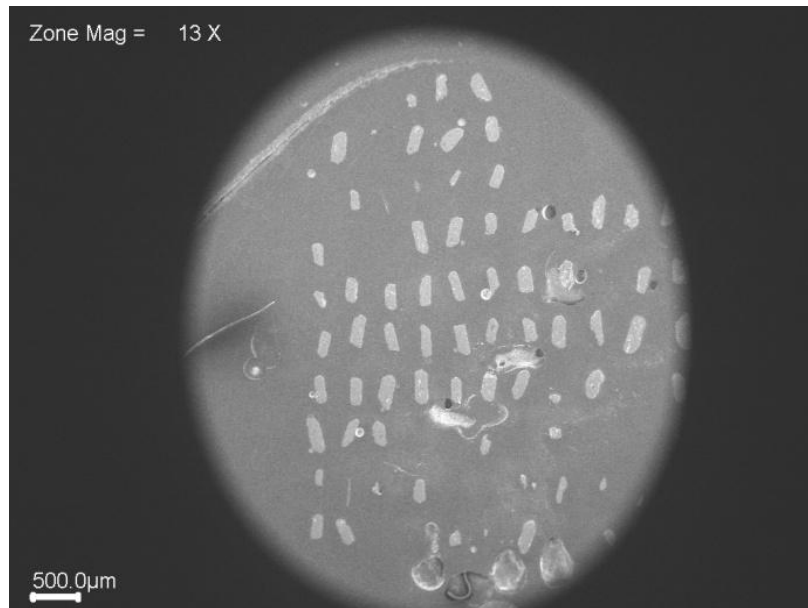
SEÇÃO	ZIRCÃO	O	Si	Ca	Nb	Ta	Zr	Hf	U	Zr/Hf	Nb/Ta	Zr/Ca
RD-02	Zr 01	19,1	14,7	0,6	4,0	0,8	57,6	2,1	0,2	27,6	4,8	94,3
	Zr 02	19,8	14,5	0,8	4,0	0,8	56,8	2,0	0,4	28,3	4,7	68,5
	Zr 03	19,4	14,4	0,7	4,0	0,8	57,1	2,3	0,3	24,9	5,1	86,4
	Zr 04	20,5	14,4	1,2	3,9	0,7	55,9	2,1	0,4	26,5	5,4	46,7
	Zr 05	17,4	14,7	0,4	4,4	0,9	58,9	2,0	0,2	29,2	4,9	135,5
	Zr 06	17,5	14,8	0,4	4,2	0,9	59,2	1,8	0,2	32,0	4,8	148,4
	Zr 07	18,1	14,7	0,6	4,2	0,8	58,1	2,2	0,3	26,3	5,6	101,4
	Zr 08	17,9	14,7	0,8	4,3	0,8	58,3	2,1	0,3	27,2	5,2	76,5
	Zr 09	18,2	14,8	0,5	4,1	0,8	58,5	2,1	0,2	28,3	5,3	117,1
	Zr 10	20,1	14,5	1,2	4,0	0,8	56,1	2,0	0,3	27,4	4,9	73,3
	Zr 11	18,1	14,7	0,5	4,2	0,8	58,4	2,1	0,2	28,3	5,2	107,8
	Zr 12	19,4	14,6	0,9	4,2	0,8	56,5	2,2	0,3	25,4	5,0	64,7
	Zr 13	18,9	14,7	0,7	4,3	0,8	57,3	1,9	0,3	30,6	5,5	76,6
	Zr 14	19,0	14,6	0,8	4,2	0,9	57,3	1,9	0,3	29,4	4,6	73,3
	Zr 15	18,3	14,7	0,4	4,3	1,1	58,3	1,9	0,2	30,9	4,0	165,1
	Zr 16	18,8	14,7	0,7	4,2	0,8	57,7	1,9	0,3	30,8	5,5	83,9
	Zr 17	18,1	14,7	0,6	4,3	0,7	58,3	2,1	0,3	28,3	5,8	95,5
	Zr 18	19,4	14,5	0,7	4,2	0,9	56,9	2,1	0,3	26,6	4,6	79,3
	Zr 19	18,6	14,7	0,9	4,2	0,8	57,3	2,2	0,3	26,3	5,0	62,7
	Zr 20	18,6	14,6	0,4	4,3	0,8	58,3	1,9	0,2	30,1	5,4	136,4

Fonte- este estudo.

5.1.2 Seção RD-05

As imagens abaixo mostram a seção RD-05 com aproximadamente 100 zircões; desses, 21 cristais foram observados e estudados, os espaços vazios entre cristais representam o desgaste de alguns cristais de zircão durante o processo de polimento da seção.

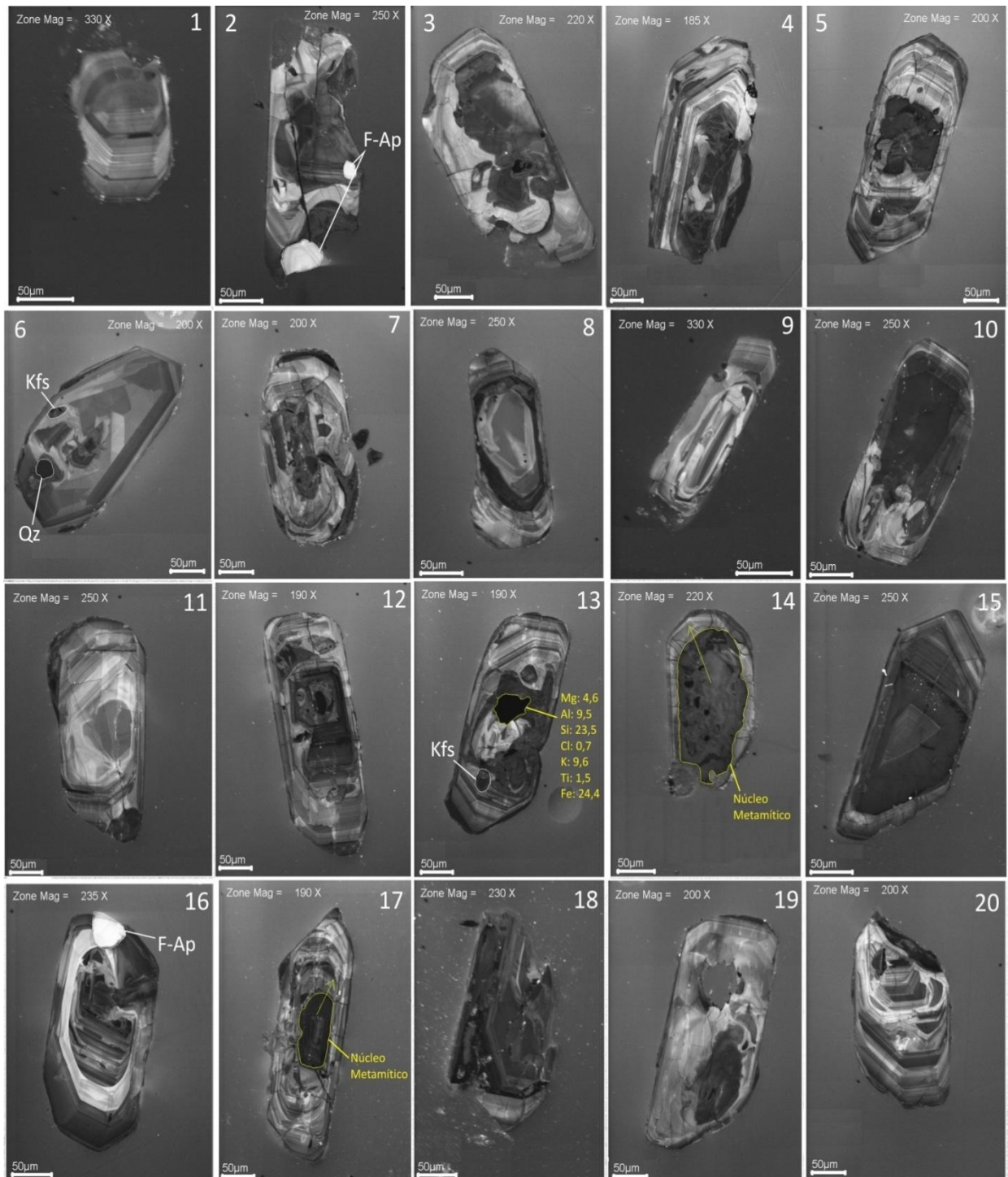
Figura 23- Imagem de ERE. Visão geral dos zircões selecionados da amostra RD-05.



Fonte: este estudo.

A amostra RD-05 foi coletada afastada da zona de cisalhamento que afetou o Granito Planalto (Figura 1); em decorrência disso, seus cristais não apresentam intenso fraturamento como observado naqueles da amostra RD-02, da zona deformada. Os cristais da amostra RD-05 são predominantemente subédricos a euédricos, zonados, geralmente com núcleos metamíticos cinza-escuros, alguns mostrando fraturas internas que irradiam no sentido núcleo-bordado cristal (Figura 24. 14,17); raras inclusões de F-apatita (Figura 24. 2,16; Tabela 4), quartzo e álcali-feldspato (Figura 24. 6,13) foram identificadas. Inclusões de quartzo e álcali-feldspato são comuns em zircões, pois estes estão entre os principais minerais formadores de rochas (CORFU et al., 2003).

Figura 24- Imagens de catodoluminescência representativas dos zircões da amostra RD-05.
F-Ap= flúor apatita; Kfs= K-feldspato; Qz= quartzo.



Fonte: este estudo.

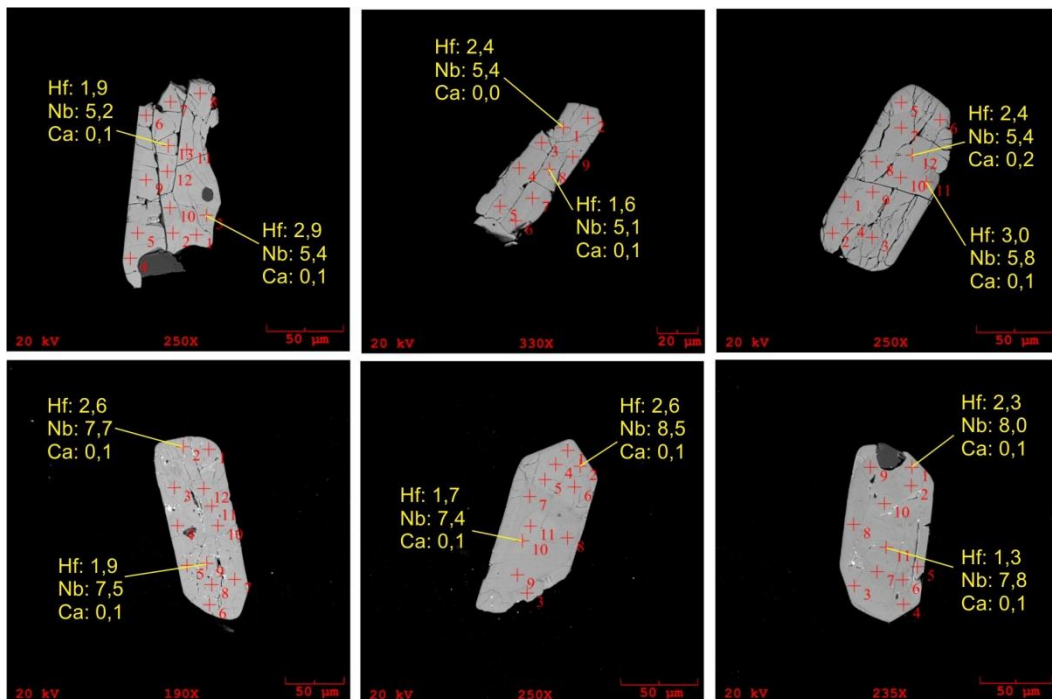
Tabela 4- Resultado das análises em EDS dos cristais de F-apatita inclusas nos zircões, amostra RD-05.

