

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOCRONOLOGIA POR Lu-Hf DAS GRANADAS DA ZONA DE CISLHAMENTO ALÉM  
PARAÍBA**

Monografia

Trabalho de Formatura – 22/16

Aluno: Gabriel Gouveia Cordeiro

Orientador: Prof. Dr. Marcos Egydio da Silva

SÃO PAULO

2022

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOCRONOLOGIA POR Lu-Hf DAS GRANADAS DA ZONA DE CISALHAMENTO ALÉM  
PARAÍBA**

**Gabriel Gouveia Cordeiro**

Monografia apresentada à Comissão de Trabalho de Formatura como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. Marcos Egidio da Silva

SÃO PAULO

2022

## RESUMO

A Zona de Cisalhamento Além Paraíba está inserida no contexto tectônico do Cinturão Ribeira e consiste em uma faixa de cisalhamento dextral de alta temperatura formada por um embasamento policíclico composto por rochas metamórficas de fácies granulito pertencentes ao Complexo Juiz de Fora, e uma sequência metassedimentar do Complexo Paraíba do Sul com pico metamórfico em fácies granulito com retrometamorfismo em fácies anfibolito.

A idade dessa zona de cisalhamento foi definida através de geocronologia por LA-ICP-MS de U-Pb em cristais de zircão e monazita como tendo seu pico metamórfico em ca. 595 – 590 Ma e seu pico deformacional de ca. 580 – 530 Ma.

Estudos recentes trouxeram à luz novos métodos de análise e interpretação para a geocronologia isotópica de rochas metamórficas por Lu-Hf e Sm-Nd em porfiroblastos e porfiroclastos de granada de altas temperaturas, gerando resultados precisos para as idades de crescimento e eventos estruturais ocorridos após o metamorfismo.

Foram analisadas em microscópio petrográfico dezoito lâminas delgadas de rochas da zona de cisalhamento onde foi possível observar uma assembleia mineral e feições características de um pico metamórfico de ~7 kbar e ~850°C, valores condizentes com os indicados em estudos prévios na região. Análise isotópica de Lu-Hf por LA-ICP-MS/MS de cristais de granada de 5 amostras forneceu idades isocrônicas de  $597 \pm 55$  Ma a  $673 \pm 76$  Ma para o pico metamórfico da região, excluindo-se 2 amostras de uma rocha migmatizada que apresentaram resultados inconclusivos devido a interferência por reabertura do sistema Lu-Hf e microinclusões minerais. Os resultados, apontam para a existência de granadas formadas no início do cisalhamento a ca. 590 Ma e num evento metamórfico de alta temperatura anterior ao cisalhamento (idades superiores a 650 Ma).

O autor recomenda a realização de um trabalho posterior aplicando o método Sm-Nd nas mesmas amostras para a obtenção de dados ainda mais precisos sobre a região estudada.

## ABSTRACT

The Além Paraíba Shear Zone is inserted in the tectonic context of the Ribeira Belt and consists of a high temperature dextral shear belt formed by a polycyclic basement composed of metamorphic rocks of granulite facies belonging to the Juiz de Fora Complex, and a metasedimentary sequence of the Paraíba do Sul Complex that reached its metamorphic peak in the granulite facies and with retrometamorphism to amphibolite facies.

The age of this shear zone was defined through geochronology by LA-ICP-MS of U-Pb in zircon and monazite crystals as having its metamorphic peak at ca. 595 – 590 Ma and its tectonic deformation in ca. 580 – 530 Ma.

Recent studies have brought to light new methods of analysis and interpretation for the isotopic geochronology of metamorphic rocks by Lu-Hf and Sm-Nd in porphyroblasts and porphyroclasts of high temperature garnet, generating accurate results for the ages of growth and structural events occurring after metamorphism.

Eighteen thin sections of rocks from the Além Paraíba Shear Zone were analyzed under a petrographic microscope, where it was possible to observe a mineral assemblage and characteristic features of a metamorphic peak of ~7 kbar and ~800°C, values consistent with those indicated in previous studies from the region. LA-ICP-MS/MS Lu-Hf isotopic analysis of garnet crystals in 5 rock samples resulted in isochron ages for peak metamorphism ranging from  $597 \pm 55$  Ma to  $673 \pm 76$  Ma, excluding 2 samples of migmatized rock where results were inconclusive due to interference from reopening of the Lu-Hf system and microinclusions in the garnets. The results point to the existence of garnets formed at the start of the shear deformation at ca. 590 Ma and at a high temperature metamorphic event that preceded the shear deformation.

The author recommends further studies applying the Sm-Nd method to the same samples in order to obtain even more precise data on the studied region.

## Agradecimentos

À todas as universidades públicas, que apesar das inúmeras dificuldades impostas, seguem criando profissionais e pesquisadores de mais alta qualidade.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pelo conhecimento adquirido durante todos os anos da graduação, sempre com ótimos docentes altamente especializados nas mais diversas áreas do conhecimento geológico.

À equipe do Laboratório de Separação de Amostras e do Laboratório de Geocronologia, pela eficiência e instrução que me foi dada para o preparo das amostras.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Egydio da Silva, pelas ótimas aulas durante a graduação e pela compreensão e instrução no desenvolvimento do presente trabalho.

Ao Dr. Bruno Vieira Ribeiro da Curtin University, pela análise laboratorial e pela grande ajuda na interpretação dos dados isotópicos aqui apresentados.

Agradeço aos meus colegas da turma 60 pelo apoio acadêmico e emocional que foi compartilhado durante todos os anos da graduação. Agradeço em especial aos meus amigos Marmita, Chokany, Jadeu, Levi, Meska, Portera, Pitu, Singanô, Bagulho, Degan, Célebro e Dilma, pelos incríveis momentos compartilhados dentro e fora da universidade, amizades que levarei para o resto da vida

Agradeço aos moradores e ex-moradores da saudosa *Rép*, Prepara, Murissoka, Boi, Beiçola, Tolete e Lilika, por sempre me abrigarem com o maior carinho, fazendo da rep a minha segunda casa e de vocês a minha segunda família.

À Duba, por sempre estar ao meu lado, compartilhando o amor, apoio, carinho e experiências que me deram motivação para seguir em frente.

Aos meus amigos do Colégio Adventista de Vila Yara, em especial ao Rodrigo e o Patrick, pelos inúmeros momentos de alegria que compartilhamos.

Ao meu irmão mais velho, Guilherme Gouveia, pela experiência e sensatez, sempre com palavras de sabedoria e de apoio para me incentivar a dar o melhor de mim mesmo.

E por fim, à minha família. Mãe, pai e tia que me criaram da melhor forma possível e sempre com muita paciência e compreensão. Devo tudo a vocês.

## Índice

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. METAS E OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>2</b>
<b>3.1. O Cinturão Ribeira</b> .....	<b>2</b>
<b>3.2. A Zona de Cisalhamento Além Paraíba</b> .....	<b>4</b>
<b>3.3. O Método Lu-Hf em Granadas</b> .....	<b>6</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>10</b>
<b>5. RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	<b>12</b>
<b>5.1. Petrografia</b> .....	<b>12</b>
<b>5.2. Geocronologia</b> .....	<b>18</b>
5.2.1. ALP-01A .....	<b>19</b>
5.2.2. ALP-01B .....	<b>20</b>
5.2.3. ALP-02A .....	<b>21</b>
5.2.4. ALP-02B .....	<b>22</b>
5.2.5. ALP-04 .....	<b>24</b>
<b>6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>25</b>
<b>6.1. Petrografia</b> .....	<b>25</b>
<b>6.2. Geocronologia</b> .....	<b>27</b>
<b>7. CONCLUSÕES</b> .....	<b>28</b>
<b>8. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>30</b>
<b>9. ANEXO</b>	

## 1. INTRODUÇÃO

O termo Zona de Cisalhamento refere-se a faixas de extensão de dezenas a centenas de quilômetros onde ocorre ou ocorreu movimentação relativa entre dois blocos de rocha, sendo o regime deformacional dominante o cisalhante puro e/ou simples. Essa movimentação causa deformações rúpteis ou dúcteis, gerando rochas (como os pseudotaquilitos, as brechas de falha, os cataclastos, os milonitos e os gnaisses bandados) onde podem-se observar micro, meso e macroestruturas que evidenciam o sentido da movimentação relativa (Fossen, 2016).

As zonas de cisalhamento de alta temperatura são aquelas que ocorrem a grandes profundidades, fazendo com que a deformação seja majoritariamente dúctil, havendo ainda processos metamórficos de recristalização e formação de novos minerais que podem evidenciar, através da geocronologia isotópica, o pico da deformação em questão (Fossen, 2016).

Um exemplo de zona de cisalhamento é o Lineamento de Além-Paraíba, conforme definido por Almeida et al., (1975). Trata-se de uma zona de cisalhamento dextral de alta temperatura e direção NE-SW, composta por gnaisses e granulitos miloníticos paleoproterozóicos do Complexo Juiz de Fora que controlam grande parte do rio Paraíba do Sul. Esta zona de Cisalhamento está inserida no contexto tectônico do Cinturão Ribeira, formado durante a Orogênese Brasileira a cerca de 620 a 510 Ma (Heilbron et al., 2017), mais especificamente na porção central do cinturão.

Até a pouco tempo não havia consenso acerca da idade desse cisalhamento, mas esperava-se que fosse condizente com o pico metamórfico do Cinturão Ribeira durante a orogênese do Brasileiro, a cerca de 590-570 Ma (Heilbron et al., 2017). Estudos recentes de geocronologia isotópica por LA-ICPMS de U-Pb em zircões e monazitas da região definem a idade do pico metamórfico entre ca. 595 a 590 Ma e da deformação tectônica entre ca. 580 a 530 Ma (Giraldo et al., 2019). Cabe ao presente trabalho aprimorar este conhecimento com dados de geocronologia isotópica por Lu-Hf em porfiroblastos e porfiroclastos de granada da região.

## **2. METAS E OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é a delimitação da trajetória de pressão e temperatura e de uma idade para o pico metamórfico e deformacional da Zona de Cisalhamento Além Paraíba na região de Sto. Antonio de Pádua (RJ) através de análises de microestruturas e geocronologia por LA-ICP-MS de Lu-Hf em porfiroblastos e porfiroclastos de granada presentes nos ortognaisses e granulitos miloníticos do Complexo Juiz de Fora, visando assim expandir o conhecimento sobre a história deformacional da zona de cisalhamento a partir de métodos geocronológicos mais recentes e com aqueles já disponíveis na literatura. Os materiais e resultados deste trabalho poderão ainda ser utilizados para uma posterior análise de Sm-Nd, possibilitando uma interpretação ainda mais avançada da evolução geológica da região da zona de cisalhamento.

## **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **3.1. O Cinturão Ribeira**

Definido por Almeida et al., (1976), o Cinturão Ribeira (no trabalho chamado de *Southeastern Fold Region*) é uma faixa de deformações que se estende desde o Uruguai até o sul do estado da Bahia acompanhando o litoral (Figura 1). Os autores definem o cinturão como um sistema de dobramentos diversificados com metamorfismo de fácies xisto verde e anfibolito, havendo ocorrências de migmatização e intrusões graníticas sin-tectônicas com idade de cerca de 600 Ma. Cordani et al., (1973) definiram a idade de formação de parte dos protólitos como pertencente ao ciclo Transamazônico (cerca de 2070 Ma) e a deformação como pertencente ao ciclo orogênico Brasileiro (cerca de 620 Ma).

Egydio-Silva et al., (2018) delimitaram o Cinturão Ribeira como uma faixa de deformação cisalhante de direção NE-SW que transiciona gradualmente para o Cinturão Araçuaí, uma faixa de esforços compressivos de direção NS, ambos os cinturões tendo origem na orogenia do Ciclo Brasileiro, sendo delimitados a norte pelo Cráton São Francisco. No trabalho, a região que engloba a Zona de Cisalhamento Além Paraíba é constituída de um embasamento policíclico formado por rochas metamórficas de fácies granulito (Complexo Juiz de Fora) e uma sequência de rochas metassedimentares com deformação polifásica que atingiu fácies

granulito antes de retroceder a fácies anfibolito, pertencentes ao Complexo Paraíba do Sul, ambas de idade transamazônica.

