



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

TESE DE DOUTORADO Nº 168

**PETROLOGIA EXPERIMENTAL E QUÍMICA MINERAL DAS
SUÍTES NEOARQUEANAS VILA JUSSARA E PLANALTO,
PROVÍNCIA CARAJÁS, AMAZÔNIA, BRASIL**

Tese apresentada por:

INGRID ROBERTA VIANA DA CUNHA

Orientador: Prof. Dr. Roberto Dall’Agnol (UFPA)

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Scaillet (Université’Orléans)

**BELÉM – PARÁ
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C972p Cunha, Ingrid Roberta Viana da.
Petrologia experimental e química mineral das suítes
Neoarqueanas Vila Jussara e Planalto, Província Carajás,
Amazônia, Brasil. / Ingrid Roberta Viana da Cunha. — 2023.
xxv, 167 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Roberto Dall'Agnol
Coorientador(a): Prof. Dr. Bruno Scaillet
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica,
Belém, 2023.

1. Petrologia experimental. 2. Química mineral. 3. Província
Carajás. 4. Neoarqueano. 5. Granitoides. I. Título.

CDD 552



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**PETROLOGIA EXPERIMENTAL E QUÍMICA MINERAL DAS
SUÍTES NEOARQUEANAS VILA JUSSARA E PLANALTO,
PROVÍNCIA CARAJÁS, AMAZÔNIA, BRASIL**


TESE APRESENTADA POR:

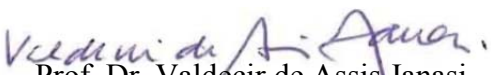
INGRID ROBERTA VIANA DA CUNHA

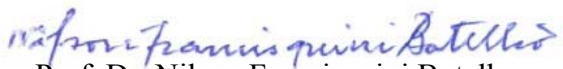
**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Doutora em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA, linha de pesquisa PETROLOGIA E EVOLUÇÃO
CRUSTAL.**

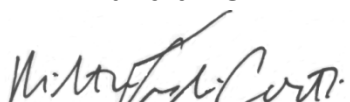
Data de aprovação: 20 / 03 / 2023


Banca examinadora:


Prof. Dr. Roberto Dall'Agno
Orientador – UFPA


Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi
Membro – USP


Prof. Dr. Nilson Francisquini Botelho
Membro – UnB


Prof. Dr. Hilton Tullio Costi
Membro – MPEG


Prof. Dr. Davis Carvalho de Oliveira
Membro – UFPA

À todas as mulheres geocientistas

AGRADECIMENTOS

Os objetivos alcançados nessa tese de doutorado só foram possíveis com trabalho conjunto e apoio das instituições Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) da Universidade Federal do Pará e *Institute des sciences de la Terra (ISTO)*, da *Université d'Orléans*, fornecendo suporte e infraestrutura para desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço ao orientador Dr. Roberto Dall'Agnol pela confiança e incentivo, além da dedicação e orientação acadêmica/científica ao longo de 14 anos, estabelecidos desde a primeira iniciação científica que realizei na graduação (2009), com trabalhos contínuos que avançaram para conclusão deste doutorado. Ao coorientador, Dr. Bruno Scaillet, pela oportunidade de trabalhar com petrologia experimental e pelo tempo dedicado no período do meu intercâmbio no ISTO, além de todo apoio, paciência, dedicação e conhecimento transferido durante a elaboração dessa tese. Ressalto a importância dos meus orientadores na minha vida acadêmica e profissional, pois através da nossa convivência, compreendi a importância da independência e segurança nas escolhas dos caminhos a serem seguidos. Além da sensibilidade de conduzir jovens pesquisadores na ciência.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo (Processo 170656/2017-9) e taxa de bancada. E também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, com cooperação do Programa Institucional de Doutorado-Sanduíche no Exterior (PDSE), através do processo 88881.190063/2018-01.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geociências da Amazônia/Geociam (Processo N°573733/2008-2) pelo apoio financeiro nas etapas iniciais dessa pesquisa, em especial, às atividades de campo realizadas na Província Carajás.

À minha família, em especial aos meus pais, por terem ensinado que esforço, dedicação, sacrifícios e humildade, associados à busca pelo conhecimento são as chaves para obter sucesso.

Ao Dr. Fernando Fernandes da Silva e Msc. Luan Alexandre Martins de Sousa pela colaboração e trabalho conjunto no entendimento da Suíte Vila Jussara. Além das conversas complexas que beiravam o desespero, gargalhadas e apoio incondicional na busca por soluções e resultados. Estendo esses agradecimentos aos doutorandos Caio José Soares Mesquita e Arthur Santos da Silva Neri, pela colaboração como coautores das pesquisas realizadas e pela grata amizade construída ao longo dessa jornada acadêmica.