SEÇÃO	ZIRCÃO	O	F	P	Cl	Ca	Sr	La	Ce
RD-05	Zr 02 ₁	30,9	2,2	22,4	0,5	42,2	0,3	0,5	0,9
	Zr 02 ₂	33,9	2,7	21,6	0,1	40,1	0,3	0,4	0,9
	Zr 16	35,5	2,7	20,7	0,1	39,1	1,1	0,5	2,3

Fonte: este estudo.

Em termos geoquímicos, os cristais da amostra RD-05 são comparativamente mais enriquecidos em Nb que os zircões da zona deformada, com um grupo de zircão apresentando concentrações de Nb em torno de 5% e outro entre 7,5 e 8% (Figura 25; Figura 26). Os zircões do primeiro grupo, mais empobrecidos em Nb, possuem também conteúdos de Ca levemente mais baixos (Tabela 5). Suas razões Zr/Hf são muito próximas ou se superpõem às daquelas dos zircões da seção RD-02 (27,3 a 31,6 contra 24,9 a 32,0), mas suas razões Zr/Ca são superiores (156,7 a 974,6). Seus conteúdos de Ta são similares aos dos zircões da zona deformada (0,9 a 1,1% contra 0,7 a 1,1%) e mostram razões Nb/Ta mais elevadas (4,8 a 7,7) em comparação com os zircões da zona deformada (4,0 a 5,8).

Figura 25- Imagens em ERE analisadas por EDS, de alguns cristais de zircão da seção RD-05, mostrando os conteúdos de Hf, Nb e Ca (% em peso).



Fonte: este estudo.

Tabela 5- Resultados das análises químicas dos zircões da seção RD-05, mostrando os teores médios de O, Si, Ca, Nb, Ta, U, Zr, Hf e das razões Zr/Hf, Zr/Ca e Nb/Ta, com destaque para a ocorrência de dois grupos de zircões apresentando teores de Nb muito distintos.

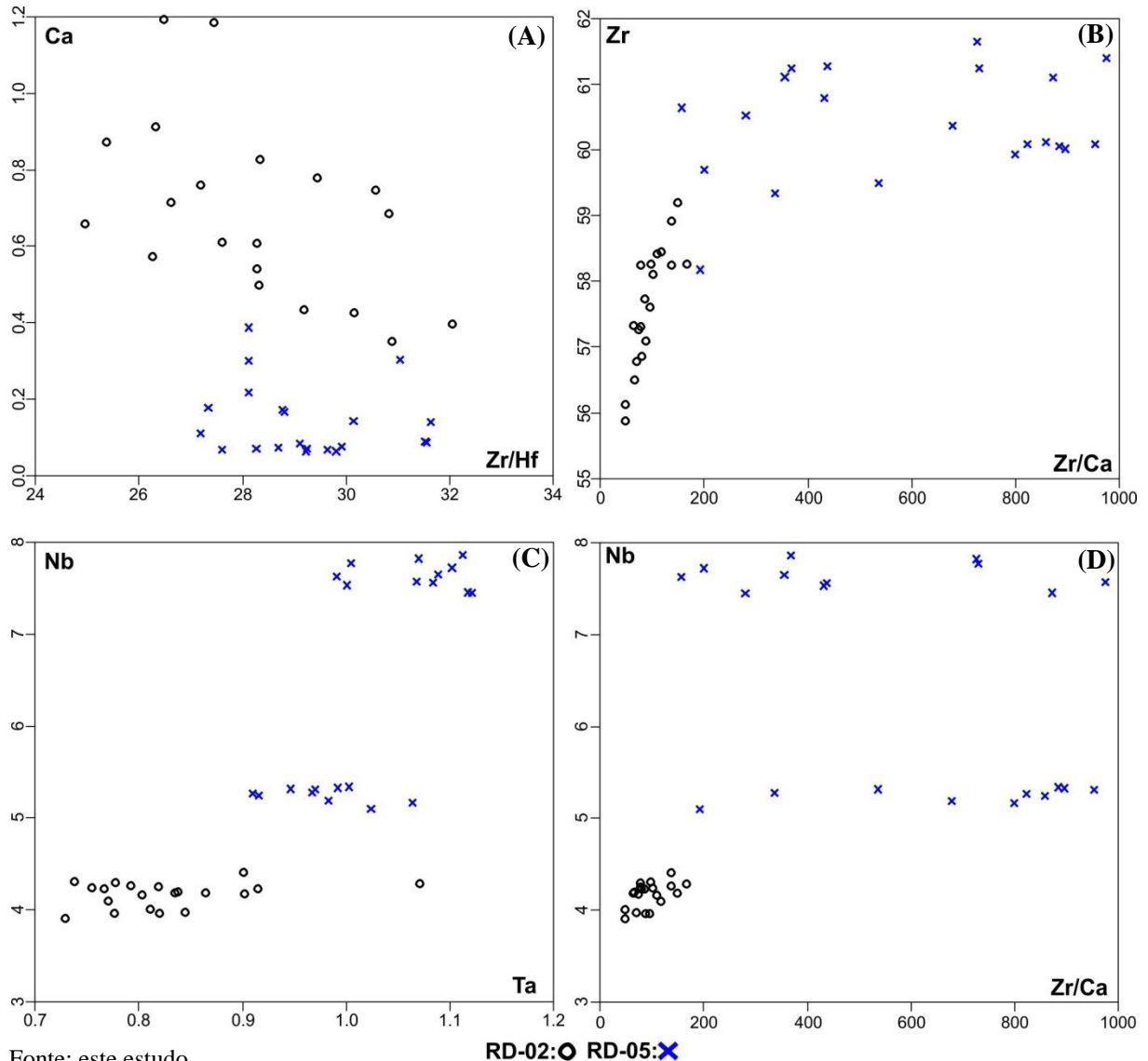
SEÇÃO	ZIRCÃO	O	Si	Ca	Nb	Ta	Zr	Hf	U	Zr/Hf	Nb/Ta	Zr/Ca
RD-05	Zr 01	15,8	14,8	0,1	5,2	1,1	59,9	2,0	0,2	29,9	4,8	799,2
	Zr 02	15,6	14,9	0,1	5,3	0,9	60,1	2,1	0,2	28,7	5,8	823,2
	Zr 03	15,3	14,9	0,1	5,2	1,0	60,4	1,9	0,3	31,5	5,3	678,4
	Zr 04	15,6	14,8	0,1	5,3	1,0	60,1	2,0	0,2	29,6	5,3	883,3
	Zr 05	16,2	14,8	0,2	5,3	1,0	59,3	2,2	0,2	27,3	5,5	337,2
	Zr 06	15,5	14,8	0,1	5,3	1,0	60,0	2,2	0,2	27,6	5,4	895,8
	Zr 07	15,7	14,8	0,1	5,2	0,9	60,1	2,1	0,2	28,3	5,7	858,9
	Zr 08	17,2	14,8	0,3	5,1	1,0	58,2	1,9	0,2	31,0	5,0	192,0
	Zr 09	15,6	14,8	0,1	5,3	1,0	60,1	2,1	0,2	29,2	5,5	953,8
	Zr 10	16,0	14,7	0,1	5,3	0,9	59,5	2,2	0,2	27,2	5,6	536,0
	Zr 11	12,3	14,7	0,1	7,5	1,1	61,1	2,1	0,2	29,2	6,7	872,9
	Zr 12	12,6	14,7	0,2	7,5	1,1	60,5	2,2	0,3	28,1	6,6	280,2
	Zr 13	11,6	14,8	0,1	7,8	1,1	61,7	2,0	0,2	31,6	7,3	725,3
	Zr 14	12,4	14,6	0,4	7,6	1,0	60,6	2,2	0,3	28,1	7,7	156,7
	Zr 15	12,0	14,7	0,2	7,7	1,1	61,1	2,1	0,3	28,8	7,0	355,3
	Zr 16	12,8	14,6	0,1	7,5	1,0	60,8	2,0	0,2	30,1	7,5	431,2
	Zr 17	12,2	14,7	0,1	7,6	1,1	61,3	1,9	0,2	31,6	7,0	437,7
	Zr 18	13,1	14,5	0,3	7,7	1,1	59,7	2,1	0,3	28,1	7,0	199,7
	Zr 19	12,0	14,7	0,1	7,8	1,0	61,2	2,1	0,2	29,1	7,7	729,1
	Zr 20	11,8	14,6	0,2	7,9	1,1	61,2	2,1	0,2	28,8	7,1	368,9
	Zr 21	12,1	14,7	0,1	7,6	1,1	61,4	2,1	0,3	29,8	7,1	974,6

Fonte: este estudo.

5.1.3 Diagramas geoquímicos dos zircões do Granito Planalto

Na Figura 26 são apresentados diagramas envolvendo variações composicionais dos cristais de zircão do Granito Planalto. No diagrama Ca x Zr/Hf, os zircões da amostra RD-02, localizada na zona de cisalhamento Itacaiúnas, mostram enriquecimento mais acentuado em Ca em relação aos zircões da amostra RD-05, situada fora da zona de cisalhamento (Figura 26 A). Zr e Hf são mais baixos e semelhantes, respectivamente, nas duas amostras, o que confere razões Zr/Hf mais baixas aos zircões da amostra RD-02. Por outro lado, Nb e Ta são mais elevados nos zircões da amostra RD-05, com um grupo apresentando teores de Nb em torno de 5,5% e outro próximo a 7,5%, o que pode indicar duas fácies distintas (Figura 26C). As maiores concentrações de Ca na amostra RD-02 resultam nas menores razões Zr/Ca (46,7 a 165,1); por outro lado, a amostra RD-05 possui razões Zr/Ca mais elevadas (156,7 a 974,6) (Figura 26 D), indicando substituição mais acentuada de Zr pelo Ca na amostra deformada (RD-02), conforme indicado na figura 26 (B).

Figura 26- Diagramas geoquímicos mostrando a distribuição dos zircões estudados no Granito Planalto em termos de Nb, Ta e Ca (% em peso) e das razões Zr/Hf e Zr/Ca.



