



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

TESE DE DOUTORADO Nº 186

**PETROGÊNESE DA SUÍTE IGARAPÉ GELADO:
IMPLICAÇÕES PARA O MAGMATISMO NEOARQUEANO
DA PROVÍNCIA CARAJÁS, CRÁTON AMAZÔNICO**

Tese apresentada por:

CAIO JOSÉ SOARES MESQUITA

Orientador: Roberto Dall'Agnol (UFPA)

BELÉM – PARÁ

2025

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)

M578p Mesquita, Caio José Soares.

Petrogênese da Suíte Igarapé Gelado: implicações para o magmatismo
neoarqueano da Província Carajás, Cráton Amazônico / Caio José Soares
Mesquita. — 2025.
xxii, 193 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Roberto Dall'Agnol
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica,
Belém, 2025.

1. Geoquímica-Pará. 2. Petrologia. 3. Granitoides. 4. Província
Carajás. 5. Arqueano. I. Título.

CDD: 551.9098115



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**PETROGÊNESE DA SUÍTE IGARAPÉ GELADO:
IMPLICAÇÕES PARA O MAGMATISMO
NEOARQUEANO DA PROVÍNCIA CARAJÁS, CRÁTON
AMAZÔNICO**

TESE APRESENTADA POR:

CAIO JOSÉ SOARES MESQUITA

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

Data de Aprovação: 30 / 04 / 2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Dall'Agnol (Orientador – UFPA)

Documento assinado digitalmente



VALDECIR DE ASSIS JANASI
Data: 05/05/2025 09:28:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi (Membro-USP)

Documento assinado digitalmente



CARLOS EDUARDO DE MESQUITA BARROS
Data: 06/05/2025 13:32:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Eduardo de Mesquita Barros (Membro-UFPR)

Documento assinado digitalmente



FERNANDO FERNANDES DA SILVA
Data: 02/05/2025 11:26:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fernando Fernandes da Silva (Membro-UNIFESSPA)

Documento assinado digitalmente



JEAN MICHEL LAFON
Data: 01/05/2025 13:36:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jean Michel Lafon (Membro-UFPA)

Dedico aos meus pais, irmãos e esposa.

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta tese de doutorado só foi possível devido ao auxílio e suporte dado por diversas pessoas e entidades, as quais destaco meus sinceros agradecimentos em especial:

- Ao Programa de Pós-Graduação de Geologia e Geoquímica (PPGG) do Instituto de Geociências da UFPA pela infraestrutura de laboratórios e salas de estudos cedidas;
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo – Código de financiamento 001;
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de taxa de bancada em nome de meu orientador, Roberto Dall’Agnol (Processo 3006767/2019–8);
- 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;
- Laboratório de Geologia Isotópica (Pará-Iso) da UFPA, em nome do professor Marco Antonio Galarza pelo suporte na aquisição e tratamento dos dados de Lu-Hf LA-MC-ICP-MS;
- Ao Laboratório de Microanálises do IG-UFPA, em especial ao professor Cláudio Nery Lamarão e às técnicas Gisele Marques e Ana Paula Correa, pelas contribuições analíticas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) e microsonda eletrônica;
- Ao Laboratório de Geocronologia de Alta Resolução da Universidade de São Paulo (GeoLab/USP), em especial ao corpo técnico Dr. Kei Sato e Dr. Maurício Borba, além da secretária Silvana Macedo, pelo grande auxílio prestado durante as etapas de aquisição de dados U-Pb e ETR SHRIMP;
- Ao Laboratório de Estudos Geodinâmicos, Geocronológicos e Ambientais da Universidade Brasília, em nome do prof. Dr. Elton Dantas que prestou auxílio na aquisição das análises Sm-Nd;
- Ao serviço Geológico Brasileiro (SGB) pela concessão de amostras e em especial à geóloga e amiga Junny Kyley que deu todo suporte nessa etapa de aquisição de dados;
- Aos geólogos Sergio Huhn (VALE S.A.), Clovis Wagner Maurity e Alessandro Sabá Leite (ITV DS) pelo suporte na primeira campanha de campo e aos geólogos Dr. José de Arimatéia (PPGG-UFPA) e Diwhemerson Barbosa que me acompanharam na segunda campanha;

