



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

TESE DE DOUTORADO Nº 120

**PETROLOGIA E GEOTERMOBAROMETRIA DAS ROCHAS
METAMÓRFICAS DO CINTURÃO ARAGUAIA: REGIÃO DE
XAMBIOÁ-ARAGUANÃ (TO)**

Tese apresentada por:

BRUNO LUIS SILVA PINHEIRO

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio de Sousa Gorayeb (UFPA)

BELÉM

2016

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

Pinheiro, Bruno Luis Silva, 1979-
Petrologia e geotermobarometria das rochas metamórficas do
Cinturão Araguaia : região de Xambioá-Araguanã (TO) / Bruno Luis Silva
Pinheiro. – 2016

xx, 258 f.: il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Paulo Sérgio de Sousa Gorayeb

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de
Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica,
Belém, 2016.

1. Petrologia. 2. Metamorfismo. 3. Geotermobarometria. 4. Xambioá-
Araguanã (TO) . 5. Cinturão Araguaia. I. Título.

CDD 22. ed. 552.4



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

**PETROLOGIA E GEOTERMOBAROMETRIA DAS ROCHAS
METAMÓRFICAS DO CINTURÃO ARAGUAIA: REGIÃO DE
XAMBIOÁ-ARAGUANÃ (TO)**

TESE APRESENTADA POR
BRUNO LUIS SILVA PINHEIRO

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.**

Data de Aprovação: 16 / 12 / 2016

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Sérgio de S. Gorayeb
(Orientador-UFPA)

Prof. Dr. Wagner da Silva Amaral
(Membro-UNICAMP)

Prof. Dr. Gláucia Nascimento Queiroga
(Membro-UFOP)

Prof. Dr. Candido Augusto Veloso Moura
(Membro-UFPA)

Prof. Dr. Raimundo Netuno Nobre Villas
(Membro-UFPA)

À Deus, pois sem sua força e bênção eu não terminaria esta tese, e a minha esposa e meu filho Miguel que me deram alegria para continuar.

AGRADECIMENTOS

A execução deste trabalho só foi possível graças, primeiramente, a Deus, presente em cada frase e em cada linha contida nesta tese.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que subsidiou a bolsa de estudo e custeio parcial do trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) e Instituto de Geociências da UFPA, pelo apoio infraestrutural, e custeio para mobilidade para realização de algumas análises em São Paulo no desenvolvimento desta tese.

Ao projeto Instituto de Geociências da Amazônia – INCT/GEOCIAM – MCT/CNPq/FAPESPA (Processo Nº 573733/2008-2), por meio do Prof. Roberto Dall’Agnol, pelo suporte financeiro em apoio às atividades de campo e laboratoriais para a realização desta pesquisa.

Ao Laboratório de Microsonda do Instituto de Geociências da UnB por todo o apoio na realização de análises químicas mineral, por meio do Prof. Nilson Botelho.

Aos meus pais e minhas irmãs pelo imenso apoio, compreensão e carinho nos momentos mais difíceis.

Ao Professor Dr. Paulo Sergio de Sousa Gorayeb que, na condição de orientador pelos ensinamentos, sempre incentivando e dando força para o desenvolvimento deste trabalho, e acima de tudo, paciência e fundamental participação na realização desta tese.

Aos meus apóstolos Sérgio Cunha e Raquel Cunha pelas orações, carinho e apoio no decorrer deste doutorado.

À minha esposa Priscila Ambé pelo imenso apoio, amizade, companheirismo, força e amor dados no decorrer dessa jornada.

Ao professor Dr. Renato de Moraes da Universidade de São Paulo (USP) pela amizade construída nesta caminhada, pelas “chamadas” de atenção, orientação, ensinamentos, paciência, fundamentais no apoio a realização desta tese.

Aos demais amigos, técnicos do Laboratório Pará-Iso, Laminação pela ajuda dispensada.

Ao Técnico Afonso Quaresma do IG/UFPA por todo o apoio nos trabalhos de campo.

Aos meus alunos de geologia da Universidade da Amazônia (UNAMA) pelo carinho e apoio principalmente nos momentos finais da realização desta tese.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente ajudaram e contribuíram com este trabalho.