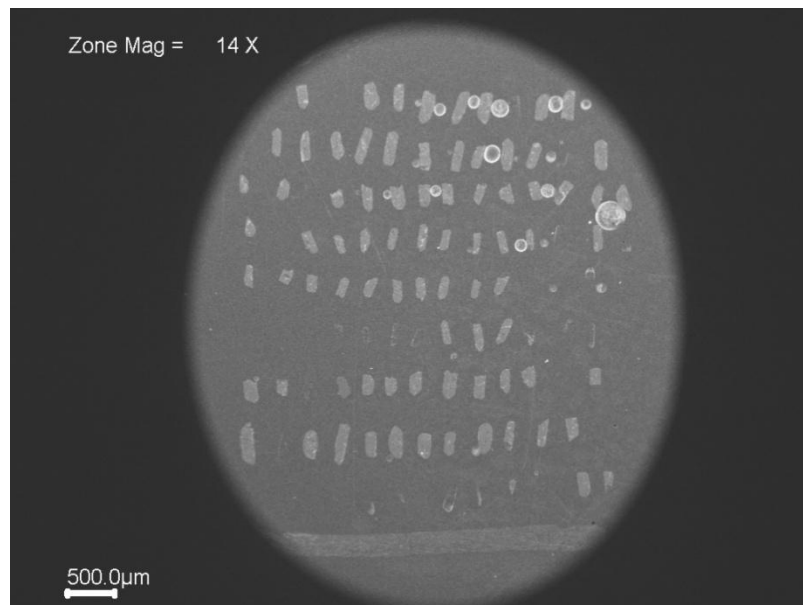
5.2 Morfologia e geoquímica dos zircões do Granito Vila Jussara

Foram analisados cristais de zircão das amostras AMP-27, situada na porção sul do corpo, e MD-01 e MD-02 ocorrentes na porção norte (Figura 1). As imagens de CL mostram que os zircões dessas três amostras são, em geral, subédricos a euédricos, concentricamente zonados, com núcleos metamíticos ou, mais raramente, luminescentes; cristais com zoneamento convoluto ou apresentando núcleo homogêneo sem evidências de zonas ocorrem esporadicamente.

5.2.1 Seção AMP-27

A imagem abaixo mostra a seção AMP-27 com aproximadamente 100 zircões; desses, 32 cristais foram estudados.

Figura 27- Imagem de ERE. Visão geral dos zircões selecionados da amostra AMP-27.



Fonte: este estudo.

Na seção AMP-27 foram analisados 32 cristais de zircão, onde dominam cristais com núcleos metamíticos escuros, por vezes apresentando fraturas internas no sentido núcleo-borda (Figura 28.14); tais núcleos se apresentam envoltos por zonas de crescimento mais luminescentes, sugerindo mudança composicional; raros cristais mostram núcleos isentos ou fracamente zonados (homogêneos), sugerindo crescimento em condições físico-químicas mais estáveis (Figura 28. 9,11); inclusões de F-apatita são comuns (Tabela 6) associadas aos núcleos metamíticos (Figura 28. 2,5,11) ou nas bordas dos cristais (Figura 28. 3,6,9,12,13). Inclusões de quartzo e álcali-feldspato também foram identificadas (Figura 28. 3,4 8,12,17).

Figura 28- Imagens de catodoluminescência representativas dos zircões da amostra AMP-27.
 F-Ap= flúor apatita; Kfs= K-feldspato; Qz= quartzo.



Fonte: este estudo.

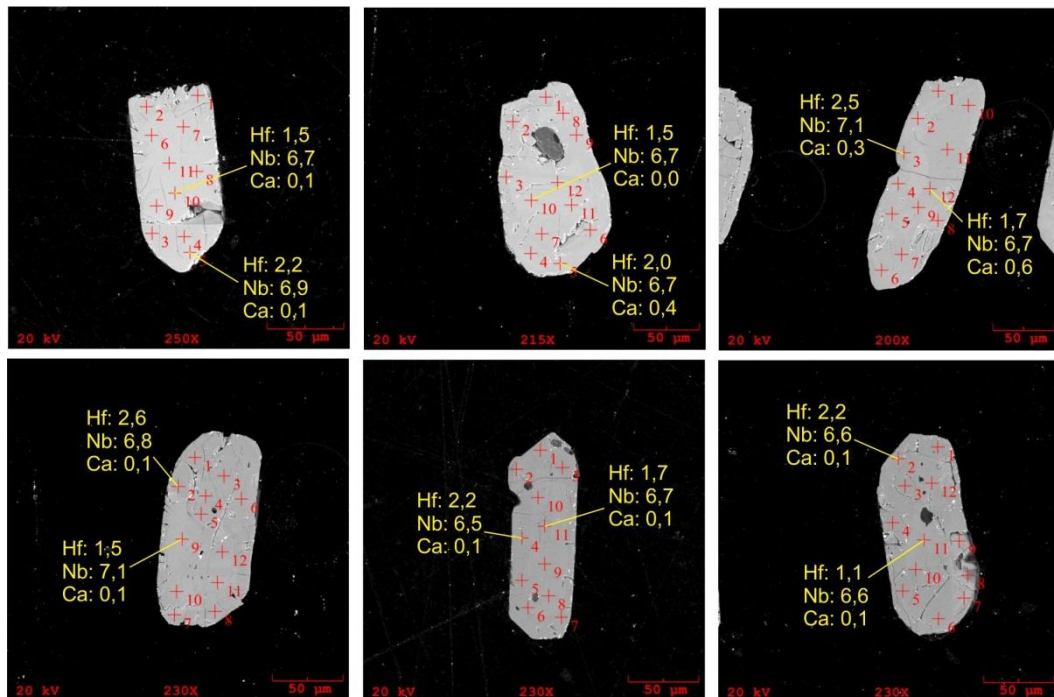
Tabela 6- Resultado das análises em EDS dos cristais de F-apatita inclusas nos zircões, amostra AMP-27.

SEÇÃO	ZIRCÃO	O	F	P	Cl	Ca	Sr	La	Ce
AMP-27	Zr 02	30,8	2,5	23,0	0,2	40,5	0,3	1,0	1,7
	Zr 03	32,7	3,0	22,3	0,1	40,1	0,3	0,6	1,8
	Zr 05	31,3	2,5	22,3	0,3	39,8	0,5	1,1	2,2
	Zr 06	32,9	2,6	22,5	0,3	39,5	0,3	0,6	1,4
	Zr 09	33,5	2,4	22,8	0,2	38,7	0,3	0,7	1,6
	Zr 12	31,5	3,0	22,7	0,1	41,0	0,3	0,4	1,0
	Zr 11 ₁	31,4	3,0	22,1	0,1	40,4	0,5	0,6	1,8
	Zr 11 ₂	31,9	2,5	22,2	0,2	39,7	0,5	0,8	2,3
	Zr 13	26,4	2,0	24,5	0,2	43,9	0,4	0,8	1,8

Fonte: este estudo.

Em termos geoquímicos, os zircões da amostra AMP-27 são homogêneos e possuem razões Zr/Hf médias variando de 26,5 a 35,5 semelhantes às encontradas nos zircões da amostra MD-02 (25,5 a 36,5) (Tabela 7). Apresentam concentrações médias de Nb entre 6,6 e 7,7%, sendo esses os maiores valores dentre os zircões do Granito Vila Jussara analisados (Figura 29; Figura 36).

Figura 29- Imagens em ERE analisadas por EDS, de alguns cristais de zircão da seção AMP-27, mostrando os conteúdos de Hf, Nb e Ca (% em peso).



Fonte: este estudo.

Tabela 7- Resultados das análises de EDS dos zircões da amostra AMP-27, mostrando os teores médios de O, Si, Ca, Nb, Ta, U, Zr, Hf e das razões Zr/Hf, Zr/Ca e Nb/Ta, com destaque para as concentrações mais elevadas de Nb dentre as amostras do Granito Vila Jussara estudadas.

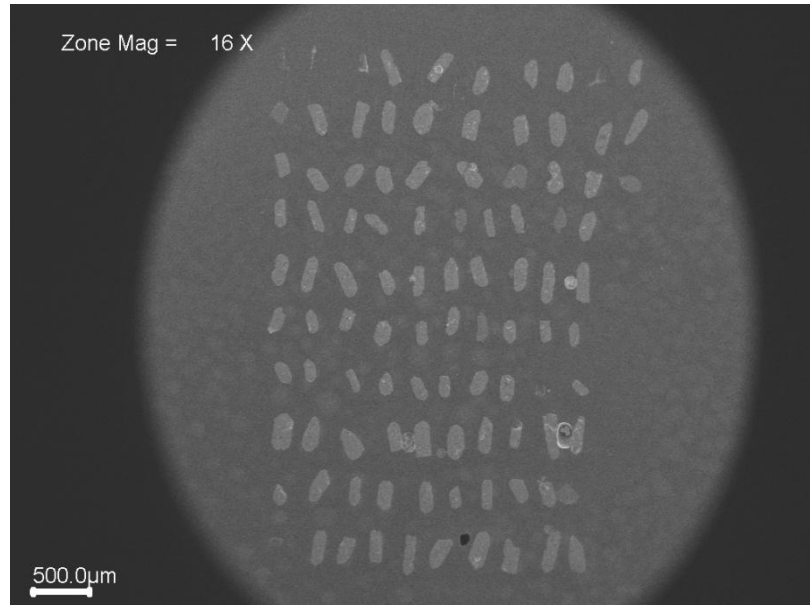
SEÇÃO	ZIRCÃO	O	Si	Ca	Nb	Ta	Zr	Hf	U	Zr/Hf	Nb/Ta	Zr/Ca
AMP-27	Zr 01	13,4	14,7	0,1	7,0	1,0	61,0	1,8	0,2	34,4	6,9	871,9
	Zr 02	14,1	14,5	0,2	6,9	1,0	60,5	1,8	0,2	33,8	6,7	383,0
	Zr 03	13,9	14,6	0,1	6,9	1,0	60,6	1,9	0,2	32,0	6,8	977,5
	Zr 04	13,1	14,6	0,1	7,0	1,1	60,9	2,0	0,2	30,0	6,6	724,5
	Zr 05	14,5	14,4	0,2	7,0	1,0	59,9	1,9	0,2	31,9	6,9	264,0
	Zr 06	13,6	14,4	0,1	7,6	1,0	60,1	2,0	0,2	29,9	7,3	518,4
	Zr 07	13,6	14,5	0,1	7,1	1,0	60,8	1,9	0,2	32,0	7,4	675,6
	Zr 08	14,1	14,5	0,1	7,0	1,0	60,7	1,7	0,2	35,8	6,8	866,6
	Zr 09	14,5	14,6	0,1	6,7	0,9	60,5	1,7	0,2	34,7	7,0	976,6
	Zr 10	15,2	14,4	0,3	6,8	0,9	59,4	1,9	0,2	31,1	7,6	209,9
	Zr 11	13,6	14,4	0,1	7,7	1,0	60,0	2,0	0,2	30,4	7,6	659,6
	Zr 12	14,7	14,5	0,1	6,7	1,0	60,0	1,9	0,2	31,8	6,8	1035,1
	Zr 13	13,6	14,6	0,1	6,8	1,0	60,9	1,9	0,2	32,5	7,1	655,0
	Zr 14	13,8	14,6	0,1	6,7	1,1	60,7	1,8	0,3	34,1	6,0	606,6
	Zr 15	13,8	14,6	0,1	6,6	1,1	60,7	2,0	0,2	29,9	6,3	536,8
	Zr 16	13,8	14,6	0,2	6,7	1,0	60,5	2,1	0,3	28,6	6,7	290,9
	Zr 17	13,6	14,6	0,1	6,8	1,0	61,0	1,8	0,2	33,4	6,7	642,3
	Zr 18	13,8	14,5	0,2	6,9	1,0	60,8	1,7	0,2	35,5	6,7	349,6
	Zr 19	13,6	14,6	0,1	6,9	1,0	60,7	2,0	0,2	29,9	6,8	674,5
	Zr 20	13,7	14,5	0,1	7,1	0,9	60,5	2,0	0,2	30,9	7,5	817,9
	Zr 21	16,0	14,3	1,0	6,6	0,9	57,8	2,1	0,2	27,6	7,1	55,4
	Zr 22	12,8	14,4	0,1	7,7	1,1	60,7	2,0	0,2	30,0	7,0	879,7
	Zr 23	14,1	14,6	0,1	6,7	1,1	60,3	1,9	0,3	31,3	6,3	693,0
	Zr 24	14,3	14,5	0,1	6,8	1,1	60,1	2,0	0,2	30,2	6,5	504,9
	Zr 25	14,4	14,5	0,1	6,8	1,0	60,2	2,0	0,2	30,1	6,9	423,8
	Zr 26	14,3	14,5	0,1	7,1	1,1	60,0	1,8	0,1	32,9	6,6	731,8
	Zr 27	14,2	14,6	0,1	6,7	1,0	60,3	2,0	0,2	29,7	6,8	814,3
	Zr 28	14,0	14,4	0,1	6,9	1,2	60,1	2,0	0,2	29,7	5,7	780,1
	Zr 29	14,1	14,6	0,1	6,9	1,0	60,1	2,1	0,2	29,2	7,1	536,3
	Zr 30	13,9	14,5	0,1	6,9	1,2	60,4	1,9	0,3	31,8	5,9	678,6
	Zr 31	14,3	14,5	0,2	7,0	1,1	60,0	2,0	0,2	30,7	6,4	386,9
	Zr 32	14,0	14,4	0,1	6,9	1,1	59,9	2,3	0,3	26,6	6,2	422,1