- Às funcionárias da secretaria do PPGG, Cleida e Joyce que estiveram sempre dispostas a auxiliar nas questões burocráticas;
- Aos amigos e técnicos da oficina de laminação do IG-UFPA, Joelma e Bruno, pela agilidade na confecção das lâminas utilizadas nessa pesquisa;
- Ao orientador Roberto Dall’Agnol pelo incentivo, oportunidades, conhecimento compartilhado, por ter acreditado no meu potencial para escrever esta tese e acima de tudo me ensinou a ter resiliência na pesquisa;
- Ao Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) do Instituto de Geociências (IG-UFPA), em especial aos integrantes do Laboratório de Petrologia Magnética, Luan Martins, Ingrid Cunha, Mayara Fraeda e Arthur Neri pela amizade “granítica” que construímos durante estes anos;
- Aos professores do PPGG, pelo conhecimento transmitido;
- Aos meus familiares, em especial aos meus pais e irmãs que sempre estiveram na torcida durante toda esta etapa;
- À minha amada esposa Rafaela Oya que sempre me deu força durante a confecção desta tese doutorado, mas que vem me apoiando desde o início dessa caminhada quando eu ainda “engatinhava” na pesquisa ao escrever meu primeiro relatório de iniciação científica;
- Por fim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a elaboração desse trabalho. Meus sinceros agradecimentos a todos.

*Mesmo que na vida fatos CISALHANTES abalem
suas ESTRUTURAS, e nos machucados sangue
quente FLUA, não desista, pois, NADA É POR
ACASO e quando o sangue esfriar algo
RARO e VALIOSO você pode conquistar!*
Caio Mesquita

RESUMO

A Suíte Igarapé Gelado (SIG) localiza-se próximo à fronteira norte da Província Carajás, quase no limite com o Domínio Bacajá, ao longo do lineamento Cinzento. É intrusiva em rochas metamáficas e formações ferríferas bandadas. A porção centro-leste da SIG compreende quatro variedades de rochas: tonalito a granodiorito com teores variados de biotita e anfibólio, (1) com clinopiroxênio e / ou ortopiroxênio (PBHTnGd) ou (2) desprovido de piroxênios (BHTnGd); e monzogranitos que exibem conteúdo variável de biotita e anfibólio, e podem ser (3) moderadamente (BHMzG) ou (4) fortemente reduzidos (BHMzGR). O PBHTnGd contém ferrosilita e/ou augita com hedenbergita subordinada. Os anfibólios são K-hastingsita e, subordinadamente, Fe-Tschermakita em monzogranitos. As biotitas são ferrosas, e em granitos reduzidos apresentam $\#Fe > 0,90$. Essas micas são afins daquelas de rochas alcalinas a subalcalinas e composicionalmente semelhantes às biotitas magmáticas primárias. Plagioclásio é oligoclásio. A integração dos resultados da termobarometria e da modelagem termodinâmica e sua comparação com a paragênese presente nas rochas naturais permitiu aprimorar a estimativa dos parâmetros de cristalização (T , P , fO_2 , X_{H_2O}) e da evolução magmática. Assim, os granitos da SIG cristalizaram a pressões de 550 ± 100 MPa, superiores às atribuídas a outros granitos neoarqueanos em Carajás. A temperatura *liquidus* estimada para a variedade com piroxênio é de $\sim 1000 \pm 50^\circ$ C. Os BHTnGd e BHMzG se formaram dentro de uma faixa de temperatura semelhante ao PBHTnGd, enquanto o BHMzGR teve temperaturas líquidas mais baixas ($\leq 900^\circ$ C). Foram estimadas temperaturas *solidus* de cerca de $\sim 660^\circ$ C para as quatro variedades da SIG. O magma do BHMzG evoluiu em condições de baixa fO_2 , ligeiramente acima ou abaixo do tampão FMQ ($FMQ \pm 0,5$), como os da Suíte Planalto e dos granitos reduzidos das suítes Vila Jussara e Vila União da Província de Carajás. Nos magmas das variedades PBHTnGd e BHTnGd a fugacidade do oxigênio atingiu FMQ+0,5. O BHMzGR cristalizou sob condições fortemente reduzidas equivalentes a FMQ-0,5 a FMQ-1. Os magmas das variedades monzograníticas evoluíram com alto teor de H_2O ($\geq 4\%$ em peso), atingindo 7% no caso dos monzogranitos reduzidos. Isso é comparável ou ligeiramente superior aos níveis geralmente atribuídos aos granitos neoarqueanos de Carajás ($> 4\%$). Em contraste, a variedade com piroxênio tem um teor de água ($\sim 4\%$), tal como os do Enderbire Café e do Charnokito Rio Seco da Província Carajás, e do Pluton Matok do Cinturão do Limpopo. Com base na composição química, as rochas do SIG são ferrosas, reduzidas a oxidadas e com composição similar a granitos tipo A, semelhantes a outras suítes graníticas neoarqueanas da Província de Carajás. As idades da SIG são mais jovens do que as idades de 2,76-2,73 Ga atribuídas aos