Ainda que eu falasse todas as línguas dos homens, e mesmo a língua dos anjos, se não tivesse amor não seria senão como um bronze sonante, e um címbalo retumbante; e quando eu tivesse o dom de profecia, penetrasse todos os mistérios, e tivesse uma perfeita ciência de todas as coisas; quando tivesse ainda toda a fé possível, até transportar as montanhas, se não tivesse o amor eu nada seria. E quando tivesse distribuído meus bens para alimentar os pobres, e tivesse entregue meu corpo para ser queimado, se não tivesse o amor, tudo isso não me serviria de nada.

O amor é paciente; é doce e benfazeja; o amor não é invejoso; não é temerário e precipitado; não se enche de orgulho; não é desdenhoso; não procura seus próprios interesses; não se melindra e não se irrita com nada; não suspeita mal; não se regozija com a injustiça, mas se regozija com a verdade; tudo suporta, tudo crê, tudo espera e tudo sofre.

Agora, estas três virtudes: a fé, a esperança e o amor, permanecem; mas, entre eles, o mais excelente é o amor.

RESUMO

Visando contribuir para o entendimento dos processos metamórficos das rochas do Cinturão Araguaia (CA), esta tese apresenta dados de campo e modelagem metamórfica, utilizados como ferramentas para a obtenção das condições máximas de P - T alcançadas pelas unidades situadas na região de Xambioá e Araguaianã, no noroeste do estado do Tocantins. As rochas estudadas são cinco amostras de Estaurolita-granada-biotita-muscovita xisto com cianita e uma amostra de Granada anfibólito, pertencentes à Formação Xambioá e Suíte Gabroica Xambica, respectivamente. O estudo do metamorfismo se deu por meio de análises petrográficas, químicas de rochas e minerais das principais associações de rochas pelíticas, semipelíticas e máficas que compreendem a zona de maior grau metamórfico do Cinturão Araguaia, para posterior análise por modelamento metamórfico no sistema NCKFMASH e geotermobarometria otimizada, no modo $avPT$, no programa *THERMOCALC*, bem como pelo *software* Hb-Pl, o que possibilitou identificar as condições P - T de pico metamórfico. Além de definir a idade aproximada do metamorfismo utilizando o método Ar-Ar em biotita e anfibólio. O estudo petrográfico-mineralógico identificou as principais paragêneses minerais nos micaxistos estudados como $St + Grt + Bt + Ms + Qtz \pm Pl (An_{12-31}) + Ky$, e nos anfibólitos $Hb + Grt + Bt + Pl (An_{12-25})$. Os resultados de química mineral mostraram que a composição da granada das seis amostras é dominada pela molécula da almandina, a qual é seguida por piropo, espessartita, grossulária e andradita, ocorrendo aumento de Fe^{2+} e Mg dos núcleos para as bordas, com concomitante diminuição de Mn e Ca. Os teores mais elevados de Fe e Mg em direção as bordas indicam aumento nas condições de temperatura durante o desenvolvimento do mineral. A composição das biotitas apresenta-se na transição dos campos da biotita - flogopita, se tornando uma mica ferromagnésiana. A estaurolita do núcleo para a borda se enriquece em Fe^{2+} e se empobrece em Mg, o que pode sugerir reações no contato com a matriz e/ou com as micas ou granada. O modelamento metamórfico no sistema NCKFMASH resultou em pseudosseções com topologias semelhantes para as amostras BP002, BP149 e BP299, sugerindo que as condições metamórficas máximas que elas foram submetidas são semelhantes, situando-se dentro de uma janela P - T com pressão de aproximadamente 7 - 9 kbar e temperatura de 630 - 665 °C. Os modelos de isopletas composicionais dos minerais calculados nas pseudosseções indicam uma maior participação do Mg e uma menor participação de Ca na composição dos principais minerais conforme o aumento das condições P - T metamórficas na região, compatível com os resultados de química mineral das rochas estudadas. O plagioclásio e granada da amostra BP002 apresentam-se como bons indicadores das condições de metamorfismo, com valores de 8 kbar e 660 °C, na