Fonte: este estudo.

5.2.2 Seção MD-01

A imagem abaixo mostra a seção MD-01 com aproximadamente 100 zircões, dos quais foram estudados 38.

Figura 30- Imagem de ERE. Visão geral dos zircões selecionados da amostra MD-01.



Fonte: este estudo.

Os 38 zircões analisados da amostra MD-01 ocorrem como cristais subédricos a euédricos zonados, fraturados, luminescentes (Figura 31. 6,15,17) ou com núcleos luminescentes envoltos por bordas escuras (Figura 31. 4,8,10,18). O zoneamento é mais evidenciado nas bordas com raros cristais apresentando zoneamento convoluto (Figura 31. 15). Alguns cristais mostram núcleos metamíticos escuros, envoltos por zircão luminescente (Figura 31. 4,17,19); inclusões de F-apatita são comuns (Figura 31. 2,3,4,5,7,9,11,12,13; Tabela 8). Raros cristais mostram núcleo luminescente subarredondado típicos de cristal herdado (Figura 31. 1,11; CORFU et al., 2003).

Figura 31- Imagens de catodoluminescência representativas dos zircões da amostra MD-01.
F-Ap= flúor apatita; Kfs= K-feldspato; Qz= quartzo.



Fonte: este estudo.

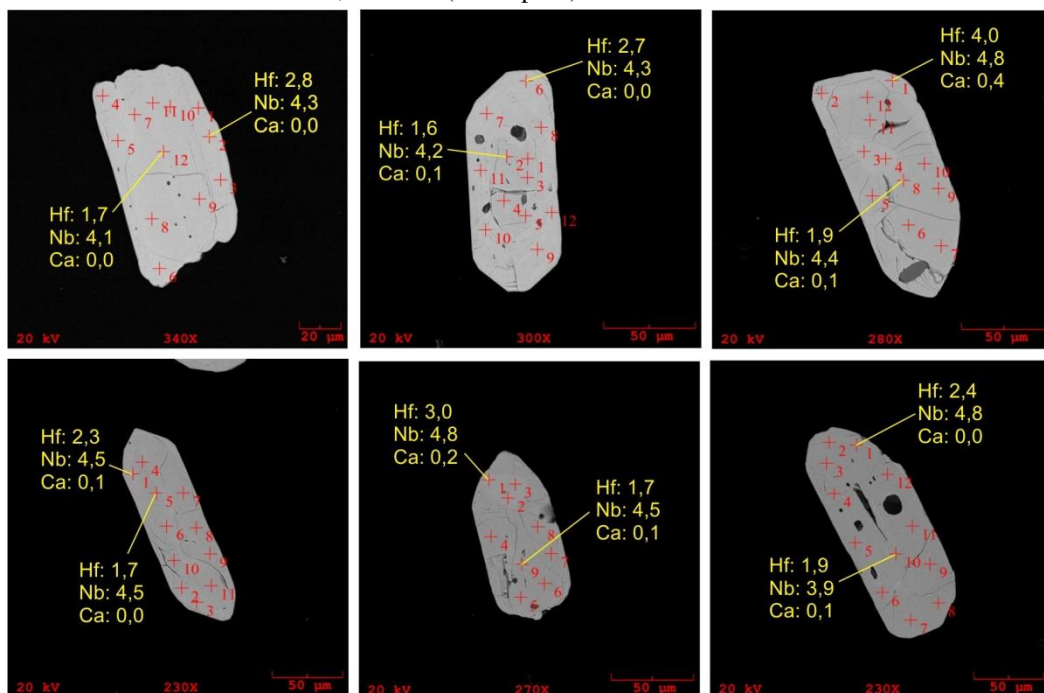
Tabela 8- Resultado das análises em EDS dos cristais de F-apatita inclusas nos zircões, amostra MD-01.

SEÇÃO	ZIRCÃO	O	F	P	Cl	Ca	Sr	La	Ce
MD-01	Zr 02 ₁	32,1	2,3	21,6	0,1	41,9	0,4	0,6	1,0
	Zr 02 ₂	33,7	3,0	21,1	0,1	40,6	0,3	0,4	0,8
	Zr 02 ₃	32,7	2,5	21,5	0,1	41,3	0,4	0,6	0,9
	Zr 03	35,5	3,1	20,8	0,1	38,8	0,4	0,3	1,0
	Zr 04	34,4	3,0	21,3	0,1	39,6	0,3	0,4	0,9
	Zr 05	32,2	2,3	21,8	0,1	41,6	0,4	0,4	1,2
	Zr 07	33,3	2,5	21,3	0,1	41,5	0,3	0,4	0,7
	Zr 09	32,5	2,6	21,3	0,1	41,8	0,4	0,4	0,9
	Zr 11	36,3	2,9	20,9	0,0	38,3	0,3	0,7	0,5
	Zr 12	33,9	2,6	20,9	0,0	40,9	0,3	0,4	0,9
	Zr 13 ₁	35,2	3,2	21,4	0,0	38,7	0,3	0,3	0,8
	Zr 13 ₂	37,0	3,0	20,6	0,0	37,8	0,4	0,5	0,7

Fonte: este estudo.

Em termos geoquímicos os zircões da amostra MD-01 possuem concentrações de Nb entre 4,2 e 4,7%, sendo essas últimas as mais baixas dentre os zircões das três amostras do Granito Vila Jussara (Figura 32; Figura 36). As razões Zr/Hf variam entre 21,2 e 31,9 e os conteúdos de Ta são predominantemente abaixo de 1,0%, proporcionando razões Nb/Ta médias entre 4,5 e 6,9 (Tabela 9), muito próximas daquelas encontradas nos zircões da amostra MD-02 (4,8 a 6,2), porém inferiores as dos zircões da amostra AMP-27 da porção sul do Granito Vila Jussara (5,9 a 7,6).

Figura 32- Imagens em ERE analisada por EDS, de alguns cristais de zircão da seção MD-01, mostrando os conteúdos de Hf, Nb e Ca (% em peso).



Fonte: este estudo.

Tabela 9- Resultados da análise química dos zircões da seção MD-01, mostrando os teores médios de O, Si, Ca, Nb, Ta, U, Zr, Hf e das razões Zr/Hf, Zr/Ca e Nb/Ta, com destaque para os menores valores de Nb dentre todos os zircões do Granito Vila Jussara analisados.