granitos neoarqueanos da Província Carajás. Uma idade concordante de cristalização de $\sim 2,68$ Ga foi obtida por U-Pb SHRIMP em zircão para a variedade BHMzGR, e idades de intercepto superior semelhantes foram fornecidas pelas outras variedades da SIG, exceto aquelas de $\sim 2,5$ Ga que se assemelham às idades do depósito IOCG Salobo associadas à reativação do Lineamento Cinzento. As zonas de cisalhamento associadas a este lineamento são responsáveis pela deformação das rochas da SIG, que moldou corpos alongados com foliação variada. Essas zonas facilitaram a migração e causaram deformação dos magmas desde o estágio final da cristalização até seu resfriamento completo, caracterizando um processo sintectônico. O sintectonismo destes granitos está associado à inversão da Bacia Carajás, e a idade de cristalização mais jovem dessas rochas indica que a inversão ocorreu até 2,68 Ga, estendendo o intervalo estimado anteriormente (2,76–2,73 Ga). A SIG exhibe valores negativos a ligeiramente positivos de $\epsilon\text{Nd}(t)_{(-2,86 \text{ a } 0,18)}$ e $\epsilon\text{Hf}(t)_{(-3,3 \text{ a } 0,1)}$, e idades TDM do Paleoarqueano ao Mesoarqueano [$\text{Nd-T}_{\text{DM}}(2,98\text{-}2,84)$ e $\text{Hf-T}_{\text{DM}}^{\text{C}}(3,27\text{-}3,12)$]. Os valores positivos de $\epsilon\text{Nd}(t)$ e $\epsilon\text{Hf}(t)$ para a variedade BHMzGR, sugerem possível contribuição juvenil ou contaminação na fonte de seu magma. As rochas da SIG foram geradas por fusão de 19% (PBHTnGd) e 14% (BHTnGd) de granulito máfico contaminado e por fusão de 9% (BHMzG) e 7% (BHMzGR) de um granulito máfico toleítico. A área de ocorrência da SIG é marcada por hidrotermalismo que modificou localmente a composição de rochas e minerais, permitindo a lixiviação de ETR e Y que fez com que algumas amostras de BHMzG fujam do padrão dominante e apresentem características geoquímicas de granitos do subtipo A1. Além disso, esses processos foram responsáveis pela transformação do zircão, que resultou em grãos com enriquecimento em U, Th e ETRL, e aspecto maciço, que apresentam idades U-Pb de intercepto superior, ao contrário dos cristais de zircão da variedade BHMzGR que preservaram características primárias e apresentam idades Concordia.

Palavras-chave: geoquímica-Pará; química mineral; parâmetros de cristalização; modelamento termodinâmico; geocronologia; geoquímica; isótopos; zircão; granito tipo A; arqueano; Carajás; Cráton Amazônico.