qual a variação núcleo-borda de Ca e Na em cristais de plagioclásio e a variação núcleo-borda nos teores de ferro nas granadas mostram trajetória metamórfica progressiva tipo bária, representada por uma curva de pequena inclinação, vindo do campo trivariante Chl+Grt+Bt+Ms. As estimativas *P-T* obtidas no modo *avPT* do *THERMOCALC* em todas as amostras selecionadas (BP002, BP005, BP009, BP149, BP299 e BP006), assim como no *software* Hb-Plag nos anfíbolitos (BP006), apresentaram-se bastantes coerentes e consistentes com os cálculos das condições de pico metamórfico via *THERMOCALC* para as rochas da região de Xambioá-Araguanã, embora haja discrepâncias dos resultados calculados. Todos os resultados *P-T* calculados são compatíveis com o campo da fácies anfíbolito da série média *P-T*, típico de ambiente de cinturões orogênicos continentais e, portanto, característicos de colisões continentais. Condições metamórficas estas são reforçadas com os resultados de química mineral dos anfíbólios cálcicos que sugerem as mesmas condições de média pressão do terreno de *Dalradian* da Escócia. As idades Ar-Ar em minerais obtidas nos metapelitos e anfíbolitos situam-se em torno de 504 Ma, que são mais jovens que as idades K-Ar (520-560 Ma) e são interpretadas como relacionadas ao arrefecimento termal na evolução metamórfica do Cinturão Araguaia na interface Neoproterozóico-Paleozoico, no final do Ciclo Brasileiro. Isto demonstra que o auge do metamorfismo atingiu a fácies anfíbolito médio e sugere que sua idade tenha sido próxima, por estar dentro do erro da idade química U-Th-Pb em monazitas de biotita xisto feldspático (513 ± 14 Ma) da região de Presidente Kennedy (TO), interpretada como uma idade mais jovem do que a média das idades avaliadas para o metamorfismo do Cinturão Araguaia (550 – 530 Ma).

Palavras-Chave: Petrologia; Metamorfismo; Geotermobarometria; Xambioá-Araguanã; Cinturão Araguaia.

ABSTRACT

In order to contribute to the understanding of the metamorphic processes of the metamorphic rocks of the Araguaia Belt (CA), this thesis presents field data and metamorphic modeling, used as tools to obtain the maximum conditions of P-T reached by the units located in the Xambioá-Araguanã (TO) region of the rocks studied are five samples of Staurolite-garnet-biotite-muscovite-schist with Kyanite and a sample of Garnet amphibolite, belonging to the Xambioá Formation and Xambica Suite, respectively. The study of the metamorphism occurred through petrographic, chemical analyzes of rocks and minerals of the main associations of pelitic rocks, semipelitic and mafic rocks that comprise the zone of greater metamorphic degree of CA, for later analysis by metamorphic modeling in the NCKFMASH system and optimized geothermobarometry, In the avPT mode, in the THERMOCALC program, as well as the Hb-Pl software, which made it possible to identify PT metamorphic peak conditions. In addition to defining an approximate age of metamorphism using the Ar-Ar method in biotite and amphibole. The petrographic-mineralogical study identified the main mineral parageneses in the studied micaxists, such as $St + Grt + Bt + Ms + Qtz \pm Pl (An_{12-31}) + Ky$, and in the amphibolites $Hb + Grt + Bt + Pl (An_{12-25})$. The mineral chemistry results showed that the pomegranate composition of the six samples is dominated by the almandine molecule, which is followed by pyropo, thickenstock, and andradite, increasing Fe^{2+} and Mg from the nuclei to the edges, with a concomitant decrease of Mn and Ca. The higher Fe and Mg contents towards the edges indicate an increase in the temperature conditions during mineral development. The composition of the biotite is in the transition of the biotite with phlogopite, becoming more ferromagnesian mica. Staurolite from the core to the border is enriched in Fe^{2+} and depleted in Mg, which may suggest reactions in contact with the matrix and / or with micas or grenades. Metamorphic modeling in the NCKFMASH system resulted in pseudosections with similar topologies for samples BP002, BP149 and BP299, suggesting that the maximum metamorphic conditions they were subjected to are similar, being situated within a PT window with pressure approximately between 7 and 9 kbar and temperature between 630 and 665 °C. The models of composite isopleths of the minerals calculated in the pseudosections indicate a higher participation of Mg and a lower participation of Ca in the composition of the main minerals according to the increase of the metamorphic P-T conditions in the region, compatible with the mineral chemistry results of the studied rocks. In addition to the plagioclase and the pomegranate of the sample BP002 presenting as good indicators of metamorphism conditions, with values of 8 kbar and 660 °C, in which the core-edge variation of Ca and Na in plagioclase crystals and the variation Core-edge in the iron