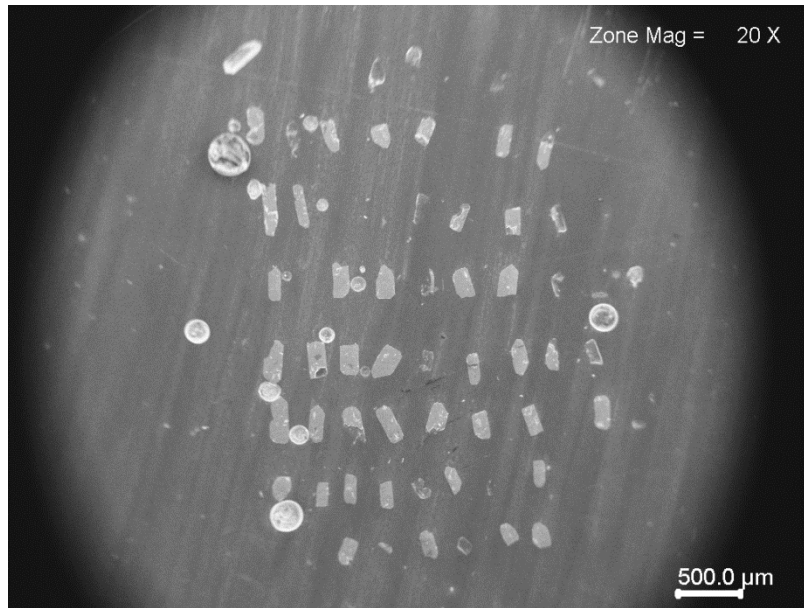
SEÇÃO	ZIRCÃO	O	Si	Ca	Nb	Ta	Zr	Hf	U	Zr/Hf	Nb/Ta	Zr/Ca
MD-01	Zr 01	16,3	15,0	0,1	4,3	0,8	60,4	2,2	0,2	27,7	5,3	943,1
	Zr 02	16,5	14,9	0,1	4,2	0,9	60,3	1,9	0,2	31,9	4,9	693,7
	Zr 03	16,4	14,9	0,1	4,3	0,9	60,0	2,4	0,2	24,9	5,0	732,3
	Zr 04	17,0	14,8	0,1	4,4	0,8	60,0	1,9	0,2	31,7	5,5	799,5
	Zr 05	16,3	14,9	0,1	4,5	0,8	60,0	2,5	0,2	23,7	5,9	499,8
	Zr 06	16,8	14,8	0,1	4,5	0,9	59,9	2,1	0,2	29,1	5,1	1197,2
	Zr 07	16,6	14,8	0,1	4,6	0,9	59,8	2,2	0,2	27,7	5,3	695,9
	Zr 08	16,5	14,9	0,1	4,4	0,8	59,4	2,8	0,2	21,2	5,4	460,1
	Zr 09	16,6	14,9	0,1	4,6	0,7	60,1	1,9	0,2	31,3	6,1	770,4
	Zr 10	15,9	15,0	0,1	4,6	1,0	60,4	2,0	0,2	30,5	4,8	1022,9
	Zr 11	16,3	14,9	0,1	4,6	0,9	60,0	2,2	0,2	27,8	5,2	909,1
	Zr 12	16,6	14,9	0,1	4,5	0,8	60,2	1,9	0,2	31,7	5,5	847,5
	Zr 13	17,0	14,8	0,1	4,5	0,8	59,6	2,1	0,2	29,0	5,7	425,6
	Zr 14	16,6	14,9	0,1	4,7	0,8	59,8	2,1	0,2	29,0	5,5	906,1
	Zr 15	16,7	14,8	0,1	4,5	0,9	60,1	2,0	0,2	30,8	5,2	780,9
	Zr 16	16,1	14,9	0,1	4,4	0,9	60,3	2,1	0,2	28,5	5,2	591,0
	Zr 17	16,1	15,0	0,2	4,5	0,8	60,3	2,1	0,2	28,7	5,3	399,3
	Zr 18	16,2	14,9	0,2	4,5	0,8	59,9	2,2	0,2	27,3	5,3	274,6
	Zr 19	16,6	14,9	0,1	4,3	0,8	59,9	2,1	0,2	28,7	5,5	430,7
	Zr 20	16,2	14,9	0,1	4,5	0,9	59,9	2,3	0,2	26,5	5,2	521,3
	Zr 21	16,3	14,9	0,1	4,4	1,0	59,7	2,3	0,2	26,2	4,5	474,0
	Zr 22	15,9	15,0	0,3	4,5	0,9	59,6	2,4	0,2	24,6	4,9	181,2
	Zr 23	16,5	14,9	0,1	4,5	0,8	60,0	2,0	0,2	29,8	5,3	779,2
	Zr 24	16,3	14,9	0,1	4,5	0,9	60,1	2,2	0,2	27,5	5,2	984,7
	Zr 25	16,7	14,8	0,1	4,5	0,8	59,8	2,2	0,2	26,6	5,5	553,5
	Zr 26	16,7	14,8	0,2	4,4	0,9	59,6	2,3	0,2	26,2	5,1	327,3
	Zr 27	16,5	14,9	0,1	4,6	0,9	59,9	2,1	0,2	28,9	5,3	637,7
	Zr 28	17,4	14,9	0,1	4,2	0,7	59,5	2,3	0,2	26,2	6,3	620,3
	Zr 29	16,7	14,9	0,1	4,3	0,7	60,2	2,2	0,2	27,7	5,9	781,8
	Zr 30	17,2	14,8	0,1	4,4	0,8	59,2	2,5	0,1	23,2	5,8	696,6
	Zr 31	16,8	14,9	0,1	4,5	0,7	60,0	2,1	0,2	28,4	6,3	810,4
	Zr 32	16,9	14,8	0,1	4,5	0,8	60,0	1,9	0,1	31,5	5,4	1053,0
	Zr 33	17,3	14,7	0,1	4,4	0,9	59,5	2,0	0,1	29,7	5,2	863,0
	Zr 34	17,2	14,8	0,1	4,4	0,8	59,7	2,0	0,2	30,6	5,6	775,4
	Zr 35	17,5	14,8	0,1	4,4	0,7	59,4	2,1	0,2	28,4	6,1	872,9
	Zr 36	16,7	14,9	0,1	4,7	0,8	59,8	2,1	0,2	28,4	6,0	818,8
	Zr 37	17,0	14,8	0,1	4,5	0,7	59,8	2,1	0,1	28,1	6,9	1031,8
	Zr 38	17,3	14,8	0,1	4,4	0,8	59,7	2,1	0,2	28,7	5,8	745,9

Fonte: este estudo.

5.2.3 Seção MD-02

A imagem abaixo mostra a seção MD-02 com aproximadamente 70 zircões, dos quais 20 cristais foram selecionados para estudo.

Figura 33- Imagem de ERE. Visão geral dos zircões selecionados da amostra MD-02.



Fonte: este estudo.

Os 20 cristais de zircão analisados na amostra MD-02 são, de modo geral, homogêneos, mostram finas fraturas internas no sentido núcleo-borda, núcleos cinza-escuros e ausência de inclusões de apatita; alguns cristais mostram zoneamento composicional pouco expressivo, sugerindo condições físico-químicas mais estáveis durante sua cristalização (Figura 34. 1, 5, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 19).

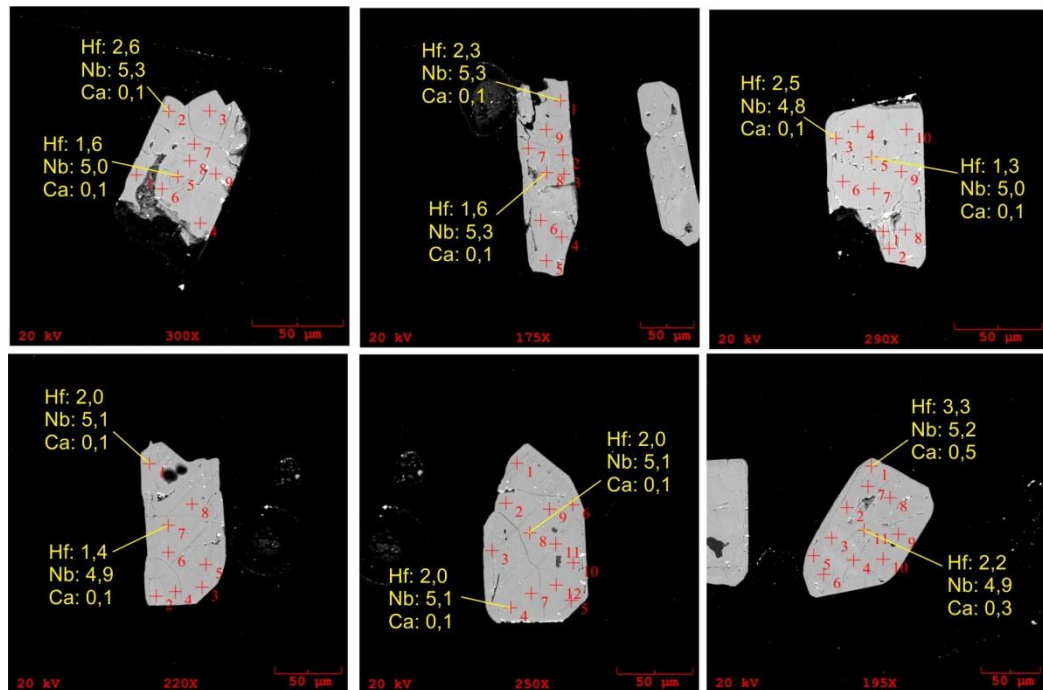
Figura 34- Imagens de catodoluminescência representativas dos zircões da amostra MD-02.
Kfs= K-feldspato; Qz= quartzo.



Fonte: este estudo.

Geoquimicamente são zircões homogêneos, com razões Zr/Hf variando entre 25,5 e 36,5 (Tabela 10), semelhantes aquelas encontradas nos zircões da amostra AMP-27 (26,5 a 35,5). Seus conteúdos médios de Nb variam de 4,9 a 5,5% (Figura 35; Figura 36), sendo intermediários em relação aos dos zircões das outras duas amostras do Granito Vila Jussara (AMP-27 e MD-01).

Figura 35- Imagens em ERE analisadas por EDS, de alguns cristais de zircão da seção MD-02, mostrando os conteúdos de Hf, Nb e Ca (% em peso).



Fonte: este estudo.

Tabela 10- Resultados da análise química dos zircões da seção MD-02, mostrando os teores médios de O, Si, Ca, Nb, Ta, U, Zr, Hf, e das razões Zr/Hf, Zr/Ca e Nb/Ta.

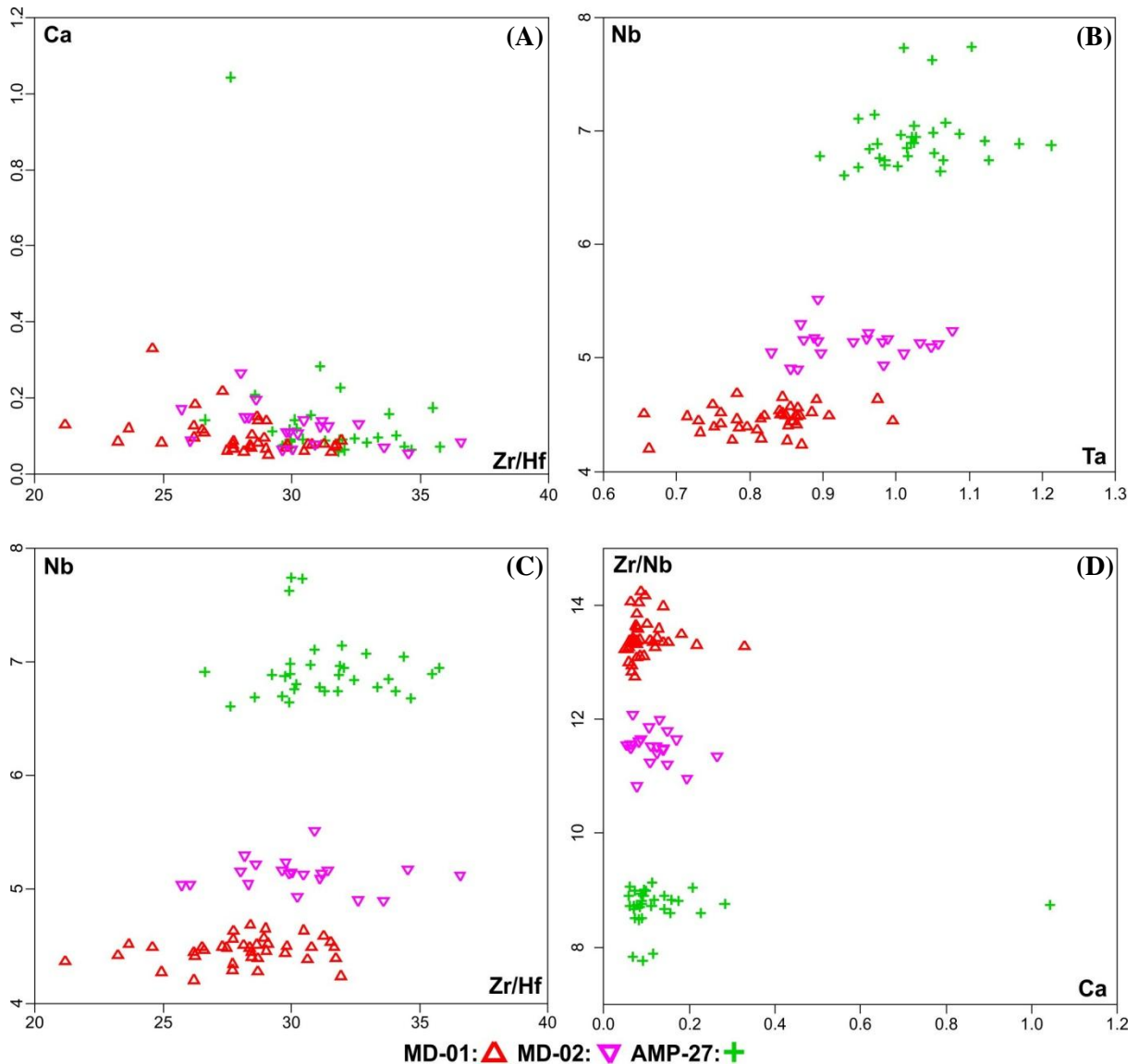
SEÇÃO	ZIRCÃO	O	Si	Ca	Nb	Ta	Zr	Hf	U	Zr/Hf	Nb/Ta	Zr/Ca
MD-02	Zr 01	16,1	14,8	0,1	5,5	0,9	59,7	1,9	0,2	30,9	6,2	775,7
	Zr 02	17,2	14,7	0,3	5,2	0,9	58,6	2,1	0,2	28,0	5,9	221,1
	Zr 03	16,4	14,7	0,1	5,3	0,9	59,4	2,1	0,2	28,2	6,1	398,7
	Zr 04	16,6	14,8	0,1	5,1	1,0	59,3	2,0	0,2	29,9	5,2	539,1
	Zr 05	16,9	14,7	0,1	5,1	0,9	59,1	1,9	0,2	31,2	5,5	425,4
	Zr 06	16,5	14,7	0,1	5,0	0,8	59,5	2,1	0,2	28,3	6,1	399,7
	Zr 07	16,5	14,7	0,1	5,2	0,9	59,8	1,7	0,2	34,5	5,8	1107,0
	Zr 08	17,3	15,8	0,2	5,2	1,0	57,2	2,0	0,4	28,6	5,4	293,5
	Zr 09	16,5	14,8	0,1	5,2	1,0	59,4	2,0	0,2	29,6	5,4	943,2
	Zr 10	17,3	14,6	0,1	5,1	1,0	58,7	1,9	0,2	31,1	4,9	473,7
	Zr 11	16,7	14,6	0,1	5,2	1,1	58,9	2,0	0,2	29,8	4,9	540,6
	Zr 12	16,8	14,7	0,1	5,1	1,1	59,5	1,6	0,2	36,6	4,8	716,6
	Zr 13	17,4	14,7	0,1	4,9	0,9	59,3	1,8	0,2	33,6	5,7	858,7
	Zr 14	17,1	14,6	0,1	5,1	1,0	58,9	1,9	0,2	30,5	5,0	420,7
	Zr 15	16,5	14,8	0,1	5,2	0,9	59,6	2,0	0,2	30,0	5,8	931,4
	Zr 16	17,1	14,7	0,1	5,2	1,0	58,9	1,9	0,2	31,4	5,2	475,3
	Zr 17	17,0	14,6	0,1	5,0	0,9	58,8	2,3	0,2	26,1	5,6	675,9
	Zr 18	17,6	14,6	0,1	4,9	1,0	58,6	1,9	0,2	30,2	5,0	552,4
	Zr 19	17,1	14,6	0,2	5,0	1,0	58,7	2,3	0,2	25,7	5,0	345,3
	Zr 20	17,5	14,7	0,1	4,9	0,9	58,9	1,8	0,2	32,6	5,7	449,4