Ao Instituto de Geociências (IG-UFGA), Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) e também, ao Laboratório de Microanálises, juntamente com seus técnicos e colaboradores, pelas contribuições analíticas e utilização da infraestrutura, em especial, microscópio eletrônico de varredura (MEV) e microsonda eletrônica.

Ao Museu Paraense Emílio Goeldi, especificamente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica (LME) coordenado pelo Dr. Hilton Tulio Costi, pelo suporte analítico no imageamento das titanitas das Suítes Vila Jussara e Jamon, assim como, na identificação das fases experimentais com uso do MEV.

À Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal do Pará pelo suporte concedido através do Programa de Apoio à Publicação Qualificada (PAPQ), financiando a tradução dos artigos da tese de doutorado (capítulo 2 e 3).

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica pelo conhecimento transmitido ao longo do mestrado e doutorado. Assim como, aos funcionários da secretaria do PPGG, em especial à Cleida Freitas, pela contribuição na administração, além da atenção dedicada aos discentes.

Ao Prof. Dr. Vladimir Távora, pelos conselhos e conforto dado nos momentos conturbados da vida, além da motivação e descontração característica.

Ao geólogo Msc e melhor amigo, Juvenal Neto, por estar presente em todas as etapas da minha vida, seja apoiando, motivando ou se alegrando com cada propósito de vida alcançado e por vezes, acreditando mais em mim do que eu mesma.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração desse trabalho. Meus sinceros agradecimentos a todos.

"Tenho dito e gosto de afirmar que a minha história é uma história perigosa, como é a história de quem sai das classes populares, de uma subalternidade, e consegue galgar outros espaços. Essas histórias fortalecem o discurso da meritocracia, que diz que se você estudar e trabalhar, você chega lá. Aliás, tenho me perguntado: O que significa chegar lá?"

Conceição Evaristo

RESUMO

Na Província Carajás (PC), durante os estágios finais do Neoarqueano (2.75-2.73 Ga), foram formados no Domínio Sapucaia e Canaã dos Carajás, granitoides representados respectivamente pelas Suítes Vila Jussara e Planalto. Tais suítes apresentam caráter metaluminoso e afinidade geoquímica com granitos tipo-A e razão $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ em rocha total variáveis desde ferrosas até magnesianas. Estudos químico-mineralógicos realizados nos granitos neoarqueanos, envolvendo microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura, microsonda eletrônica e petrologia experimental, revelaram notáveis variações entre as principais fases minerais. Epidoto é uma fase comum nas variedades ferrosas reduzida, oxidada e magnesiana da Suíte Vila Jussara, exibindo conteúdo de pistacita entre 25 e 30 mol.%. Na Suíte Planalto e demais granitoides neoarqueanos da PC, epidoto é uma fase ausente. O estudo da cinética de dissolução dos epidotos da PC mostra que sua formação e estabilidade está diretamente relacionada às condições de pressão, temperatura e fugacidade de oxigênio, porém, sua estabilidade também é condicionada pelos mecanismos de ascensão, colocação e cristalização, que influenciam a intensidade de dissolução dos cristais. Estudos químico-mineralógicos realizados em titanita das suítes Vila Jussara e Planalto e paleoproterozoicas da Suíte Jamon, revelaram notáveis variações texturais e composicionais neste mineral. As razões Fe/Al em titanita são bastante variáveis nos granitos estudados, tendo sido distinguidos com base nelas três grandes grupos de titanitas: 1) razão Fe/Al alta ($\text{Fe}/\text{Al} > 0.5$); 2) moderada ($0.5 \leq \text{Fe}/\text{Al} \leq 0.25$); e 3) baixa ($\text{Fe}/\text{Al} < 0.25$). Além disso, de forma geral, os dados obtidos corroboram a tendência de maior estabilidade da titanita em condições oxidantes, próximas do tampão Níquel-Níquel-Oxigênio (NNO), porém, a ocorrência de titanita magmática em variedades reduzidas das suítes Vila Jussara e Planalto mostra que é possível ocorrer sua cristalização em condições próximas ao tampão Faiálita-Magnetita-Quartzo (FMQ). Ademais estudos de petrologia experimental realizados nas mesmas suítes neoarqueanas, mostram que a amostra MDP-02E, com composição tonalítica, representando o magma magnesiano oxidado da Suíte Vila Jussara, exibe conteúdo de SiO_2 em torno de 60% em rocha total e 61,05% no vidro experimental, enquanto a amostra de composição sienogranítica (AMR-116), pertencente a variedade fortemente reduzida da Suíte Planalto, apresenta teor de SiO_2 em rocha total em 74,13% versus 73,17% no vidro, indicando que as condições experimentais inicialmente calibradas, se aproximaram das condições magmáticas naturais. As condições de cristalização do magma tonalítico e sienogranítico foram efetuados a partir de nove experimentos nas duas amostras, com calibrações preferenciais em pressão de ~4 kbar, $f\text{O}_2$ em ~NNO-1.3 (1.3 unidade