content of the garnets show a progressive barometric-type metamorphic trajectory, represented by a small slope curve, coming from the trivariant field Chl + Grt + Bt + Ms. PT estimates obtained in the avPT mode of THERMOCALC in all the selected samples (BP002, BP005, BP149, BP149, BP299, BP006), as well as in the Hb-Plag software in the amphibolites (BP006), presented enough Consistent and consistent with calculations of metamorphic peak conditions via THERMOCALC for rocks in the Xambioá-Araguanã region, although there are discrepancies in the calculated results. All calculated P-T results are compatible with the field of the amphibolite facies of the mean P-T series, typical of continental orogenic belt environments and therefore characteristic of continental collisions. Metamorphic conditions are reinforced with the mineral chemistry results of calcium amphiboles suggesting the same average pressure conditions of the Dalradian terrain of Scotland. The air-air ages in minerals obtained in the metapelites and amphibolites in this thesis were similar, around 504 Ma, and they show that the peak of the metamorphism of the amphibolite facies in the region under study has an older age and they suggest that it was next to the Neoproterozoic-Paleozoic interface, because these Ar-Ar ages obtained are younger ages than the K-Ar ages of 520-560 Ma, interpreted as relating the metamorphism of the CA with the Brazilian thermo-tectonic event, and because it is within the error of the U-Th-Pb monazites chemical age in feldspathic schist biotite from an area near the city of Presidente Kennedy (TO), 513 ± 14 Ma interpreted only at a younger age than the mean age evaluated for the metamorphism of the Araguaia Belt (550 - 530 Ma).

Keywords: Petrology; Metamorphism; Geothermobarometry; Xambioá-Araguanã; Araguaia Belt.



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

PARECER

Sobre a Defesa Pública da Tese de Doutorado de **BRUNO LUIS SILVA PINHEIRO**

A banca examinadora da Tese de Doutorado de **BRUNO LUIS SILVA PINHEIRO** orientando do Prof. Dr. Paulo Sérgio de Sousa Gorayeb (UFPA), composta pelos professores doutores Gláucia Nascimento Queiroga (UFOP), Wagner da Silva Amaral (UNICAMP), Candido Augusto Veloso Moura (UFPA) e Raimundo Netuno Nobre Villas (UFPA), após apresentação da sua tese intitulada “**PETROLOGIA E GEOTERMOBAROMETRIA DAS ROCHAS METAMÓRFICAS DO CINTURÃO ARAGUAIA: REGIÃO DE XAMBIÓA-ARAGUANÃ**” emite o seguinte parecer:

O candidato apresentou contribuição relevante ao conhecimento do metamorfismo regional do Cinturão Araguaia. O seu trabalho contém uma quantidade considerável de dados inéditos e de boa qualidade sobre a química de minerais constituintes das rochas, além de dados geocronológicos. No tratamento dos dados químicos foram utilizadas ferramentas modernas apoiadas na termodinâmica, que permitiram definir com maior confiabilidade as condições de temperatura e pressão do metamorfismo. O candidato fez uma exposição segura demonstrando domínio do tema abordado e respondeu satisfatoriamente as perguntas que lhe foram dirigidas.

A banca recomenda que os vários ajustes de forma apontados pelos vários membros sejam incorporados ao volume da tese

Com base no exposto, a banca examinadora decidiu por unanimidade aprovar a tese de doutorado.

Belém, 16 de dezembro de 2016.

Paulo Sérgio de Sousa Gorayeb (Orientador – UFPA)

Gláucia Nascimento Queiroga (UFOP)

Wagner da Silva Amaral (UNICAMP)

Candido Augusto Veloso Moura (UFPA)

Raimundo Netuno Nobre Villas (UFPA)