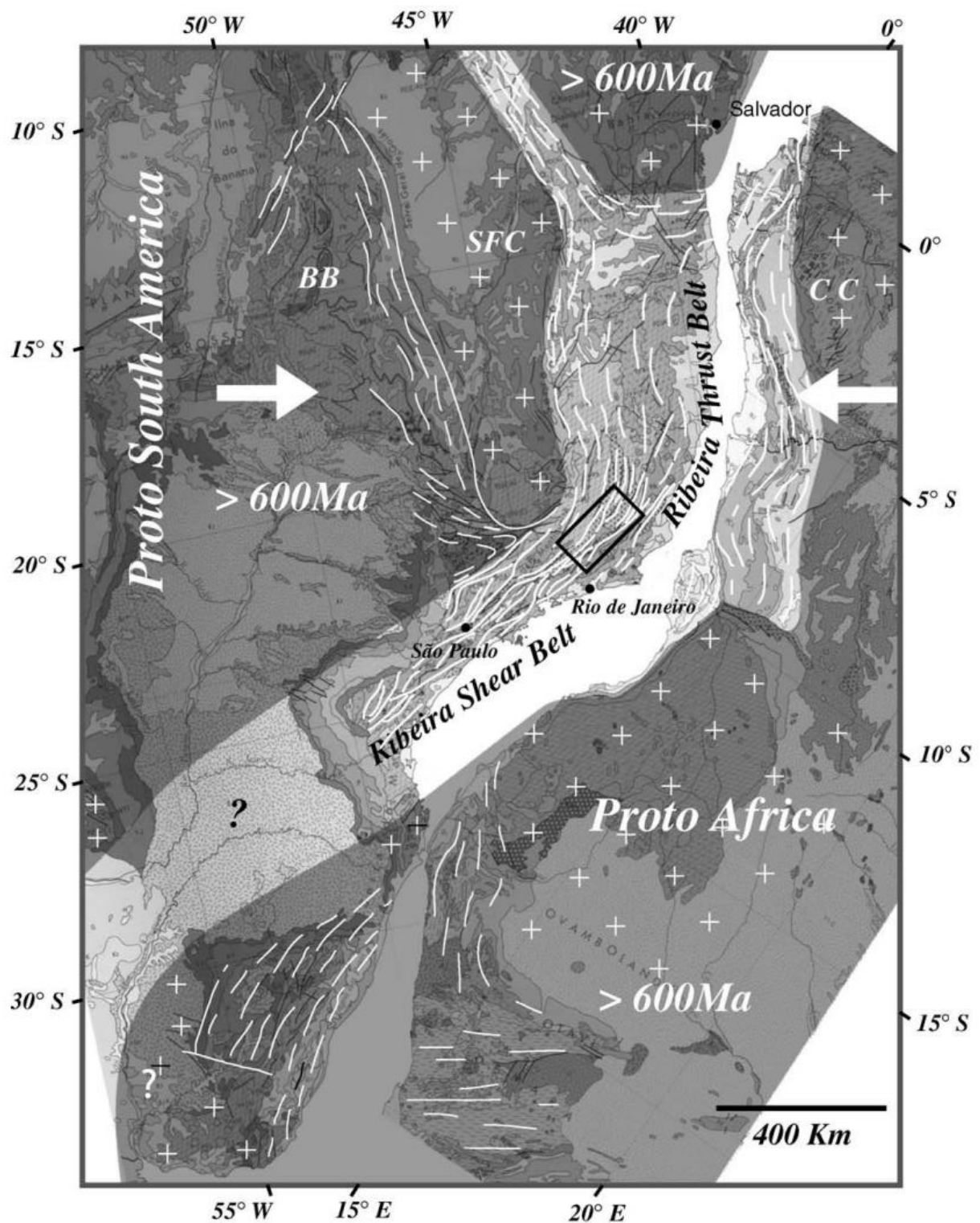


Figura 1. Esquema representando a litosfera continental durante a formação do Cinturão Ribeira (Extraído de Egydio-Silva et al., 2002).

### 3.2. A Zona de Cisalhamento Além Paraíba

Inserido na porção central do Cinturão Ribeira está o Lineamento de Além Paraíba (Almeida et al., 1975, apud Campanha, 1981), posteriormente classificado como uma zona de cisalhamento por Campanha & Ferrari (1984) (apud Giraldo et al., 2019). Trata-se de uma faixa de direção NE-SW (Figura 2) de rochas milonitizadas por cisalhamento dextral de alta temperatura com foliação vertical e lineação horizontal paralela à foliação (Figura 3), compondo uma das feições estruturais mais importantes do sudeste brasileiro.

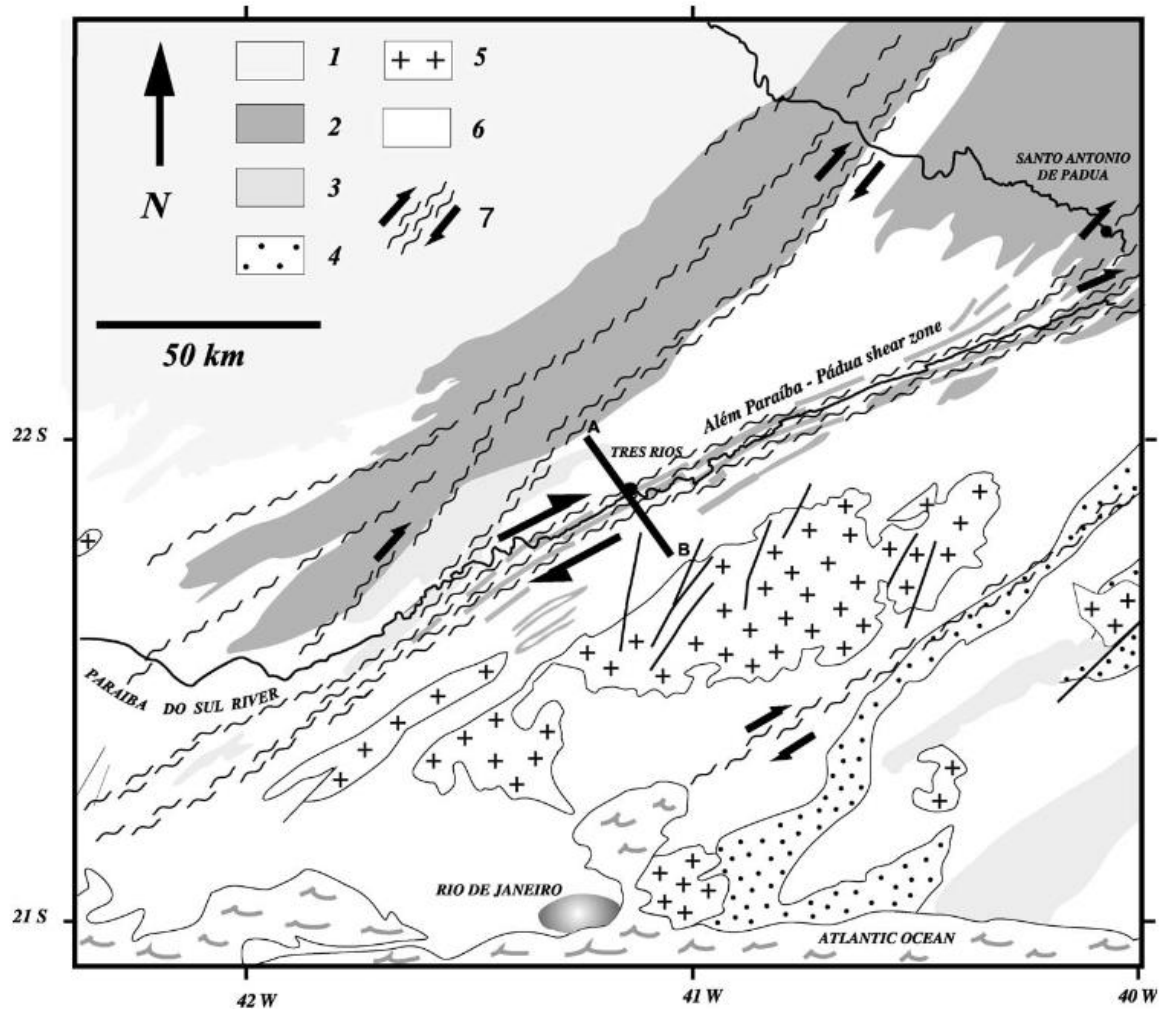


Figura 2. Mapa geológico esquemático da Zona de Cisalhamento Além Paraíba – Pádua (Extraído de Egydio-Silva et al., 2002). (1) Embasamento policíclico, (2) complexo Júiz de Fora, (3) enderbitó, (4) kinzigito, (5) granitos sintectônicos, (6) complexo Paraíba do Sul, (7) rochas miloníticas.

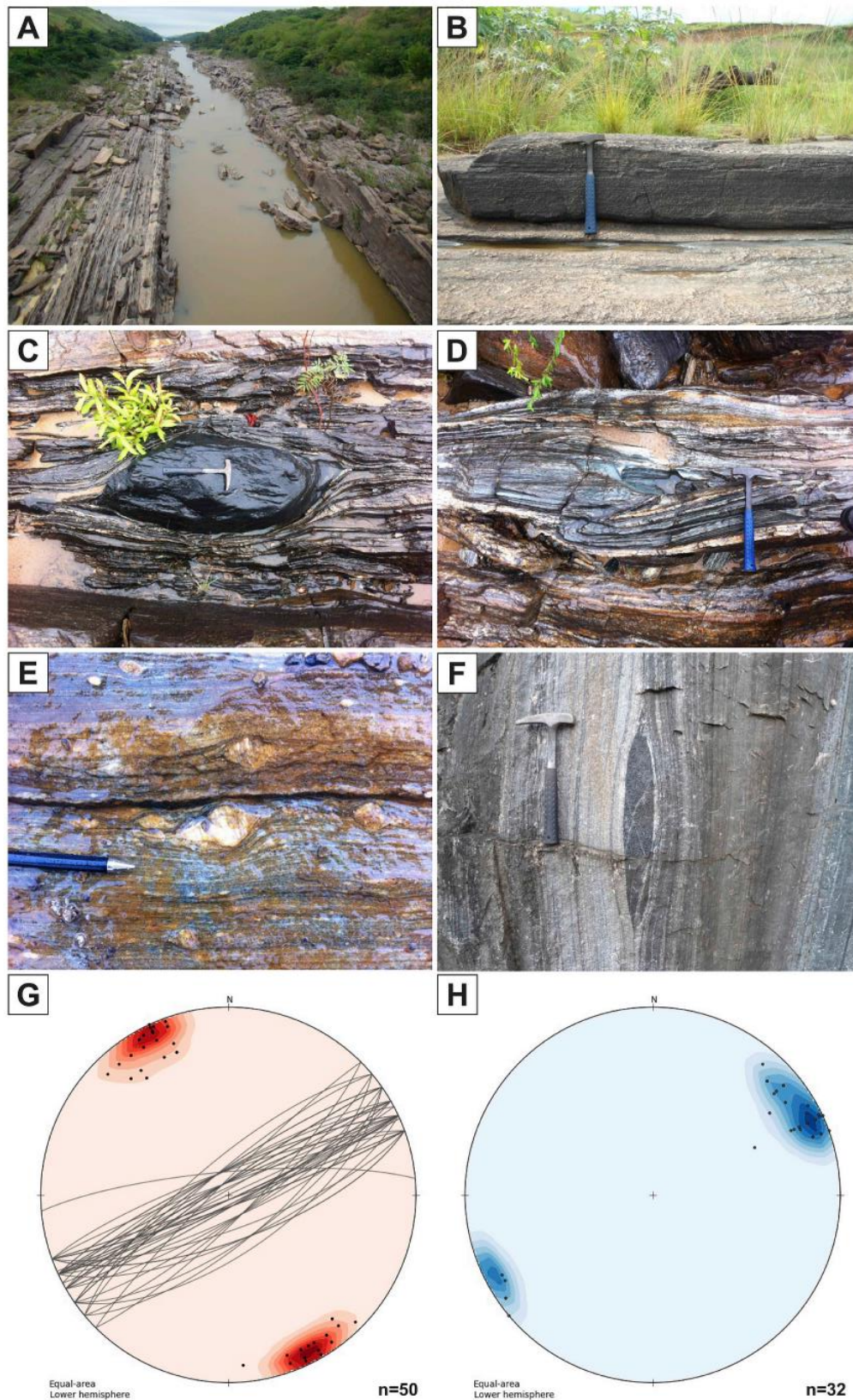


Figura 3. (Extraído de Giraldo et al., 2019). A. Milonitos no Rio Paraíba do Sul; B. Lineação de estiramento milonítico; C. Boudin anfibolítico; D. Dobras isoclinais em rocha cálcio-silicática; E. Porfiroclasto de feldspato estirado; F. Boudin anfibolítico com achatamento horizontal e vertical; G. Orientação preferencial da foliação milonítica (n = 50); H. Orientação preferencial da lineação milonítica (n = 32).