log abaixo do tampão NNO) e temperatura variando de 850°C a 668°C e conteúdo de H₂O entre 9% e 6% em peso. Além disso, dois experimentos em $fO_2 \sim NNO+2.4$, com temperaturas variando de 800°C a 700°C, com mesma pressão e variação de H₂O dos experimentos reduzidos. Subordinadamente, foram realizados experimentos em 8 kbar e 2 kbar, com condição redox variável. Tais experimentos mostram que o tonalito da Suíte Vila Jussara cristalizou em ~4 kbar, a partir de um magma com alta concentração de H₂O (>5% em peso) e em fO_2 oxidante, provavelmente entre NNO e NNO+1. Por outro lado, os experimentos realizados na composição sienogranítica da Suíte Planalto (AMR-116), mostram uma paragênese principal definida por Cpx+Fa, diferindo fortemente dos minerais naturais, sugerindo que os experimentos não atingiram condições próximas as naturais.

Palavras chaves: petrologia experimental; química mineral; Província Carajás; Neoarqueano; granitoides.

ABSTRACT

In the Carajás Province (CP), during the late stages of the neoproterozoic (2.75-2.73), in the Sapucaia and Canãa dos Carajás domains granitoids represented by the Vila Jussara and Planalto suites were formed respectively. These suites are metaluminous and have a geochemical affinity with A-type granites and FeO/(FeO+MgO) whole rock ratios that vary from ferroan to magnesian. Chemical-mineralogical studies performed in these neoproterozoic granites, based on optical microscopy, scanning electronic microscopy, electron microprobe and experimental petrology revealed notable variation between the main mineral phases. Magmatic epidote is a common mineral phase in the reduced, oxidized and magnesian varieties of the Vila Jussara suite, with pistacite contents between 25 and 30% mol. In the Planalto Suite and others neoproterozoic granites of the CP magmatic epidote is absent. The study of the dissolution kinetics of Archean epidotes of the CP reveals that its formation and stability are directly linked to pressure, temperature and oxygen fugacity conditions, however, its stability is also conditioned by mechanisms of magma rise, emplacement and crystallization, which affected the dissolution intensity of the epidote crystals. Chemical-mineralogical performed on titanites of the Vila Jussara and Planalto Suites and the paleoproterozoic Jamon Suite revealed notable textural and compositional variations. The titanite's Fe/Al ratios are quite variable in the studied granites, three major titanite groups were distinguished: 1) high Fe/Al ratio ($\text{Fe/Al} > 0.5$); 2) moderate Fe/Al ratio ($0.5 \leq \text{Fe/Al} \leq 0.25$); and 3) low Fe/Al ratio ($\text{Fe/Al} < 0.25$). Furthermore, in general, the obtained data support the major titanite tendency to stabilize under oxidizing conditions, near the nickel-nickel oxide buffer (NNO), however, the occurrence of magmatic titanite in the reduced varieties from the Planalto and Vila Jussara Suites ratifies that its crystallization is possible under conditions near the fayalite-magnetite-quartz buffer (FMQ). Moreover, experimental petrology studies performed on the same neoproterozoic suites, reveal that the sample MDP-02E, with tonalitic composition, which represents the magnesian oxidized magma from the Vila Jussara suite, exhibits SiO₂ content around 60% in the whole rock composition and 61.05% in the experimental glass, while the sample with sienogranitic composition (AMR-116), from the strongly reduced variety of the Planalto Suite, shows SiO₂ content of 74.13% in whole rock and 73.17% in glass, pointing out that the initially calibrated experimental conditions approach the natural magmatic conditions. To characterize the crystallization parameters of the tonalitic and sienogranitic magma, nine experiments were performed on the two samples, with the following conditions: pressure ~4 kbar, f_{O_2} ~NNO-1.3 (1.3 log unit below the NNO buffer) and temperature varying from 850°C to 668°C and water

content from 9% to 6% in weight. Experiments with $fO_2 \sim NNO+2.4$ and temperatures of 800°C to 700°C with similar pressures and water content variations of the reduced experiments were also performed. Subordinately, experiments with pressures of 8 to 2 kbar with variable redox conditions were performed. These experiments show that the tonalite from the Vila Jussara Suite was crystallized at ~4 kbar from a water-rich magma (>5% in weight) in fO_2 oxidizing conditions, probably between NNO and NNO+1. On the other hand, the experiments performed on the sample with sienogranitic composition from the Planalto Suite show a main paragenesis of Cpx+Fa which substantially diverge from the natural minerals, suggesting that the experiments did not reach the natural conditions.

Key-words: experimental petrology; mineral chemistry; Carajás Province; Neoproterozoic; granitoids.