ABSTRACT

The Igarapé Gelado suite (IGS) is located near the northern border of the Carajás Province, almost at its boundary with the Bacajá Domain, along the Cinzento lineament, and is intrusive in metavolcanic mafic rocks and banded iron formations. The central-eastern portion of the IGS comprises four rock varieties: tonalite to granodiorite with varying contents of biotite and amphibole, (1) with associated clinopyroxene and/or orthopyroxene (PBHTnGd) or (2) devoid of pyroxenes (BHTnGd); and monzogranites that exhibit variable biotite and amphibole content and can be (3) moderately (BHMzG) or (4) strongly (RBHMzG) reduced. The PBHTnGd shows ferrosilite and/or augite with subordinate hedenbergite. The amphiboles are K-hastingsite and, subordinately, Fe-Tschermakite in monzogranites. Biotites are ferroan, and in reduced granites show $\#Fe > 0.90$. These micas are similar to those of alkaline to subalkaline rocks and compositionally akin of primary magmatic biotites. Plagioclase is oligoclase. The integration of thermobarometry results and thermodynamic modeling and their comparison with the paragenesis present in natural rocks improved the estimation of crystallization parameters (T , P , fO_2 , H_2O), and allowed a better interpretation of magmatic evolution. The IGS granites crystallized at pressures of 550 ± 100 MPa, higher than those attributed to other Neoarchean granites in Carajás province. The estimated *liquidus* temperature for the IGS pyroxene variety is $\sim 1000 \pm 50^\circ\text{C}$. BHTnGd and BHMzG formed within a similar temperature range to PBHTnGd, while RBHMzG had lower liquidus temperatures ($\leq 900^\circ\text{C}$). Solidus temperatures of around $\sim 660^\circ\text{C}$ were estimated for the four IGS varieties. The BHMzG magma evolved under conditions of low fO_2 , slightly above or below the FMQ buffer ($FMQ \pm 0.5$), like those of the Planalto suite and the reduced granites of the Vila Jussara and Vila União suites of Carajás province. In the magmas of the PBHTnGd and BHTnGd varieties the oxygen fugacity attained $FMQ + 0.5$. The RBHMzG crystallized under strongly reduced conditions equivalent to $FMQ - 0.5$ to $FMQ - 1$. The magmas of the monzogranitic varieties evolved with a H_2O content of ≥ 4 wt%, attaining 7 wt% in the case of the reduced monzogranites. This is comparable to, or slightly exceeding, the levels typically attributed to the Neoarchean granites of Carajás province ($\geq 4\%$ wt%). In contrast, the variety with pyroxene has a water content (~ 4 wt%) like that of Café enderbite and Rio Seco charnockite from Carajás province, and Matok Pluton from Limpopo belt. Based on the chemical composition, the rocks from IGS are ferroan, reduced to oxidized A-type-like granites, akin to other Neoarchean granite suites from the Carajás province. The IGS are younger than the 2.76-2.73 Ga Neoarchean granites from the Carajás province. A crystallization concordia age of ~ 2.68 Ga was obtained by U-Pb

SHRIMP in zircon for the RBHMzG variety, and similar upper intercept ages were furnished by the other IGS varieties, except for ages of ~2.5 Ga that resemble the ages of the IOCG Salobo deposits associated with reactivation of the Cinzento Lineament. The mineral chemistry; the deformation of the IGS rocks was influenced by shear zones linked to that lineament, forming elongated bodies with varied foliation. These zones facilitated the migration and deformation of magmas from the final crystallization stages until their complete cooling, characterizing a syntectonic process. This syntectonicity is associated with the inversion of the Carajás Basin, and the younger crystallization age of these rocks indicates that the inversion occurred up to 2.68 Ga, extending the previously estimated interval (2.76–2.73 Ga). The IGS displays negative to slightly positive values of $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (-2.86 to 0.18) and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (-3.3 to 0.1), and Paleoarchean to Mesoarchean T_{DM} ages [$\text{Nd-}T_{\text{DM}}(2.98\text{--}2.84)$ and $\text{Hf-}T_{\text{DM}}^{\text{C}}(3.27\text{--}3.12)$]. The positive values of $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ for the RBHMzG variety, suggest possible juvenile contribution or contamination in the source of its magma. The IGS rocks come from the melting of 19% (PBHTnGd) or 14% (BHTnGd) of contaminated mafic granulite, - and from melting of 9% (BHMzG) and 7% (RBHMzG) of a tholeiitic mafic granulite. The area of occurrence of the IGS is marked by hydrothermalism and mineralizations that locally modified the composition of rocks and minerals, allowing the leaching of REE and Y that changed the composition of some samples of BHMzG approaching them of (false) A1-subtype granites. In addition, these processes were responsible for zircon alteration, which resulted in grains showing enrichment of U, Th, and LREE, and massive textures, that furnished upper intercept U-Pb ages, contrarily to the zircon crystals of the RBHMzG variety that preserved primary characteristics and presented Concordia ages.

Key-words: Pará-geochemistry; mineral chemistry; crystallization parameters; thermodynamic modeling; geochronology; geochemistry; isotopes; zircon; A-type Granite; archaean; Carajás; Amazonian Craton.