Viana (2008) realizou uma série de datações através do método U-Pb por LA-ICP-MS em zircões detríticos de dez amostras de rochas da região da zona de cisalhamento de Além Paraíba, sendo seis do embasamento policíclico (referido no trabalho como Complexo Quirino), duas de quartzitos da cobertura metassedimentar do Grupo Paraíba do Sul, e duas de granitóides sintectônicos da região da Zona de Cisalhamento de Além Paraíba. O autor obteve idades de cristalização paleoproterozóicas ( $2308 \pm 3$  Ma a  $2136 \pm 14$  Ma) relacionadas ao Evento Transamazônico para a cristalização do embasamento policíclico, idade de deposição máxima de 1951 Ma para a cobertura metassedimentar do Grupo Paraíba do Sul, e idades de  $602 \pm 14$  Ma e  $627 \pm 5,3$  Ma para as duas amostras de granitóides neoproterozóicos.

Bento dos Santos et al., (2011) definiram as condições de pressão e temperatura do pico metamórfico da região em  $8 \pm 1$  kbar e  $850 \pm 50$  °C. Posteriormente, Giraldo et al., (2019) definiram, através de datação U-Pb por LA-ICPMS de zircões e monazitas da Zona de Cisalhamento Além Paraíba, idades de ca. 595 - 590 Ma para o pico metamórfico e um período de atividade de ca. 580 até 530 Ma para a deformação. Giraldo et al., (2019) então definiram que o cisalhamento ocorreu após o pico metamórfico, mas ainda em condições de alta pressão e temperatura ( $7,1 \pm 0,8$  kbar até  $4,3 \pm 1,1$  kbar e  $714 \pm 23$  °C até  $562 \pm 38$  °C).

### **3.3. O Método Lu-Hf em Granadas**

O Lutécio é um elemento terra rara pesado, de número atômico 71, porém com um raio atômico de 0,93 Å, sendo menor do que os outros elementos terra rara e similar ao raio do  $\text{Ca}^{2+}$  (0,99 Å), acabando por ser capturado no lugar deste em determinados cristais. O elemento possui dois isótopos naturais: o  $^{175}\text{Lu}$ , estável e representando cerca de 97,4% do Lutécio natural, e o  $^{176}\text{Lu}$ , instável e representando cerca de 2,59% do Lutécio encontrado na natureza. O isótopo instável por sua vez pode decair para  $^{176}\text{Hf}$  através da emissão de partículas beta ou para  $^{176}\text{Yb}$  por captura de elétrons (Figura 4). Dixon et al. (1954), no entanto definiram que somente  $3 \pm 1\%$  do decaimento do  $^{176}\text{Lu}$  resulta em  $^{176}\text{Yb}$ , podendo o Itérbio ser desconsiderado na maioria dos casos (Faure & Mensing, 2004).

Atomic number	72	Hf	$^{176}\text{Hf}$ 5.2	$^{177}\text{Hf}$ 18.6	$^{178}\text{Hf}$ 27.1
	71	Lu	$^{175}\text{Lu}$ 97.4	$^{176}\text{Lu}$ 2.59	
	70	Yb	$^{174}\text{Yb}$ 31.8		$^{176}\text{Yb}$ 12.7
			104	105	106
			Neutron number		

Figura 4. (Extraído de Faure & Mensing, 2004). Decaimento ramificado de  $^{176}\text{Lu}$  para  $^{176}\text{Hf}$  por emissão de partículas  $\beta^-$  e para  $^{176}\text{Yb}$  por captura de elétrons. Os números abaixo dos símbolos dos isótopos correspondem à porcentagem de sua abundância na natureza.

O Háfio é um metal de transição de número atômico 72 e raio atômico de 0,81 Å, quase idêntico ao do Zr (0,80 Å), fazendo com que ele seja facilmente capturado por minerais que possuem Zr em sua estrutura. Por se tratar de um isótopo de um metal de transição resultante do decaimento de um ETR, essa significativa diferença química entre isótopo pai e isótopo filho gera situações ótimas para análises isotópicas, pois onde o elemento pai entra, o elemento filho tende a não entrar. A figura 5 apresenta as concentrações médias de Lu e Hf, bem como a proporção Lu/Hf em rochas e minerais formadores de rocha (Faure & Mensing, 2004).

Minerals	Concentration (ppm)		Lu/Hf
	Lu	Hf	
<b>Rock-Forming Minerals</b>			
Plagioclase	0.062	0.31	0.20
Pyroxene	0.46	3.6	0.13
Diopside	0.60	2.9	0.21
Hornblende	1.07	0.61	1.75
Garnet	2.2	2.34	0.94
Biotite	2.7	1.0	2.7
Arfvedsonite	6.8	33	0.21
<b>Accessory Minerals</b>			
Zircon	23.65	15,177	0.0016
Eudialyte <sup>a</sup>	60.0	1,736	0.034
Baddeleyite <sup>b</sup>	70.0	13,340	0.005
Zirkelite <sup>c</sup>	—	4,700	—
<b>Terrestrial Rocks</b>			
Peridotite	0.039	1.14	0.034
Tholeiite basalt	0.50	2.45	0.20
Alkali basalt	0.65	5.2	0.12
Rhyolite	1.66	12.84	0.13
Granitic rocks	1.43	5.08	0.28
Carbonatites	2.4	10.0	0.24
<b>Meteorites</b>			
Chondrites	0.032	0.198	0.16
Achondrites			
Ca rich	0.35	0.73	0.48
Ca poor	0.026	0.072	0.36
<b>Lunar Rocks</b>			
Basalt	1.82	12.1	0.15
Soil	1.6	4.78	0.33

Figura 5. (Extraído de Faure & Mensing, 2004). Concentração média de Lu e Hf em minerais acessórios e formadores de rocha. <sup>a</sup>(Na,Ca,Fe)<sub>6</sub> Zr (OH,Cl) (SiO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>. <sup>b</sup>ZrO<sub>2</sub>. <sup>c</sup>(Ca,Fe) (Zr,Ti,Th)<sub>2</sub> O<sub>5</sub>.

Apesar de utilizada com menos frequência na geocronologia, a granada é um mineral encontrado com abundância em rochas metamórficas de diferentes composições e que se mantém metaestável durante o processo de resfriamento, além de possuir uma grande afinidade por Lutécio, fazendo dela uma excelente candidata para a geocronologia de rochas metamórficas de alto grau.

Duchêne et al. (1997) obtiveram os primeiros resultados precisos de geocronologia de Lu-Hf em granadas, porém ainda não havia um consenso sobre a temperatura de fechamento deste sistema. Scherer et al. (2000) ao realizarem um estudo relacionando o sistema Lu-Hf com o Sm-Nd definiram que a temperatura de fechamento do sistema Lu-Hf será sempre mais elevada que a do sistema Sm-Nd e diretamente proporcional ao do tamanho do grão, indo de ~540°C para cristais com um raio de 0,24mm, até temperaturas acima de 700°C para cristais com um raio de 4cm. Scherer et al. (2000) também evidenciaram as imprecisões nos resultados geocronológicos causados por inclusões microscópicas na granada, sendo o zircão, com sua alta concentração de Hf, prejudicial às análises de Lu-Hf. Shu et al. (2014) compilaram dados de geocronologia por Lu-Hf e Sm-Nd para definir uma temperatura máxima para o fechamento desses sistemas, chegando até ~920°C para Lu-Hf e ~850°C para Sm-Nd.

Scherer et al. (2001) refutaram a constante de decaimento para o cronômetro Lu-Hf até então aceita, afirmando que o  $\lambda^{176}\text{Lu}$  de  $1,93 \times 10^{-11} \pm 0,03 \text{ ano}^{-1}$  e o  $T_{1/2}$  de  $3,59 \pm 0,05 \times 10^{10}$  anos definidos por Sguigna et al. (1982) eram cerca de 4% mais curtos que o real, propondo através de comparações com análises U-Pb uma constante de decaimento para o  $^{176}\text{Lu}$  de  $1,865 \pm 0,015 \times 10^{-11} \text{ ano}^{-1}$  e um tempo de meia vida de  $3,717 \pm 0,030 \times 10^{10}$  anos. Posteriormente, Söderlund et al. (2004) fizeram pequenos ajustes à essa constante de decaimento, chegando na constante mais aceita atualmente de  $1,867 \pm 0,008 \times 10^{-11}$ .

Smit et al., (2013) aprimoraram métodos já conhecidos de datação isotópica em granadas ao comparar e fornecer explicações para as diferenças de idades medidas entre os cronômetros de Lu-Hf e Sm-Nd num mesmo cristal de granada formado em condições de alta temperatura. Os autores afirmam que o cronômetro de Lu-Hf representa a fase de crescimento da granada, já o cronômetro de Sm-Nd, quando a rocha em questão ultrapassa a fácies anfíbolito, se mantém ativo muito após a cristalização da granada, podendo ser utilizado para datar processos ocorridos após o pico metamórfico.

Cheng et al., (2018), através da datação de Lu-Hf e Sm-Nd por LA-ICPMS de um único porfiroblasto de granada de escala centimétrica particionado em cinco seções retangulares, concluíram que em megacristais com diferentes fases de crescimento mineral há um zoneamento do Sm nas porções mais externas do cristal, sendo as idades Lu-Hf e Sm-Nd obtidas no núcleo do cristal muito próximas, com as idades Sm-Nd se tornando mais jovens à medida que nos aproximamos da borda. Os autores sugerem que essa diferença nas idades Sm-Nd representa idades de resfriamento da rocha.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram utilizados os materiais e abordagens descritos a seguir

- Revisão de artigos publicados acerca da geocronologia da área de estudo e do método de datação Lu-Hf em granadas a partir do acervo da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP e com a ajuda de ferramentas de pesquisa voltadas às publicações acadêmicas como o *Google Scholar*.
- Petrografia de 18 amostras com enfoque na análise de microestruturas através de microscópios petrográficos Olympus BXP 40 do Laboratório Didático de Microscopia Petrográfica do IGc - USP.
- Moagem, peneiramento até uma fração de 60 – 100 mesh, separação magnética de magnetita e pirrotita com imã de mão e posteriormente de cristais de granada a 0,3A no *Frantz Isodynamic Separator (Model L-1)* com ângulo frontal de 25° e ângulo lateral de 15° segundo método de Rosenblum (1958), e por fim catação manual de cristais de granada com auxílio de estereoscópio binocular no Laboratório de Separação e Preparação (LSP) do IGc - USP.
- Análise geocronológica de dados de Lu-Hf em granadas realizada pela *GeoHistory Facility, Curtin University, Austrália*. Foi utilizado um sistema de ablação a excimer laser RESOLUTION 193 nm ArF com uma célula Laurin Technic S155 acoplado a um espectrômetro de massa triplo quadrupolo Agilent 8900 no modo MS/MS, utilizando o gás NH<sub>3</sub> na célula de colisão para possibilitar a medição de isótopos de Lu e Hf segundo método utilizado por Simpson et al. (2021). As condições analíticas são apresentadas na Tabela 1.