Fonte: este estudo.

5.2.4 Diagramas geoquímicos dos zircões do Granito Vila Jussara

No diagrama Ca x Zr/Hf (Figura 36 A) os zircões do Granito Vila Jussara são empobrecidos em Ca, com teores de 0,1 a 0,3% e razões Zr/Hf mais baixas nos zircões da amostra MD-01 (21,2 a 31,9) e coincidentes nas amostras MD-02 (25,7 a 36,6) e AMP-27 (26,6 a 35,8). Nb e Ta mostram comportamento distinto, com os zircões da amostra MD-01 apresentando os menores conteúdos e razão Zr/Nb mais elevada, MD-02 com conteúdos de Nb, Ta e razão Zr/Nb intermediárias e a amostra AMP-27 com teores mais elevados de Nb e Ta e as mais baixas razões Zr/Nb (Figura 36 B,D).

Figura 36- Diagramas geoquímicos mostrando a distribuição dos zircões estudados no granito Vila Jussara em termos de Nb, Ta, Ca (% peso) e das razões Zr/Hf, Zr/Nb.



Fonte: este estudo.

6 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Estudo comparativo dos zircões do granito Planalto e Vila Jussara

O estudo dos zircões pertencentes a ambos os corpos e feito a partir do conjunto MEV-ERE-EDS-CL permitiu as seguintes considerações:

Granito Planalto

- Aspectos morfológicos

As diferenças morfológicas entre as seções RD-02 e RD-05 são marcantes, provavelmente devido ao intenso fraturamento associado ao cinturão de cisalhamento Itacaiúnas onde se localiza a seção RD-02; a mesma apresenta zircões predominantemente anédricos a subédricos, escuros, intensamente fraturados e com zoneamento composicional incipiente a inexistente. Por outro lado a seção RD-05, localizada fora da zona de cisalhamento, apresenta zircões predominantemente subédricos a euédricos, luminescentes, geralmente com núcleos metamíticos cinza-escuros, apresentando fraturas internas que irradiam no sentido núcleo-borda do cristal e zoneamento composicional evidente.

- Aspectos Geoquímicos

Os zircões deformados presentes na amostra RD-02 do Granito Planalto apresentaram os menores teores de Nb e os maiores conteúdos de Ca em relação a todos os outros zircões estudados, sugerindo que a deformação contribuiu para essas feições geoquímicas, facilitando a entrada de Ca e a retirada do Nb na malha do zircão. Por outro lado, os zircões não deformados da amostra RD-05 apresentaram concentrações distintas de Nb, tendo um grupo valores em torno de 5 a 6% e outro com concentrações mais elevadas de Nb dentre todos os zircões estudados, entre 7 e 8% o que pode estar relacionado a duas fácies distintas (Figura 37 B,C,D).

Granito Vila Jussara

- Aspectos morfológicos

As seções AMP-27, MD-01 e MD-02 possuem zircões predominantemente subédricos a euédricos com diferenças morfológicas evidentes. A seção AMP-27 possui cristais com núcleos metamíticos escuros, por vezes apresentando fraturas internas no sentido núcleo-borda; tais núcleos se apresentam envoltos por zonas de crescimento mais luminescentes, sugerindo mudança composicional; raros cristais mostram núcleos isentos ou fracamente zonados (homogêneos), sugerindo crescimento em condições físico-químicas mais estáveis. A seção MD-01 apresenta zircões zonados, fraturados, luminescentes ou com núcleos

luminescentes envoltos por bordas escuras, sugerindo que houve mudança composicional do magma no seu contínuo processo de cristalização. Alguns cristais mostram núcleos metamíticos escuros envoltos por zircão luminescente, com raros cristais mostrando núcleo luminescente subarredondado típico de cristal herdado. A seção MD-02 possui cristais cinza-esbranquiçados com núcleos cinza-escuros e, de um modo geral, homogêneos; microfraturas internas no sentido núcleo-borda são comuns; os cristais apresentam zoneamento composicional predominantemente pouco expressivo, sugerindo condições físico-químicas mais estáveis durante sua cristalização.

- Aspectos Geoquímicos

Geoquimicamente as três seções apresentam zircões com concentrações relativamente similares em relação aos elementos analisados, com exceção do Nb onde a amostra AMP-27 possui zircões com conteúdos entre 6,6 e 7,7%, sendo esses os maiores valores dentre os zircões do Granito Vila Jussara; esses conteúdos mais elevados de Nb podem decorrer de serem essas rochas petrograficamente mais evoluídas que as outras duas. Contrariamente, a seção MD-01 apresenta zircões com as menores concentrações de Nb (4,2 e 4,7%), enquanto nos zircões da seção MD-02 o Nb é intermediário, entre 4,9 e 5,5% (Figura 37 B,C,D).

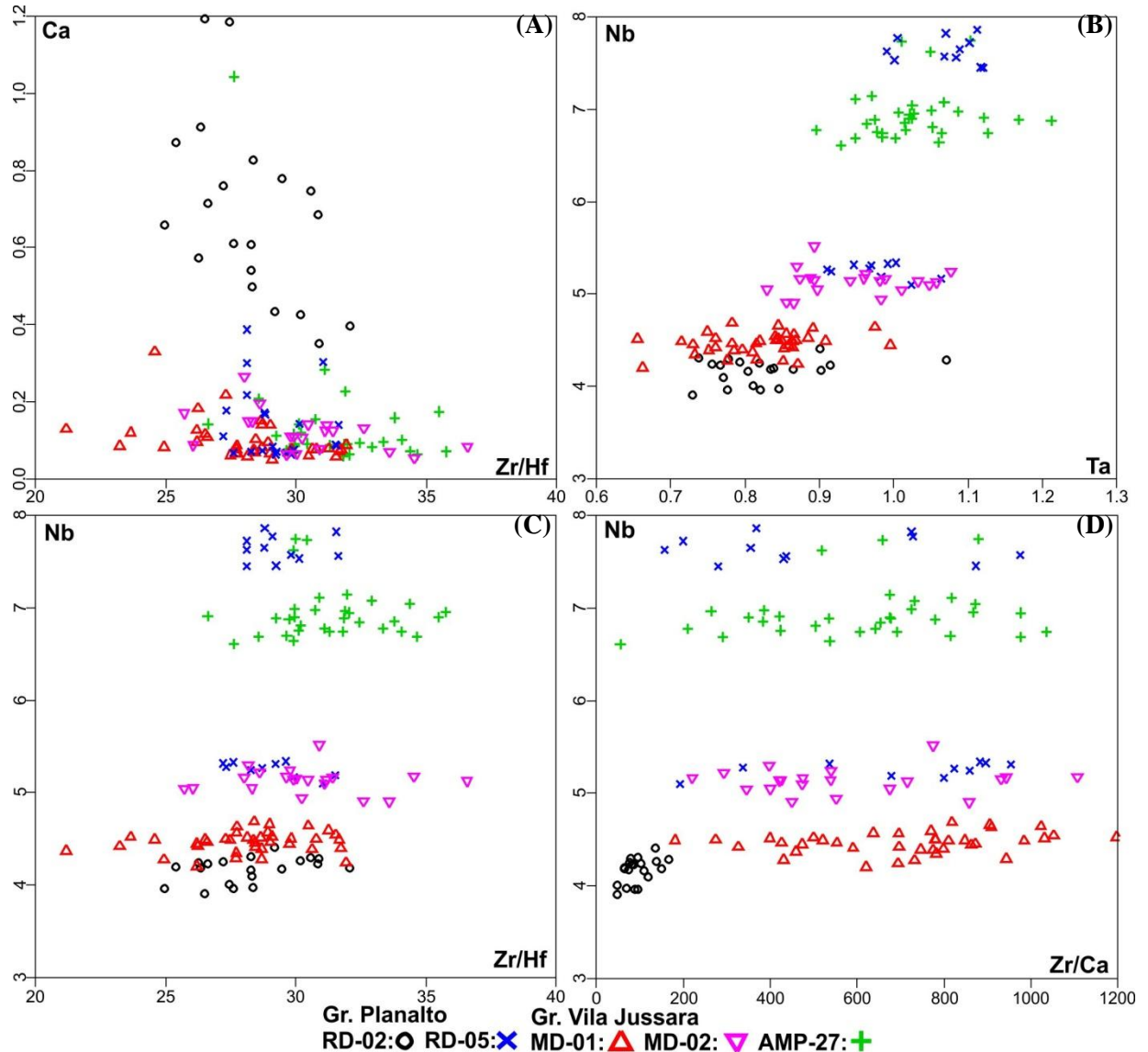
Outras considerações

A presença de inclusões de F-apatita nos zircões estudados é uma feição comum a todas as seções analisadas, com exceção a amostra MD-02 do granito Vila Jussara. Os cristais de F-apatita ocorrem predominantemente nas bordas dos cristais e truncam suas zonas de crescimento; localmente formam inclusões no núcleo dos cristais de zircão ou acompanham suas zonas de crescimento, indicando uma fase mineral tão precoce quanto o zircão na sequência de cristalização dessas rochas. A presença de apatita como inclusão nos zircões sugere também que o magma gerador dos granitos estudados era algo enriquecido em Ca, P, F e Ce.