A redução de dados foi realizada através do software *lolite 4* (Paton et al., 2011) utilizando um esquema interno de redução de dados. As isócronas foram calculadas através do software *IsoplotR* (Vermeesch, 2018) utilizando um modelo de máxima verossimilhança e a constante de decaimento do <sup>176</sup>Lu definida por Söderlund et al. (2004).

Tabela 1. Condições analíticas utilizadas para a aquisição de isótopos de Lu-Hf em granadas

Configurações	Agilent 8900 ICP-MS
	Lu-Hf em Granada
Sistema de laser	ASI RESOLution
Comprimento de onda (nm)	193
Taxa de repetição (Hz)	10
Fluência do laser (J.cm <sup>-2</sup> )	2.5
Tempo de ablação (s)	60
Diâmetro do <i>spot</i> (µm)	100
Taxa de fluxo de He (ml.min <sup>-1</sup> )	320
Gás auxiliar He (l.min <sup>-1</sup> )	0.32
Gás auxiliar Ar (l.min <sup>-1</sup> )	0.95
Adição de N <sub>2</sub> (ml.min <sup>-1</sup> )	1.2
Gás de reação	20% NH <sub>3</sub> in He

A correlação de erro entre  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  e  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  pode se mostrar extrema em determinados casos. Para mitigar este efeito foram adotadas isócronas inversas utilizando  $^{176}\text{Hf}$  (isótopo mais abundante) como denominador comum, providenciando assim idades mais precisas (vide Li & Vermeesch, 2021). Todas as idades e incertezas são apresentadas dentro de um nível de confiança de um erro padrão da média de 2 (2SE).

Como principal material de referência foram utilizados vidros NIST610 e NIST612, com composições  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  e  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  de, respectivamente,  $0,1379 \pm 0,0005$  e  $0,282122 \pm 0,000009$  para o NIST610, e  $0,1346 \pm 0,0033$  e  $0,282100 \pm 0,000038$  para o NIST612 (Nebel et al., 2009; todas as incertezas em 2SE). Os resultados para as razões  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  do NIST610 foi em média  $0,282121 \pm 0,001072$ , e  $0,281844 \pm 0,004518$  para o NIST612. Para reduzir ainda mais o erro foram utilizadas granadas de duas amostras provenientes de estudos anteriores disponíveis no laboratório, sendo uma amostra de pegmatito com zircões de idade de  $939 \pm 5$  Ma (Wingate et al., 2011), e outra de gnaiss psamítico com zircões de idade de  $1299 \pm 8$  Ma (Wingate et al., 2016). As granadas provenientes da amostra de pegmatito apresentaram uma idade isócrona de  $954 \pm 40$  Ma (N= 38, MSWD = 1,6), e as provenientes da amostra de gnaiss

psamítico apresentaram uma idade isócrona de  $1318 \pm 89$  Ma (N = 35, MSWD = 0,9). (Os resultados analíticos dos materiais de referência se encontram em anexo).

- Interpretação dos dados obtidos com base na bibliografia a respeito do método Lu-Hf aliada à bibliografia acerca da geologia regional.

## **5. RESULTADOS OBTIDOS**

### **5.1. Petrografia**

Foram analisadas 18 lâminas delgadas de amostras previamente coletadas pelo Prof<sup>o</sup> M. Egidio na região de Sto Antônio de Pádua (RJ), Pirapetinga (MG) e Além Paraíba (MG) (Figura 6.). Dentre as lâminas analisadas, 10 possuíam granadas de escala milimétrica apresentando duas fases distintas. Uma com pequenas inclusões de quartzo sem direção preferencial e concentradas no núcleo do grão, e outra com grandes inclusões de quartzo e biotita anédricas sem nenhum padrão de distribuição observável. As descrições a seguir utilizarão as abreviações de Whitney & Evans (2010).

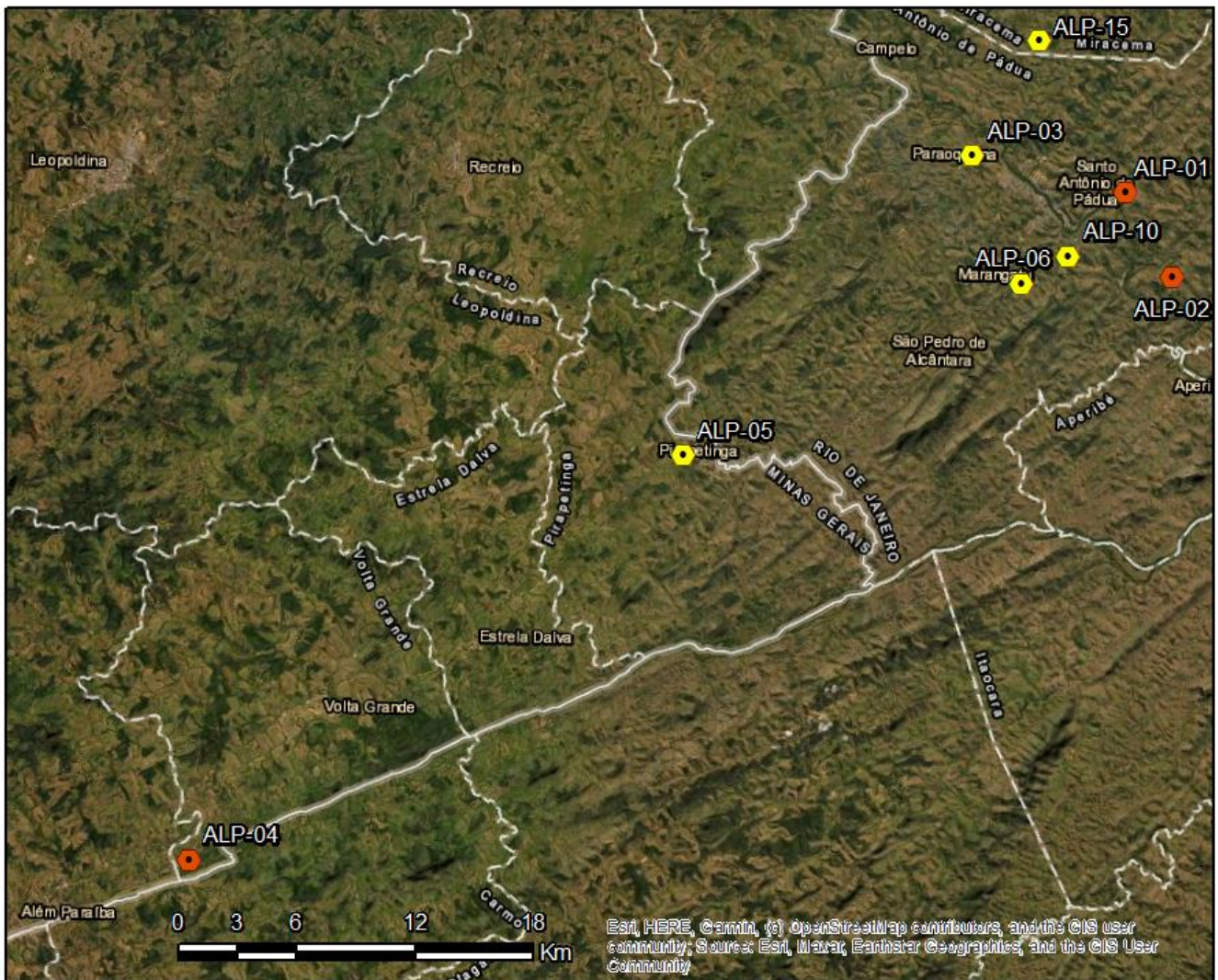


Figura 6. (ESRI OpenStreetMap) Localização dos pontos onde foi realizada a coleta de amostras para a confecção de lâminas delgadas. Em amarelo, os pontos onde não foram encontrados cristais de granada na lâmina. Em vermelho, os pontos onde foram observados cristais de granada na lâmina.

No ponto ALP-01 foram feitas quatro lâminas (ALP-01A/B/C/D) de uma mesma litologia interpretada como um ortognaisse milonítico do Complexo Juiz de Fora. A rocha apresenta Qz e Kfs com migração de borda de grão na matriz granoblástica com cristais de ~30 µm de diâmetro e ribbons de Qz de ~0,5mm de espessura com inclusões de carbonato em fraturas perpendiculares a direção dos ribbons. As Grt se apresentam como porfiroblastos sin-tectônicos de até 6mm de diâmetro e possuem inclusões anédricas difusas de Qz, Kfs e raramente Bt, de 50 – 200 µm de diâmetro. Opx e Amp encontram-se subédricos e sempre associados a Bt, ocasionalmente encontrando-se com recristalização nas bordas do mineral. A rocha apresenta ainda sillimanita subédrica associada à granada (Figura 7).

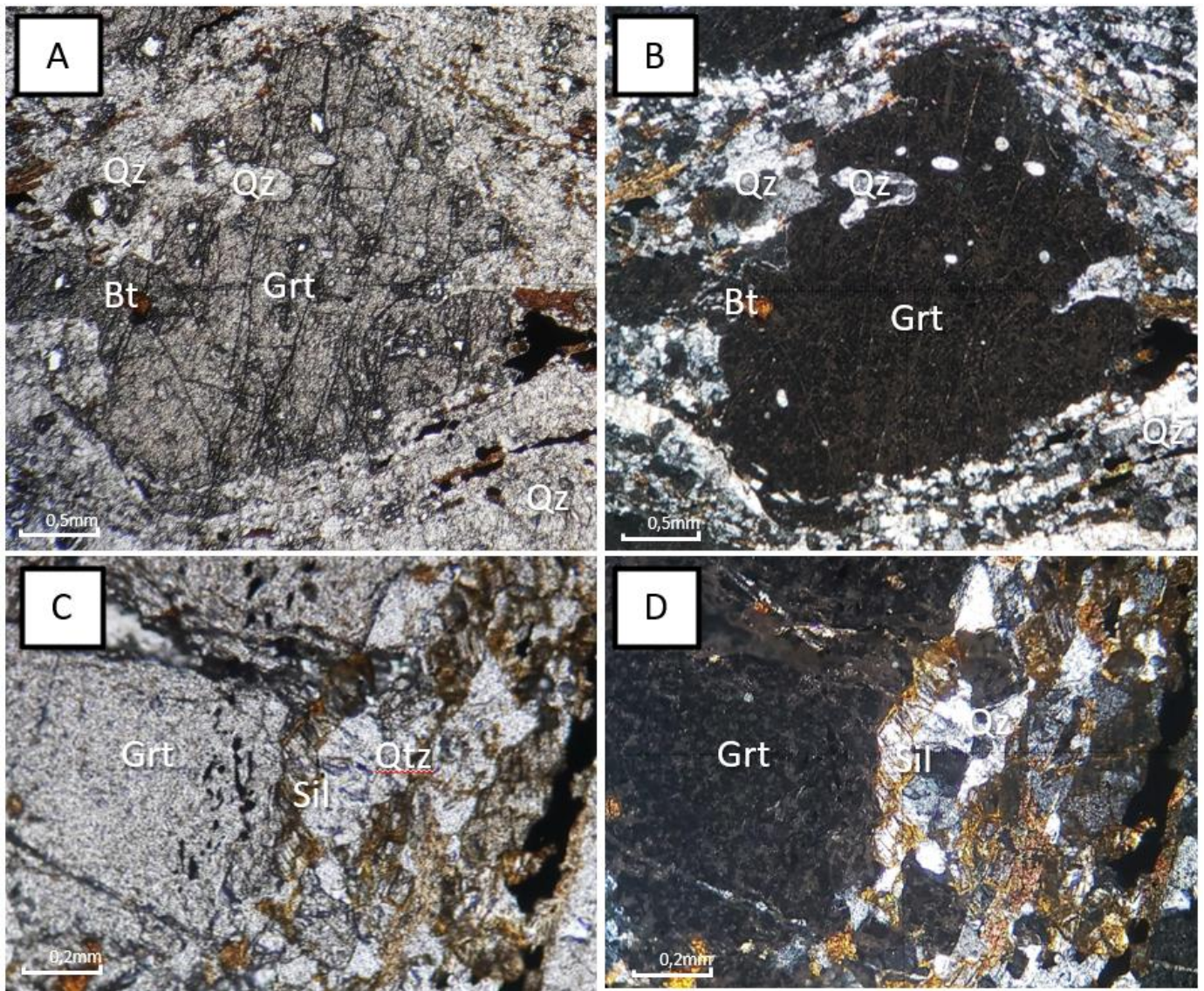


Figura 7. Fotomicrografia da lâmina ALP-01B. A e B: granada com inclusões de Bt e Qz recristalizado (nicóis descruzados e cruzados). C e D: Sil subédrica com borda de alteração (nicóis descruzados e cruzados, respectivamente).

No ponto ALP-02 foram feitas também quatro lâminas (ALP-02A/B/C/D) de um Grt-Bt-Gnaisse milonítico apresentando duas porções distintas:

- Uma mais máfica granolepidoblástica apresentando uma matriz com grãos de ~0,1mm de diâmetro, composta por quartzo, feldspato, biotita euédrica definindo orientação e com raras inclusões de zircão de ~10  $\mu\text{m}$ , e rutilo subédrico associado à biotita. As granadas se apresentam em porfiroblastos subidioblásticos de até 4mm com pequenas inclusões de quartzo de até 50  $\mu\text{m}$  formando um círculo ao redor do centro do grão, podendo indicar dois estágios de crescimento. Há ainda minerais máficos prismáticos que após consulta bibliográfica (Pereira e Guimarães, 2012) foram classificados como grafita. (Figura 8)
- Outra mais félsica granoblástica apresentando uma matriz mais recristalizada com grãos de ~0,2mm de diâmetro, composta por quartzo e feldspato com migração de borda de grão, biotita e apatita. As granadas são maiores do que as da porção anterior (até 1cm) e apresentam inclusões ameboidais de quartzo de ~500  $\mu\text{m}$ , não apresentando mais feições que pudessem indicar dois estágios de crescimento do grão. Há ainda silimanita associada a biotita em uma reação de quebra da granada. (Figura 9)

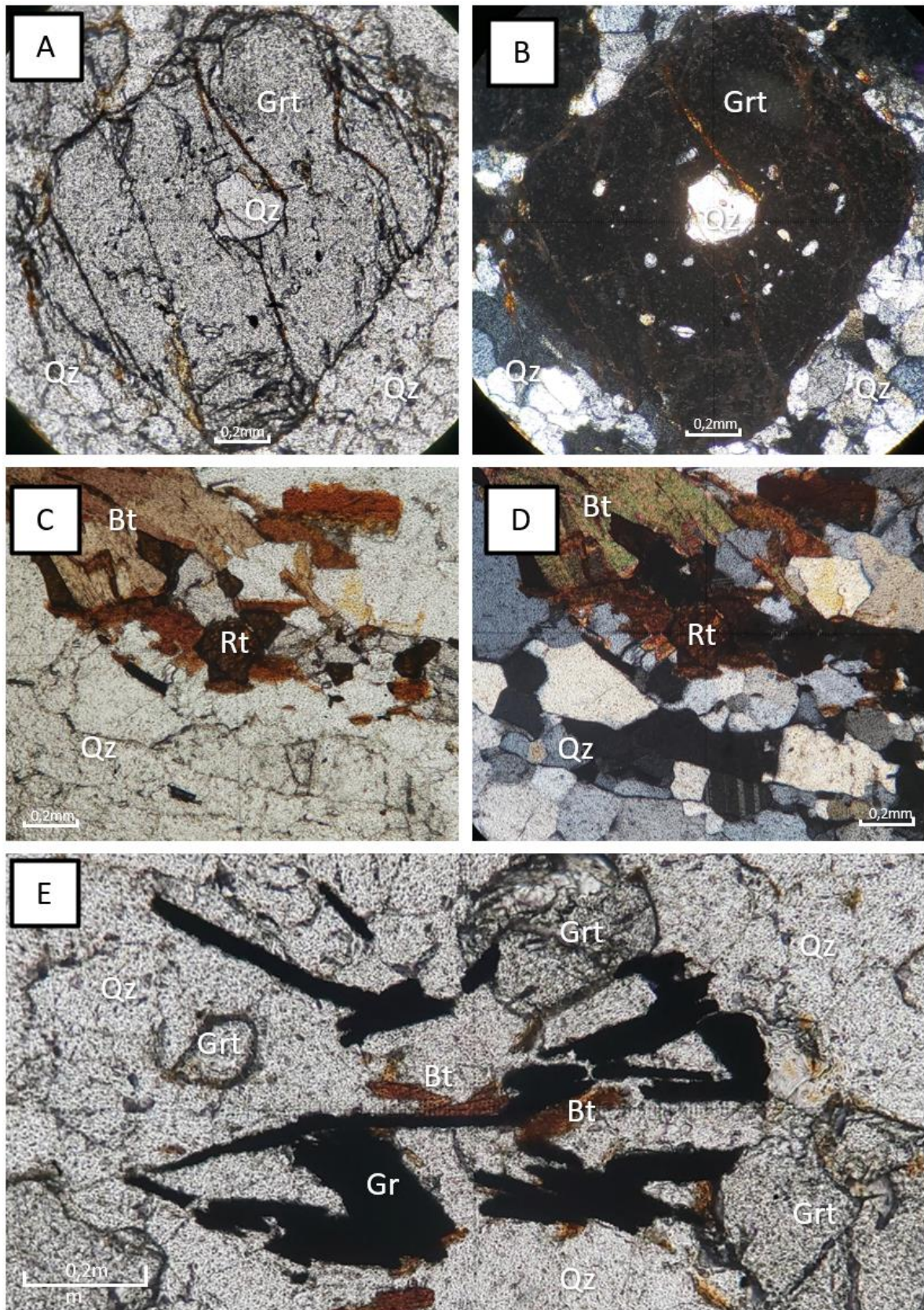


Figura 8. Fotomicrografia das lâminas da porção máfica do ponto ALP-02. A e B: Granada com inclusões de Qtz evidenciando possível diferenciação (nicóis descruzados e cruzados). C e D: Rutilo associado a Bt (nicóis descruzados e cruzados). E: Cristais prismáticos opacos interpretados como grafita (nicóis descruzados).

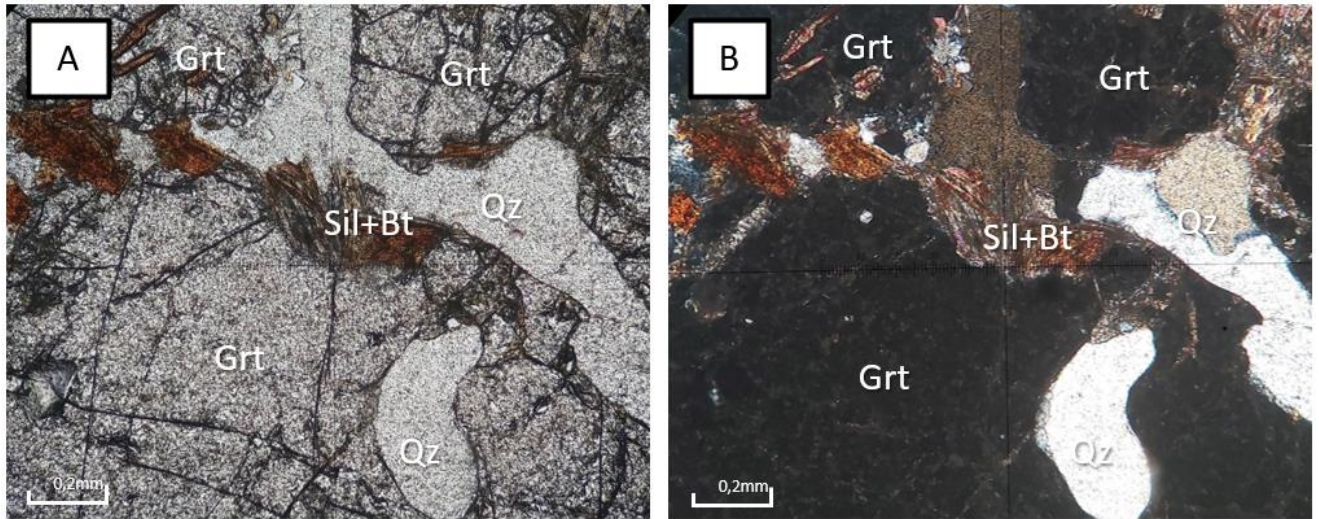


Figura 9. Fotomicrografia das lâminas da porção félsica do ponto ALP-02. A e B: Reação de quebra da granada (nicóis descruzados e cruzados).

No ponto ALP-04 foram feitas duas lâminas (ALP-04A/B) de uma mesma litologia descrita como um granulito milonitizado. A rocha possui uma matriz granolepidoblástica composta de quartzo em ribbons de ~0,2mm e com migração de borda de grão, feldspato com rotação de subgrão e em pseudomorfos de granada de ~0,5mm, Crd, e Bt subédrica. As granadas se apresentam como porfiroclastos de ~1,5mm, subédricos a anédricos, hora com inclusões de quartzo anédrico e biotitas euédricas evidenciando orientação anterior a rotação dextral, hora sendo consumidas por silimanita fibrosa e biotita. (Figura 10)

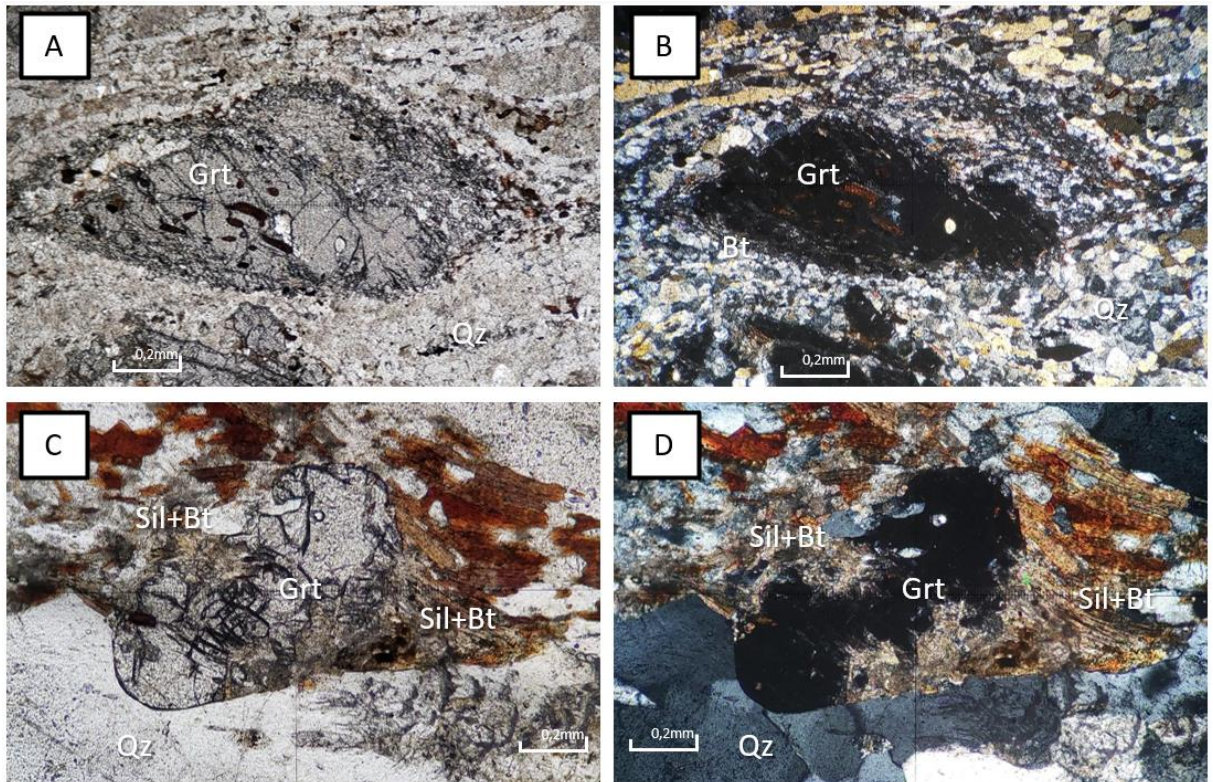


Figura 10. Fotomicrografia das lâminas do ponto ALP-04. A e B: Granada rotacionada (nicóis descruzados e cruzados). C e D: Granada sendo consumida por silimanita e biotita (nicóis descruzados e cruzados)

Nos demais pontos aqui apresentados não foram encontrados granadas em lâmina, apenas pseudomorfos de Opx e Cpx. Estes pontos foram então desconsiderados para a realização do presente trabalho.