Al, Ca, Fe, Mn e F em zircões são considerados como elementos “não primários” de sua estrutura, mas que foram incorporados após metamictização parcial (BREITER et al., 2014). Os teores mais elevados de Ca, e mais baixos de Zr, encontrados nos zircões deformados da amostra RD-02 em relação aos zircões dos outros corpos graníticos confirmam uma maior metamictização dos zircões daquela amostra e a existência de substituição direta entre esses dois elementos. Na figura 37 (D) é possível observar as menores razões Zr/Ca da amostra RD-02, as outras amostras possuem razões muito semelhantes, pois seus zircões não foram afetados pela deformação e metamictização.

O Hf é um elemento incompatível que comumente substitui o Zr na estrutura do zircão. O aumento no conteúdo de Hf provoca sistematicamente a redução na razão Zr/Hf, a qual pode ser utilizada como um bom indicador de fracionamento do magma parental (BREITER et al., 2014). Os granitos Planalto e Vila Jussara possuem zircões com razões Zr/Hf médias que variam de 24,9 a 32,0 e 21,2 a 36,6 respectivamente (Figura 37 A,C), sugerindo fracionamento similar de seus magmas.

Figura 37- Diagramas geoquímicos mostrando a distribuição dos zircões estudados em termos de Nb, Ta, Ca e razões Zr/Hf, Zr/Ca.



Fonte: este estudo.

O conjunto MEV-ERE-EDS-CL demonstra ser uma ferramenta importante para este tipo de trabalho, fornecendo informações complementares para estudos petrológicos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.A.C.; DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, M.A.; MACAMBIRA, M.J.B.; PIMENTEL, M.M.; RAMO, O.T.; GUIMARÃES, F.V.; LEITE, A.A.S. Zircon geochronology and geochemistry of the TTG suites of the Rio Maria Granite-Greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of the Carajás Province, Brazil. **Precambrian Research**, v. 187, p. 201-221. 2011.
- ALMEIDA, J.A.C.; DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, M.A.; LEITE, A.A.S.; ALTHOFF, F.J. Evolução geológica mesoarqueana do Domínio Rio Maria, Porção Sul da Província Carajás. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 13., Belém. **Anais...** Belém: SBG, 2013. p. 1059-1061.
- ALTHOFF, F.J.; BARBEY, P.; BOULLIER, A.M. 2.8-3.0 Ga Plutonism and Deformation in the SE Amazonian Craton: The Archean Granitoids of Marajoara (Carajás Mineral province, Brazil). **Precambrian Research**, v. 104, p. 187-206. 2000.
- ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N.; JORGE JOÃO, X.S.; COSTA, J.B.S. A megaestrutura arqueana da Folha Serra dos Carajás. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO GEOLOGIA. 1988, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 1988.p.324-338.
- ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N. **Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás. Subprojeto Recursos Minerais. Folha SB.22-Z-A Serra dos Carajás - Estado do Pará.** Brasília, DF: DNPM/CPRM, 1991. 136p.
- AVELAR, V.G. **Geocronologia Pb-Pb por evaporação em monocristal de zircão do magmatismo da região de Tucumã, SE do Estado do Pará, Amazônia Oriental.** 1996. 149f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 1996.
- BARROS, C.E.M.; MACAMBIRA, M.J.B.; BARBEY, P.; SELLER, T. Dados isotópicos pb-pb em zircão (evaporação) e sm-nd do Complexo granítico estrela, província mineral de Carajás, Brasil: implicações petrológicas e tectônicas. **Rev. Bras. de Geociências**, (34) 4, p.531-538. 2004.
- BARROS, C.E.M.; SARDINHA, A.S.; BARBOSA, J.P.O.; MACAMBIRA, M.J.B. Structure, petrology, geochemistry and zircon U/Pb and Pb-Pb geochronology of the synkinematic Archean (2.7 Ga) A-type granites from the Carajás Mettalogenic Province, Northern Brazil. **Canadian Mineralogist**, v. 47, p.1423-1440. 2009.
- BELOUSOVA, E.A.; GRIFFIN, W.L. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. **Contribution to Mineralogy and Petrology**, v. 143, p.602-622. 2002.
- BREITER, K.; LAMARÃO, C.N.; BORGES, R.M.K.; DALL'AGNOL, R. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites. **Lithos**, v. 192-195, p.208-225. 2014.
- CORFU, F.; HANCHAR, J.M.; HOSKIN, P.W.O.; KINNY, P. Atlas of Zircon textures. In: Hanchar JM, Hoskin PWO (eds.) Zircon. **Mineralogical Society of America and Geochemical Society, Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 53, p.469-500. 2003.

COSTA, J.B.S.; ARAÚJO, O.J.B.; SANTOS, A.; JORGE JOÃO, X.S.; MACAMBIRA, M.J.B.; LAFON, J.M. A Província Mineral de Carajás: aspectos tectono-estruturais, estratigráficos e geocronológicos. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Série Ciências da Terra, n. 7, p.199-235. 1995.

DALL'AGNOL, R.; SOUZA, Z.S.; ALTHOFF, F.J.; BARROS, C.E.M.; LEITE, A.A.S.; JORGE JOÃO, X.S. General aspects of the granitogenesis of the Carajás metallogenic province. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GRANITES AND ASSOCIATED MINERALIZATIONS, 2.,1997, Salvador: Superintendência de Geologia e Recursos Minerais-SGRM, 1997. p.135-161.

DALL'AGNOL, R.; TEIXEIRA, N.P.; RAMO, O.T.; MOURA, C.A.V.; MACAMBIRA, M.J.B.; OLIVEIRA, D.C. Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi, A-type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. **Lithos**, v. 80, p.101-129. 2005.

DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, M.A.; ALMEIDA, J.A.C.; ALTHOFF, F.J.; LEITE, A.A.S.; OLIVEIRA, D.C.; BARROS, C.E.M. Archean and paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian craton. In: Dall'Agnol, R., Rosa-Costa, L. T. & Klein, E. L. (eds) SYMPOSIUM ON MAGMATISM, CRUSTAL EVOLUTION, AND METALLOGENESIS OF THE AMAZONIAN CRATON. Volume and Field Trips Guide. **Abstracts...** Belem: PRONEX-UFPA/SBG-NO, 2006. p.99-150.

DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, D.C.; GUIMARÃES, F.V.; GABRIEL, E.O.; FEIO, G.R.L.; LAMARÃO, C.N.; ALTHOFF, F.J.; SANTOS, P.A.; TEIXEIRA, M.F.B.; SILVA, A.C.; RODRIGUES, D.S.; SANTOS, M.J.P.; SILVA, C.R.P.; SANTOS, R.D.; SANTOS, P.J.L. Geologia do Subdomínio de Transição do Domínio Carajás- Implicações para a evolução Arqueana da Província Carajás-Pará. SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 13., **Anais...** Belém: SBG, 2013a. p.1082-1085.

DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, D.C.; LAMARÃO, C.N. Magmatismo granitoide arqueano e evolução geológica do Subdomínio de Transição da Província Carajás, sudeste do Cráton Amazônico, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ciências Naturais 8(3), p.251-256. 2013b.

DOCEGEO (Rio Doce Geologia e Mineração - Distrito Amazônia) Revisão litoestratigráfica da província Mineral de Carajás, Pará. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35., **Anexos**. Belém: SBG, Vol. Província Mineral de Carajás-Litoestratigrafia e Principais Depósitos Minerais, 1988. p.11-54.

FEIO, G.R.L. **Magmatismo granitoide arqueano da área de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução crustal da Província Carajás**. 2011. 187f. Tese (Doutorado)-Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2011.

FEIO, G.R.L.; DALL'AGNOL, R.; DANTAS, E.L.; MACAMBIRA, M.J.B.; GOMES, A.C.B.; SARDINHA, A.S.; SANTOS, P.A. Geochemistry, geochronology, and origin of the neoproterozoic Planalto Granite Suite, Carajás, Amazonian Craton: A-type or hydrated charnockitic granites? **Lithos**, v. 151, p.57-73. 2012.

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. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. **Precambrian Research**, v. 227, p.157-185. 2013.

FOWLER, A.; PROKOPH, A.; STERN, R.; DUPUIS C. Organization of oscillatory zoning in zircon: Analysis, scaling geochemistry, and model of a zircon from Kipawa, Quebec, Canada. **Geochimica at Cosmochimica**, Acta, v. 66, p.311-328. 2002.

GABRIEL, E.O. **Geologia, geoquímica e petrologia magnética da porção nordeste de Água Azul do Norte, Provincia Carajás**. 2012. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2012.

GOMES, A.C.B.; DALL'AGNOL, R. Nova associação tonalítica-trondhjemítica Neoarqueana na região de Canaã dos Carajás: TTG com altos conteúdos de Ti, Zr e Y. **Rev. Bras de Geociências**, v.37, p.182-193. 2007.

GOMES, A.C.B. **Geologia petrografia e geoquímica dos granitoides da Canaã dos Carajás, SE do Estado do Pará**. 2003. 160f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2003.

HANCHAR, J.M.; MILLER, C.F. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: implications for interpretation of complex crustal histories. **Chemical Geology**, v. 110, p.1-13. 1993.

HANCHAR, M.; RUDNICK, R.L. The application of cathodoluminescence and back-scattered electron imaging to dating zircons from lower crustal xenoliths. **Lithos**, v. 36, p.289-303. 1995.

HEAMAN, L.M.; TARNEY, J. U-Pb baddeleyite ages for the Scourie dyke swarm, Scotland: evidence for two distinct intrusion events. **Nature**, v. 340, p.705-708. 1989.

HEAMAN, L.M.; OWINS, B.R.; CROCKET, J. The chemical composition of igneous zircon suites: Implications for geochemical tracer studies. **Geochimica at Cosmochimica**, Acta, v. 54, p.1597-1607. 1990.

HOSKIN, P.W.O.; IRELAND, T.R. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. **Geology**, v. 28, p.627-630. 2000.