## 5.2. Geocronologia

Foram preparadas para a análise de Lu-Hf por LA-ICP-MS um total de 5 amostras de rocha, sendo duas do ponto ALP-01 (ALP-01A sendo a porção ligeiramente mais félsica do ortogneisse, e ALP-01B sendo a mais máfica), duas do ponto ALP-02 (ALP-02A sendo a porção mais félsica abordada na petrografia, e ALP-02B a mais máfica, apresentando granadas menores), e por fim uma do ponto ALP-04. Essas amostras foram trituradas, moídas, peneiradas até uma fração #60 - #100 (250 – 150  $\mu\text{m}$ ) e separadas magneticamente a 0,3A para se obter um concentrado de cristais de granada para cada amostra. A partir destes concentrados foi produzido um mount com cerca de 10 cristais de granada manualmente selecionados para cada amostra.

O mount foi enviado para o Laboratório GeoHistory da Curtin University, West Australia, onde foram realizadas análises de LA-ICP-MS/MS, produzindo os seguintes resultados para cada amostra:

### 5.2.1. ALP-01A

A amostra ALP-01A teve um total de 30 pontos de coleta, tendo 2 pontos removidos no processo de redução de dados. As razões mínimas e máximas de  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  e  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  foram, respectivamente  $0,6263 \pm 0,2375$  e  $20,9272 \pm 1,0072$  para  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ , e  $0,2819 \pm 0,0100$  e  $0,5391 \pm 0,0492$  para  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  (Tabela 2). A isócrona apresentou uma idade de  $673 \pm 76$  Ma (MSWD = 0,8) com uma distribuição consideravelmente uniforme ao longo da reta (Figura 11A).

Tabela 2. Resultados obtidos por LA-ICP-MS/MS de granadas da amostra ALP-01A.

Amostras	Razões isotópicas				rho	Idade Lu-Hf (Ma)	Idade Lu-Hf (2SE) (Ma)
	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)			
ALP-1A - 2.d	1,8944	0,1433	0,3287	0,0664	0,2991	725,1	144,2
ALP-1A - 3.d	20,9272	1,0072	0,5391	0,0492	0,7320	665,1	50,2
ALP-1A - 4.d	16,3326	0,7027	0,4791	0,0540	0,9380	661,5	63,0
ALP-1A - 5.d	1,3484	0,0511	0,2994	0,0284	0,1648	676,2	63,4
ALP-1A - 6.d	1,2108	0,0436	0,3157	0,0260	0,4634	716,8	58,0
ALP-1A - 7.d	6,5087	0,3356	0,3671	0,0410	0,3528	680,1	73,0
ALP-1A - 8.d	2,4561	0,0833	0,3017	0,0246	0,9993	650,9	50,5
ALP-1A - 9.d	4,0423	0,1412	0,3440	0,0286	0,7524	697,1	54,9
ALP-1A - 10.d	3,0420	0,0924	0,3164	0,0229	0,1662	666,7	47,7
ALP-1A - 11.d	3,9748	0,1491	0,3659	0,0627	0,9824	743,0	122,4
ALP-1A - 12.d	4,7474	0,2146	0,3341	0,0344	0,9915	659,6	62,3
ALP-1A - 13.d	1,5727	0,1340	0,2951	0,0603	0,9338	660,3	130,6
ALP-1A - 15.d	4,2907	0,1513	0,3410	0,0306	0,6650	684,6	58,5
ALP-1A - 16.d	7,7422	0,2626	0,3852	0,0286	0,9512	684,2	44,9
ALP-1A - 17.d	6,1698	0,1989	0,3477	0,0241	0,6521	652,0	42,1
ALP-1A - 18.d	2,2782	0,0968	0,2942	0,0279	1,0000	639,3	57,7
ALP-1A - 19.d	1,9934	0,0697	0,3174	0,0306	0,9549	697,5	65,0
ALP-1A - 20.d	9,9164	0,6756	0,3870	0,0549	0,9782	641,2	77,3
ALP-1A - 21.d	0,6263	0,2375	0,2820	0,0100	0,4802	657,1	20,8
ALP-1A - 22.d	1,1929	0,0647	0,2900	0,0259	0,8622	659,3	56,9
ALP-1A - 23.d	2,1091	0,1166	0,3071	0,0305	0,1763	671,8	65,8
ALP-1A - 24.d	3,0848	0,1545	0,3331	0,0376	0,9244	700,5	74,6
ALP-1A - 25.d	1,4918	0,0704	0,3182	0,0317	0,9067	714,0	68,8
ALP-1A - 26.d	4,8909	0,2037	0,3677	0,0352	0,9431	721,6	63,5
ALP-1A - 27.d	5,3695	0,2154	0,3392	0,0257	0,8874	654,5	44,7
ALP-1A - 28.d	6,2682	0,2369	0,3473	0,0293	0,9120	649,0	49,6
ALP-1A - 29.d	4,1438	0,1816	0,3423	0,0364	0,9445	691,0	68,6
ALP-1A - 30.d	6,2159	0,2447	0,3751	0,0272	0,8937	702,0	45,2

### 5.2.2. ALP-01B

A amostra ALP-01B teve um total de 30 pontos de coleta, tendo 1 outlier removido no processo de redução de dados. As razões mínimas e máximas de  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  e  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  foram, respectivamente  $0,2836 \pm 0,0121$  e  $21,2871 \pm 1,2868$  para  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ , e  $0,2754 \pm 0,0322$  e  $0,5543 \pm 0,0752$  para  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  (Tabela 3). A isócrona apresentou uma idade de  $597 \pm 55$  Ma (MSWD = 1,0) com uma distribuição menos uniforme ao longo da reta quando comparada a distribuição da amostra ALP-01A (Figura 11B).

Tabela 3. Resultados obtidos por LA-ICP-MS/MS de granadas da amostra ALP-01B.

Amostras	Razões isotópicas				rho	Idade Lu-Hf (Ma)	Idade Lu-Hf (2SE) (Ma)
	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)			
ALP-1B - 1.d	0,1530	0,0058	0,3069	0,0212	0,8828	623.9	42.8
ALP-1B - 2.d	0,1740	0,0080	0,2898	0,0261	0,9016	588.9	52.6
ALP-1B - 3.d	0,8021	0,0292	0,2990	0,0298	0,9287	593.4	58.2
ALP-1B - 4.d	1,3693	0,0501	0,2949	0,0270	0,9801	573.3	51.3
ALP-1B - 5.d	1,3804	0,0698	0,2957	0,0293	0,9998	574.5	55.2
ALP-1B - 6.d	1,9547	0,0860	0,3382	0,0434	0,9803	643.2	80.2
ALP-1B - 7.d	0,4402	0,0197	0,3003	0,0339	0,9448	604,0	67.5
ALP-1B - 8.d	0,6302	0,0365	0,2754	0,0322	0,9218	550.3	63.4
ALP-1B - 9.d	0,6682	0,0281	0,3101	0,0280	0,9589	618.4	55,0
ALP-1B - 10.d	0,7916	0,0358	0,3013	0,0304	0,9363	598.2	59.3
ALP-1B - 11.d	16,3566	0,9376	0,4763	0,0568	0,9890	598.3	57.9
ALP-1B - 12.d	18,5977	1,2566	0,4775	0,0532	0,9665	570,0	47.9
ALP-1B - 13.d	15,4653	0,9017	0,5042	0,0546	0,9245	646.7	57,0
ALP-1B - 14.d	21,2871	1,2159	0,5109	0,0619	0,9633	575.2	55.3
ALP-1B - 15.d	20,8997	1,2868	0,5543	0,0752	0,8800	628.8	70.2
ALP-1B - 16.d	18,7076	0,9405	0,4672	0,0595	0,2950	556.3	68,0
ALP-1B - 17.d	0,4264	0,0177	0,2772	0,0254	0,9679	558,0	50.4
ALP-1B - 18.d	4,4465	0,2055	0,3401	0,0394	0,9472	594.2	64.6
ALP-1B - 19.d	6,0591	0,2807	0,3381	0,0254	0,9216	561.3	37.5
ALP-1B - 20.d	0,2836	0,0121	0,2816	0,0252	0,9031	569.9	50.5
ALP-1B - 21.d	0,2899	0,0169	0,3025	0,0310	0,8991	611.9	62.1
ALP-1B - 22.d	0,4080	0,0174	0,3143	0,0307	0,9659	632.7	61.1
ALP-1B - 23.d	0,9748	0,0376	0,3082	0,0246	0,8830	607.7	47.4
ALP-1B - 24.d	1,4388	0,0385	0,3148	0,0292	0,9553	610.2	55.4
ALP-1B - 25.d	12,4780	0,7571	0,4579	0,0555	0,9289	633.1	64.9
ALP-1B - 26.d	18,0212	1,1668	0,4999	0,0535	0,9988	604.3	48.4
ALP-1B - 27.d	6,2137	0,2260	0,3544	0,0355	0,9429	585.3	54.5
ALP-1B - 28.d	0,6118	0,0430	0,2814	0,0355	0,9409	562.5	69.7
ALP-1B - 30.d	0,3799	0,0165	0,3008	0,0278	0,8427	606.4	55.5

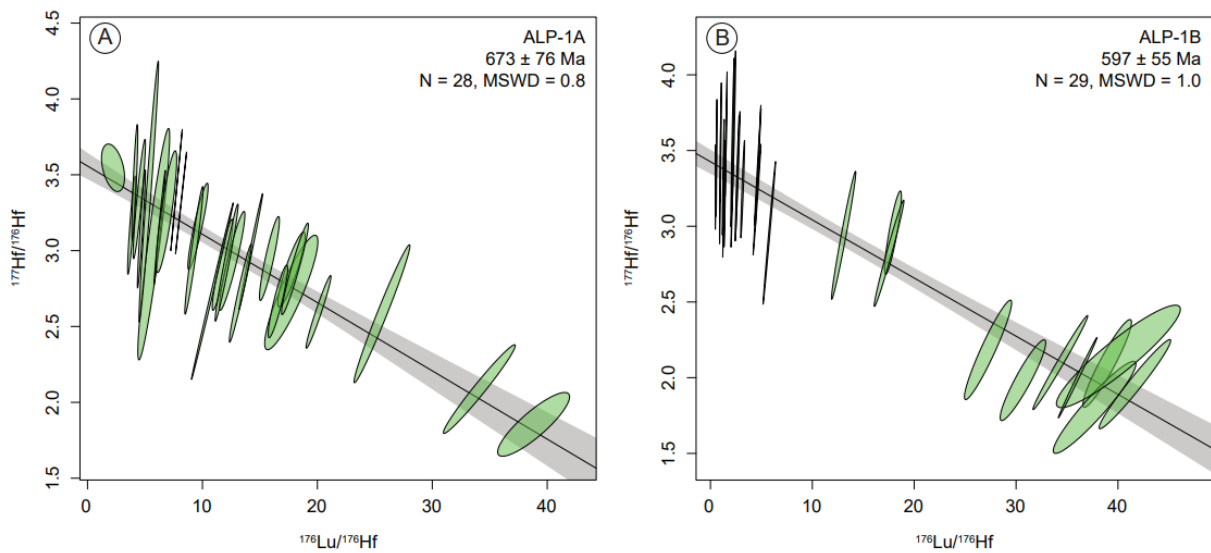


Figura 11: (IsoplotR) Isócronas das amostras ALP-01A (A) e ALP-01B (B).

### 5.2.3. ALP-02A

A amostra ALP-02A teve um total de 29 pontos de coleta, tendo 1 ponto removido no processo de redução de dados. As razões mínimas e máximas de  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  e  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  foram, respectivamente  $0,10261 \pm 0,0061$  e  $14,2750 \pm 0,9864$  para  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ , e  $0,2570 \pm 0,0226$  e  $0,4937 \pm 0,0609$  para  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  (Tabela 4). A isócrona apresentou uma idade de  $720 \pm 84$  Ma (MSWD = 1,4) com uma distribuição de duas populações distintas ao longo da reta (Figura 12A).

Tabela 4. Resultados obtidos por LA-ICP-MS/MS de granadas da amostra ALP-02A.

Amostras	Razões isotópicas				rho	Idade Lu-Hf (Ma)	Idade Lu-Hf (2SE) (Ma)
	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)			
ALP-2A - 1.d	0,6271	0,0306	0,3249	0,0356	0,9570	806.9	86.6
ALP-2A - 2.d	0,4622	0,0240	0,2755	0,0324	0,8723	690.1	79.9
ALP-2A - 3.d	0,5623	0,0258	0,3037	0,0332	0,9977	756.7	81.3
ALP-2A - 4.d	0,4487	0,0202	0,2973	0,0293	0,9384	744.9	72.2
ALP-2A - 5.d	0,3888	0,0209	0,2783	0,0296	0,9147	699.5	73.3
ALP-2A - 6.d	0,5076	0,0231	0,2709	0,0302	0,9996	677.3	74.3
ALP-2A - 7.d	0,9927	0,0503	0,3043	0,0364	0,9994	743.3	86.5
ALP-2A - 8.d	0,9636	0,0457	0,3015	0,0439	0,9775	737.6	105.1
ALP-2A - 9.d	1,2928	0,0715	0,3103	0,0438	0,9985	747.8	102.5
ALP-2A - 10.d	0,1026	0,0061	0,2992	0,0299	0,9301	762.0	75.5
ALP-2A - 11.d	0,5333	0,0229	0,2838	0,0238	0,8391	708.5	58.5
ALP-2A - 12.d	0,4972	0,0207	0,2570	0,0226	0,7169	643.0	55.7
ALP-2A - 13.d	0,7764	0,0391	0,2950	0,0349	0,9436	728.0	84.3
ALP-2A - 14.d	0,6283	0,0254	0,2774	0,0224	0,9063	689.6	54.5
ALP-2A - 15.d	0,6029	0,0250	0,3000	0,0320	0,9465	746.3	78.2
ALP-2A - 16.d	0,2795	0,0164	0,2904	0,0394	0,9805	733.6	98.3
ALP-2A - 17.d	0,2917	0,0183	0,3038	0,0401	0,9853	766.6	99.8
ALP-2A - 18.d	0,2288	0,0103	0,2602	0,0296	1,0000	659.4	74.2
ALP-2A - 19.d	0,2459	0,0128	0,2653	0,0307	1,0000	671.5	76.9
ALP-2A - 20.d	7,7937	0,4141	0,3705	0,0331	0,9654	690.0	51.7
ALP-2A - 21.d	6,9184	1,2469	0,3759	0,0371	0,5256	721.9	60.3
ALP-2A - 22.d	11,1256	0,5277	0,4268	0,0397	0,8984	711.8	55.5
ALP-2A - 23.d	14,0526	0,6676	0,4271	0,0470	0,9723	652.7	59.3
ALP-2A - 24.d	14,2750	0,9864	0,4937	0,0609	0,9101	749.1	73.2
ALP-2A - 26.d	0,8894	0,0351	0,2914	0,0325	0,9551	715.4	78.1
ALP-2A - 27.d	0,5318	0,0257	0,2829	0,0296	0,9467	706.2	72.5
ALP-2A - 28.d	11,2475	0,8707	0,4754	0,0511	0,8542	789.2	67.0
ALP-2A - 29.d	0,6470	0,0252	0,2995	0,0303	0,9496	743.5	73.9

#### 5.2.4. ALP-02B

A amostra ALP-02B teve um total de 34 pontos de coleta, tendo 4 outliers removidos no processo de redução de dados. As razões mínimas e máximas de  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  e  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  foram, respectivamente  $0,2090 \pm 0,0099$  e  $1,4699 \pm 0,1352$  para  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ , e  $0,27398 \pm 0,0284$  e  $0,3607 \pm 0,0589$  para  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  (Tabela 5). A isócrona apresentou uma idade de  $1850 \pm 1277$  Ma (MSWD = 0,8), porém, com razões de  $^{176}\text{Lu}/^{176}\text{Hf}$  muito baixas (Figura 12B).

Tabela 5. Resultados obtidos por LA-ICP-MS/MS de granadas da amostra ALP-02B.

Amostras	Razões isotópicas				rho	Idade Lu-Hf (Ma)	Idade Lu-Hf (2SE) (Ma)
	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)			
ALP-2B - 1.d	0,1879	0,0108	0,3104	0,0289	0,8150	1956,0	177,0
ALP-2B - 2.d	0,2048	0,0113	0,3092	0,0284	0,6687	1945,0	174,0
ALP-2B - 3.d	0,3784	0,0184	0,3019	0,0272	0,9656	1862,0	161,0
ALP-2B - 4.d	0,4839	0,0245	0,2924	0,0314	0,9944	1782,0	184,0
ALP-2B - 5.d	0,4181	0,0191	0,3231	0,0306	0,9062	1981,0	180,0
ALP-2B - 6.d	0,3283	0,0167	0,3106	0,0277	0,8521	1925,0	166,0
ALP-2B - 7.d	1,1438	0,0788	0,2997	0,0518	0,9791	1699,0	275,0
ALP-2B - 8.d	1,4699	0,1352	0,3471	0,0628	0,8162	1897,0	316,0
ALP-2B - 9.d	1,0299	0,0812	0,3163	0,0464	0,9326	1813,0	247,0
ALP-2B - 10.d	0,2550	0,0123	0,2922	0,0240	0,8412	1829,0	145,0
ALP-2B - 11.d	0,2708	0,0125	0,2961	0,0249	0,9280	1849,0	151,0
ALP-2B - 12.d	0,2578	0,0102	0,2859	0,0235	0,9676	1789,0	143,0
ALP-2B - 13.d	0,2348	0,0107	0,2832	0,0239	0,9277	1777,0	145,0
ALP-2B - 14.d	0,2242	0,0109	0,3141	0,0303	0,9626	1970,0	184,0
ALP-2B - 15.d	0,2716	0,0113	0,2893	0,0280	0,9084	1807,0	170,0
ALP-2B - 16.d	0,8987	0,0648	0,3607	0,0589	0,9744	2092,0	321,0
ALP-2B - 17.d	1,1201	0,0967	0,3064	0,0796	0,9353	1740,0	428,0
ALP-2B - 18.d	0,7421	0,0630	0,3450	0,0703	0,9590	2037,0	394,0
ALP-2B - 19.d	0,9805	0,0889	0,3050	0,0648	0,8846	1759,0	353,0
ALP-2B - 20.d	0,6865	0,0409	0,3015	0,0347	0,9161	1795,0	196,0
ALP-2B - 21.d	0,2379	0,0131	0,2837	0,0301	1,0000	1780,0	183,0
ALP-2B - 23.d	0,2471	0,0150	0,2898	0,0290	0,8883	1816,0	176,0
ALP-2B - 24.d	0,2618	0,0116	0,2805	0,0286	0,9982	1755,0	173,0
ALP-2B - 25.d	0,3254	0,0170	0,2740	0,0284	0,9014	1702,0	170,0
ALP-2B - 26.d	0,4561	0,0283	0,3148	0,0334	1,0000	1923,0	194,0
ALP-2B - 27.d	0,4685	0,0200	0,3063	0,0330	0,9585	1869,0	194,0
ALP-2B - 28.d	0,2396	0,0136	0,2994	0,0275	0,9281	1876,0	167,0
ALP-2B - 31.d	0,2652	0,0113	0,2831	0,0237	0,5025	1771,0	145,0
ALP-2B - 33.d	0,8361	0,0863	0,3095	0,0591	0,9270	1812,0	325,0
ALP-2B - 34.d	0,2090	0,0099	0,2842	0,0262	0,8775	1789,0	160,0

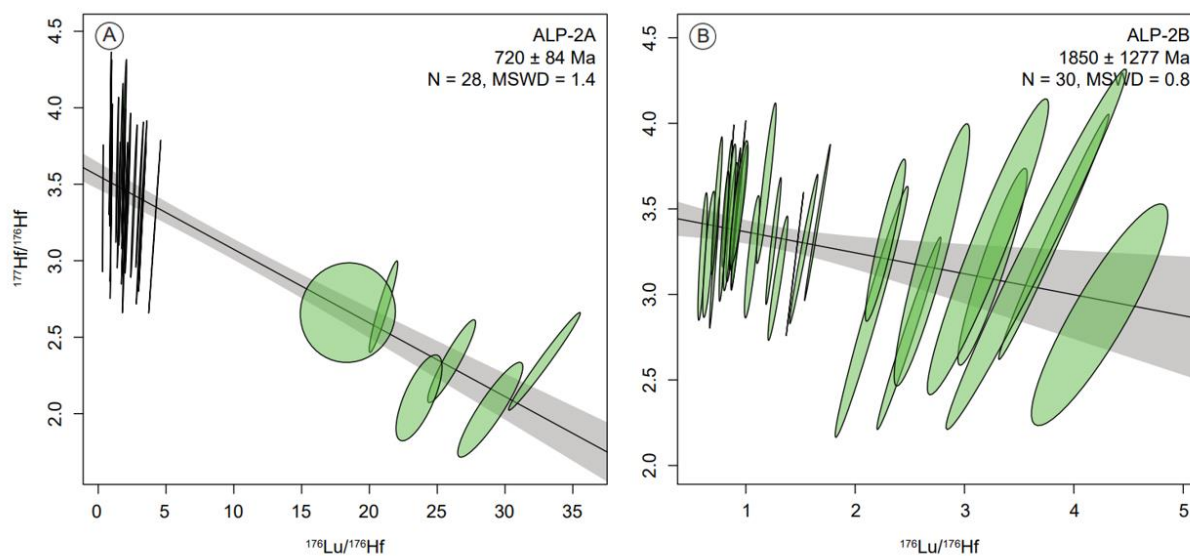


Figura 12: (IsoplotR) Isócronas das amostras ALP-02A (A) e ALP-02B (B).

### 5.2.5. ALP-04

A amostra ALP-04 teve um total de 26 pontos de coleta, não sendo removido nenhum ponto no processo de redução de dados. As razões mínimas e máximas de  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  e  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  foram, respectivamente  $0,0998 \pm 0,0067$  e  $14,4009 \pm 0,7430$  para  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ , e  $0,2604 \pm 0,0262$  e  $0,4963 \pm 0,0701$  para  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  (Tabela 6). A isócrona apresentou uma idade de  $667 \pm 77$  Ma (MSWD = 1,3) com uma distribuição uniforme ao longo da reta (Figura 13).

Tabela 6. Resultados obtidos por LA-ICP-MS/MS de granadas da amostra ALP-04.