HUHN, S.R.B.; SANTOS, A.B.S.; AMARAL, A.F.; LEDSHAM, E.J.; GOUVEIA, J.L.; MARTINS, L.B.P.; MONTALVÃO, R.M.G.; COSTA, V.G. O terreno granito-greenstone da região de Rio Maria - sul do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., Belém: SBG, 1988. p.1438-1453.

HUHN, S.B.; MACAMBIRA, M.J.B.; DALL'AGNOL, R. Geologia e Geocronologia Pb-Pb do Granito Alcalino Planalto, Região da Serra do Rabo, Carajás-PA. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 6., **Boletim de Resumos Expandidos**, 1999. p.463-466.

KEMPE, U.; GRUNER, T.; RENNO, A.D.; WOLF, D. Hf-rich zircon in rare-metal bearing granites: Magmatic or metasomatic origin? In: **Mineral Deposits: Research and Exploration**, 1997. p.643-646.

KEMPE, U.; GRUNER, T.; RENNO, A.D.; WOLF, D.; RENE, M. Discussion on Wang *et al.* (2000) "Chemistry of Hf-rich zircons from the Laoshan I- and A-type granites, Eastern China". **Mineralogical Magazine**, v. 64, p.867-877. 2004.

LAMARÃO, C.N.; DALL'AGNOL, R.; SOLEDADE, G.L.; SILVA, J.S. Variações composicionais de zircão em granitos anorogênicos proterozóicos do Cráton Amazônico: implicações metalogenéticas. **Rev. Bras. Geol**, v. 37, n.4, p.693-704. 2007.

LAMARÃO, C.N.; DALL'AGNOL, R.; SILVA, J.S.; SOLEDADE, G.L. Morphological and compositional variation in zircons of tin-specialized Paleoproterozoic A-type granites of the Amazonian craton: Metallogenic implications. INTERNATIONAL CONFERENCE ON A-TYPE GRANITES AND RELATED ROCKS THROUGH TIME (IGCP-510). Helsinki, Finland, 2010. p.68-70.

LAMARÃO, C.N.; BORGES, R.M.K.; MARQUES, G.T. Catodoluminescência em cristais de quartzo: implicações petrológicas e metalogenéticas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ciências Naturais v. 9, n.1, p. 73-91. 2014a.

LAMARÃO, C.N.; SILVA, J.S.; BORGES, R.M.K.; DALL'AGNOL, R. Morphological and compositional variations of zircon and their metallogenic implications: the example of the Jamon, Serra dos Carajás and Velho Guilherme suites, Amazonian Craton. **Brazilian Journal of Geology**, v. 44, n.1, p.105-120. 2014b.

LEITE, A.A.S.; DALL'AGNOL, R.; ALTHOFF, F.J. Geoquímica e aspectos petrogenéticos do Granito Xinguara, terreno granito-greenstone de Rio Maria – Cráton Amazônico. **Rev. Bras. de Geociências**, v. 23, n.3, p.429-436. 1999.

LEITE, A.A.S. **Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitoides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico**. 2001. 330f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Belém, 2001.

MACAMBIRA, M.J.B.; LAFON, J.M. Geocronologia da Província Mineral de Carajás; síntese dos dados e novos desafios. **Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi**, série Ciências da Terra. v. 7, p.263-288. 1995.

MACHADO, N.; LINDENMAYER, Z.G.; KROGH, T.E.; LINDENMAYER, D. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. **Precambrian Research**, v. 49, p.329-354. 1991.

MALISKA, A.M. **Microscopia eletrônica de varredura**. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica – LABMAT. (Apostila).

MURALI, A.V.; PARTHASARATHY, R.; MAHADEVAN, T.M.; SANKAR das M. Trace element characteristics, REE patterns and partition coefficients of zircons from different geological environments- a case study on Indian zircons. **Geochimica at Cosmochimica, Acta**, v. 47, p.2047-2052. 1983.

NOGUEIRA, A.C.R.; TRUCKENBRODT, W.; PINHEIRO, R.V.L. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica. **Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi**, v. 7, p.177-277. 1995.

OLIVEIRA, D.C.; SANTOS, P.J.L.; GABRIEL, E.O.; RODRIGUES, D.S.; FARESin, A.C.; SILVA, M.L.T.; SOUSA, S.D.; SANTOS, R.V.; SILVA, A.C.; SOUZA, M.C.; SANTOS, R.D.; MACAMBIRA, M.J.B. Aspectos geológicos e geocronológicos das rochas magmáticas e metamórficas da região entre os municípios de Água Azul do Norte e Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 45., 2010, Belém: SBG, 2010.

- OLIVEIRA, M.A.; DALL'AGNOL, R.; ALTHOFF, F.J.; LEITE, A.A.S. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 27, p.146-160. 2009.
- PIMENTEL, M.M.; MACHADO, N. Geocronologia U-Pb dos Terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38. Camboriú, 1988. **Boletim de Resumos Expandidos**. Camboriú: SBG. 1994, p.390-391.
- PUPIN, J.P. Granite genesis related to geodynamics from Hf-Y in zircon. **Transactions of the Royal Society of Edinburgh Earth Sci.**, v. 91, p.245-256. 2000.
- REED, S.J.B. **Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology**. Cambridge: Cambridge University Press., 1996. p.201.
- SANTOS, J.O.S.; HARTMANN, L.A.; GAUDETTE, H.E.; GROVES, D.I.; MCNAUGHTON, N.J.; FLETCHER, I.R. A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. **Gondwana Research**, v. ou n 3, p.453-488. 2000.
- SANTOS, J.O.S.; HARTMANN, L.A.; FARIA, M.S.G.; RIKER, S.R.L.; SOUZA, M.M.; ALMEIDA, M.E.; MCNAUGHTON, N.J. A Compartimentação do Cráton Amazonas em Províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 9., 2006, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 2006.1 CD ROM.
- SANTOS, P.A. **Geologia, petrografia e geoquímica da Associação Tonalito-Trondhjemitó Granodiorito (TTG) do extremo leste do Subdomínio de Transição, Província Carajás**. 2013. 113f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2013.
- SANTOS, R.D.; OLIVEIRA, D.C.; BORGES, R.M.K. Geologia e Petrografia das rochas máficas e ultramáficas do complexo Pium-Província Mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44., 2008, **Anais**, Curitiba: SBGEO, 2008. p.535.
- SANTOS, R.V.; OLIVEIRA, D.C. Estudo petrográfico de dois stocks granítico, tipo Planalto da região de Vila Feitosa, Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás. Magmatismo Paleoproterozóico e Nearqueano da Província Mineral de Carajás - PA: Mineralogia, Colocação e Implicação para Evolução Crustal. **Relatório técnico-Científico**. PARD-2007/PROPEP, 2008.
- SANTOS, R.V. **Geologia, petrografia e geocronologia de dois stocks graníticos associados ao magmatismo tipo-planalto da região de vila Feitosa, Canaã dos Carajás - Província Mineral de Carajás**. 2009. 110f. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação)- Universidade Federal do Pará, Campus de Marabá, 2009.
- SARDINHA, A.S.; DALL'AGNOL, R.; GOMES, A.C.B.; MACAMBIRA, M.J.B.; GALARZA, M.A. Geocronologia Pb-Pb e U-Pb em Zircão de granitoides arqueanos da região de Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42., 2004. 1 CD ROM.

SARDINHA, A.S. **Geocronologia das séries magmáticas e evolução crustal da região de Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás-PA**. 2005. Tese (Doutorado)- Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal Pará, Centro de Geociências, Belém, 2005.

SARDINHA, A.S.; BARROS, C.E.M.; KRYMSKY, R. Geology, geochemistry, and U-Pb geochronology of the Archean (2.74 Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Province, northern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 20, p.327-339. 2006.

SILVA, G.G.; LIMA, M.I.C.; ANDRADE, A.R.F.; ISSLER, R.S.; GUIMARÃES G. In: Brasil. Projeto RADAMBRASIL. Folha SC.22 Tocantins; Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da Terra. Rio de Janeiro. Cap.I, p.1-143. (Levantamento de Recursos Naturais, 4), 1974.

SILVA, M.L.T. **Geologia, petrografia e geocronologia do magmatismo de alto K da região de Vila Jussara, NE do município de Água Azul do Norte – Província Mineral de Carajás**. 2009. 103f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Universidade Federal do Pará, Campus de Marabá, 2009.

SILVA, A.C.; DALL'AGNOL, R.; GUIMARÃES, F.V.; OLIVEIRA, D.C. Geologia, petrografia e geoquímica de Associações Tonalíticas e Trondhjemíticas Arqueanas de Vila Jussara, Província Carajás, Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ciências Naturais, v. 9, n.1, p.13-45. 2014.

SOUZA, Z.S.; POTREL, A.; LAFON, J.M.; ALTHOFF, F.J.; PIMENTEL, M.M.; DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, C.G. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archean greenstone belt of Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the geodynamic evolution of the Amazonian Craton. **Precambrian Research**, v. 109, p.293–315. 2001.

SOUZA, M.C. **Geologia, petrografia e geocronologia do magmatismo de alto K da região de Velha Canadá, NE do município de Água Azul do Norte - Província Mineral de Carajás**. 2009. 120f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)- Universidade Federal do Pará, Campus de Marabá, 2009.

TASSINARI, C.C.G.; MACAMBIRA, M.J.B. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito Neves, B.B. **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. 2004, p.471-485.

TEIXEIRA, N.P.; BELLO, R.M.S.; BETTENCOURT, J.S. Inclusões fluidas do maciço granítico Antônio Vicente, Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. **Rev. Bras. de Geociências**, 32(1), p.135-146. 2002.

TEIXEIRA, L.R. Genesis versão 4.0. Aplicativo de modelamento geoquímico. Universidade Federal da Bahia, 2005.

TEIXEIRA, M.F.B. **Geologia, petrografia e geoquímica dos granitoides arqueanos da área de Sapucaia, Província Carajás**. 2013. 166f. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, 2013.

UHER, P.; BREITER, K.; KLECKA, M.; PIVEC, E. Zircon in highly evolved Hercynian Homolka Granite, Moldanubian Zone, Czech Republic: indicator of magma source and petrogenesis. **Geologica Carpathica**, 49(3), p.151-160. 1998.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO Microscópio Eletrônico de Varredura com EDS e Sistema de Nanolitografia. Laboratório de Filmes e Finos, instituto de Física. 1994. Disponível em: <<http://fap01.if.usp.br/~lff/mev.html>>. Acesso em 05/11/2014.

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. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará, 2008. 328p.

VAVRA, G.; GEBAUER, D.; SCHMID, R.; COMPSTON, W. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase. Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea zone (Southern Alps): An ion microprobe (SHRIMP) study. **Contribution to Mineralogy and Petrology**, v. 122, p.337-358. 1996.

WANG, R.C.; ZHAO, G.T.; LU, J.J.; CHEN, X.M.; XU, S.J.; WANG, D.Z. Chemistry of Hf-zircons from the Laoshan I- and A-type granites, Eastern China. **Mineralogical Magazine**, v. 64, p.867-877. 2000.

WANG, X.; GRIFFIN, W.L.; CHEN J. Hf contents and Zr/Hf ratios in granitic zircons. **Geochemical Journal**, v. 44, p.65-72. 2010.