Amostras	Razões isotópicas				rho	Idade Lu-Hf (Ma)	Idade Lu-Hf (2SE) (Ma)
	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)			
ALP-4 - 1.d	0,3222	0,0167	0,2604	0,0262	0,9490	605.5	60.2
ALP-4 - 2.d	0,1611	0,0104	0,2826	0,0298	0,8431	661.5	69.0
ALP-4 - 3.d	0,1291	0,0078	0,2855	0,0298	0,8833	669.1	69.1
ALP-4 - 4.d	0,2251	0,0132	0,3290	0,0344	0,8787	767.2	79.2
ALP-4 - 5.d	0,4426	0,0241	0,2672	0,0310	0,9471	618.0	70.7
ALP-4 - 6.d	0,8953	0,0400	0,3114	0,0359	1,0000	705.8	79.5
ALP-4 - 7.d	0,4828	0,0252	0,2843	0,0316	0,9973	656.3	71.9
ALP-4 - 8.d	1,3241	0,0391	0,2771	0,0238	0,8706	617.4	51.9
ALP-4 - 9.d	0,2784	0,0150	0,2929	0,0325	0,8482	682.0	74.9
ALP-4 - 10.d	12,9817	0,5371	0,4208	0,0414	0,9999	630.0	52.2
ALP-4 - 11.d	2,9191	0,1492	0,3422	0,0344	0,8949	714.0	67.6
ALP-4 - 12.d	8,3196	0,4038	0,3899	0,0384	0,9624	671.6	57.5
ALP-4 - 13.d	10,7638	0,5885	0,4063	0,0442	0,9374	648.7	59.6
ALP-4 - 14.d	14,4009	0,7430	0,4623	0,0415	0,8695	665.5	48.3
ALP-4 - 15.d	7,5436	0,3565	0,3847	0,0356	0,9025	679.7	55.4
ALP-4 - 16.d	7,0295	0,3248	0,3646	0,0438	0,9734	655.5	71.4
ALP-4 - 17.d	10,4746	0,4731	0,4122	0,0387	0,9319	663.9	53.3
ALP-4 - 18.d	1,6037	0,0617	0,2876	0,0220	0,8798	633.2	46.7
ALP-4 - 19.d	0,4195	0,0262	0,2928	0,0350	0,9991	677.7	79.7
ALP-4 - 20.d	4,8812	0,1790	0,3374	0,0320	0,9549	654.0	57.7
ALP-4 - 21.d	4,8031	0,2683	0,3668	0,0379	0,9355	712.7	66.6
ALP-4 - 22.d	14,2840	0,8510	0,4963	0,0701	0,9929	716.3	84.2
ALP-4 - 23.d	2,5916	0,1343	0,3227	0,0378	0,9697	682.2	75.9
ALP-4 - 24.d	0,0998	0,0067	0,2661	0,0272	0,9438	624.8	63.2
ALP-4 - 25.d	3,5802	0,2353	0,3335	0,0328	1,0000	678.4	60.3
ALP-4 - 26.d	0,2504	0,0258	0,2869	0,0247	0,8910	668.9	56.6

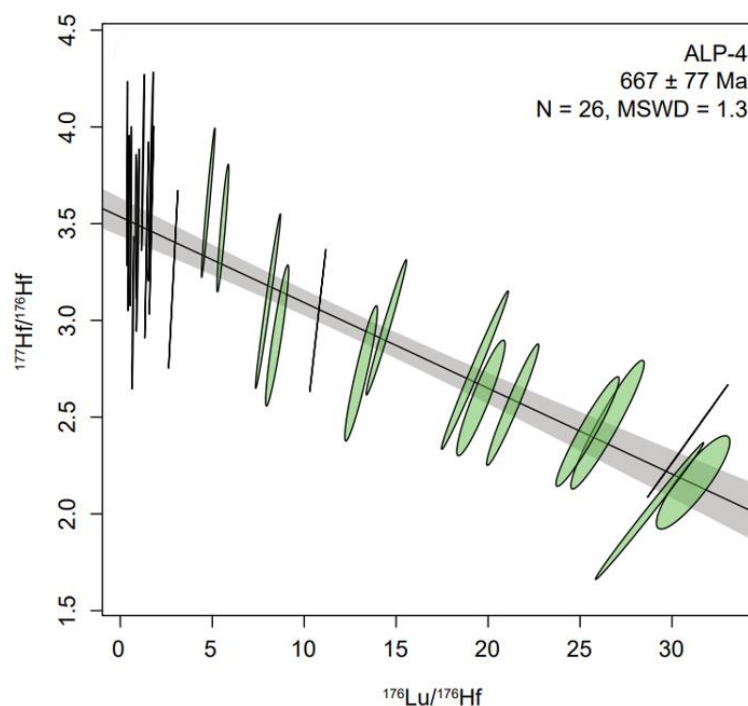


Figura 13: (IsoplotR) Isócrona da amostra ALP-04.

## 6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1. Petrografia

As lâminas referentes as amostras ALP-01 e a porção máfica da ALP-02 apresentam assembleia mineral e feições de recristalização similares entre si. A porção mais máfica do ponto ALP-02 foi interpretada como um paleossoma num processo de migmatização da rocha, sendo as granadas presentes nessa porção muito mais antigas, apresentando múltiplos estágios de crescimento evidenciados pelas inclusões. Já a porção félsica foi interpretada como sendo o neossoma do gnaiss milonítico, com granadas bem formadas e com poucas inclusões.

A amostra ALP-04 apresenta ainda a mesma assembleia mineral observada nas amostras anteriores, porém, por se encontrar numa faixa de deformação mais intensa, a granada se comporta como porifoclastos, preservando através das inclusões de biotita, a foliação anterior à rotação dextral.

As feições de migração de borda de grão dos qtz e rotação de subgrão/migração de borda de grão nos feldspatos observadas, bem como a reação de consumo da granada por

silimanita e biotita ( $\text{Grt} + \text{Crd} + \text{Ksp} + \text{L} = \text{Sil} + \text{Bt}$ ) (Figura 14) observada em todas as amostras, indicam condições de pico de P-T de ~7 kbar e ~850°C, valores condizentes com os propostos por Bento dos Santos et al. (2011) para o pico metamórfico da região. A presença de cristais de granada menos bem formados com inclusões de biotita e feldspato anédricos também indica que as reações  $\text{Sil} + \text{Bt} = \text{Grt} + \text{Crd} + \text{Ksp} + \text{L}$  e  $\text{Opx} + \text{Crd} + \text{Ksp} + \text{liq} = \text{Grt} + \text{Bt}$  podem ter ocorrido durante a trajetória do metamorfismo. A reação  $\text{Grt} + \text{Bt} + \text{H}_2\text{O} = \text{Opx} + \text{Crd} + \text{liq}$  também pode ter ocorrido, mas rapidamente se esgotou pela baixa quantidade de minerais hidratados nas amostras aqui estudadas.

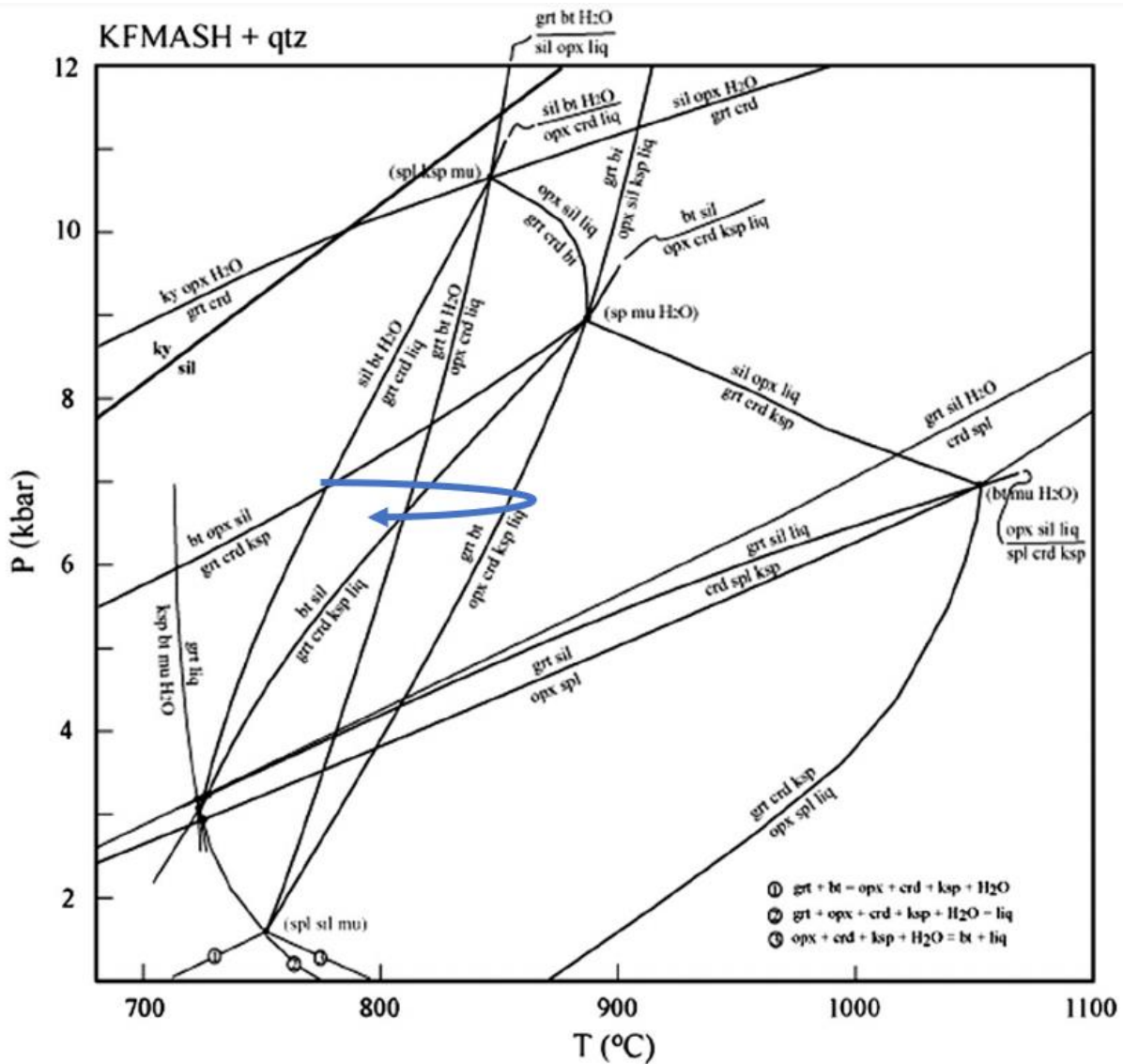


Figura 14. (Adaptado de White et al., 2001). Diagrama KFMASH para rochas metamórficas de alta temperatura com trajetória da rocha representada pela seta azul.

## 6.2. Geocronologia

Os dados geocronológicos obtidos nas amostras ALP-02A e ALP-02B apresentaram uma grande imprecisão, possivelmente decorrente das inclusões de rutilo presentes na rocha, além de uma possível reativação do sistema ao ultrapassar a temperatura de fechamento durante o processo que resultou na migmatização da rocha. Os dados com maiores razões  $^{176}\text{Lu}/^{176}\text{Hf}$  da porção interpretada como neossoma podem ainda estar indicando a temperatura isocrônica da recristalização dessa porção da rocha, porém, ainda misturados com granadas reliquiares provenientes do paleossoma, tornando assim os dados pouco confiáveis. Já os dados do paleossoma apresentam razões  $^{176}\text{Lu}/^{176}\text{Hf}$  baixíssimas para granadas, resultando em uma grande imprecisão que impossibilita quaisquer conclusões.

Já os dados das amostras ALP-01A, ALP-01B e ALP-04 mostraram-se mais confiáveis. A amostra ALP-01B, correspondente à porção mais máfica do ortogneisse milonítico, apresentou idade isocrônica consistente com as observadas por Giraldo et al., (2019) por U-Pb em monazita e bordas metamórficas de zircão para o metamorfismo na fácies anfíbolito. Já as amostras ALP-01A e ALP-04 apresentaram idades que podem ser mais antigas (embora menos precisas). A Figura 15 apresenta os dados aqui obtidos em comparação com as idades definidas por Giraldo et al., (2019).

Giraldo et al., (2019) quantificaram condições metamórficas para o cisalhamento que chegam ao campo dos granulitos. As granadas pertencentes às amostras ALP-1A e ALP-4 estariam então datando esse metamorfismo granulítico pre-cisalhamento. De acordo com as condições P-T, o cisalhamento teria acontecido na fácies anfíbolito favorecendo o registro da idade em monazita e zircão (Giraldo et al., 2019). Os cristais de granada formados durante condições de fácies granulito preservariam as idades do metamorfismo pretérito dado à alta temperatura de fechamento do sistema Lu-Hf em granadas podendo chegando a temperaturas de até 920 °C (Shu et al., 2014).

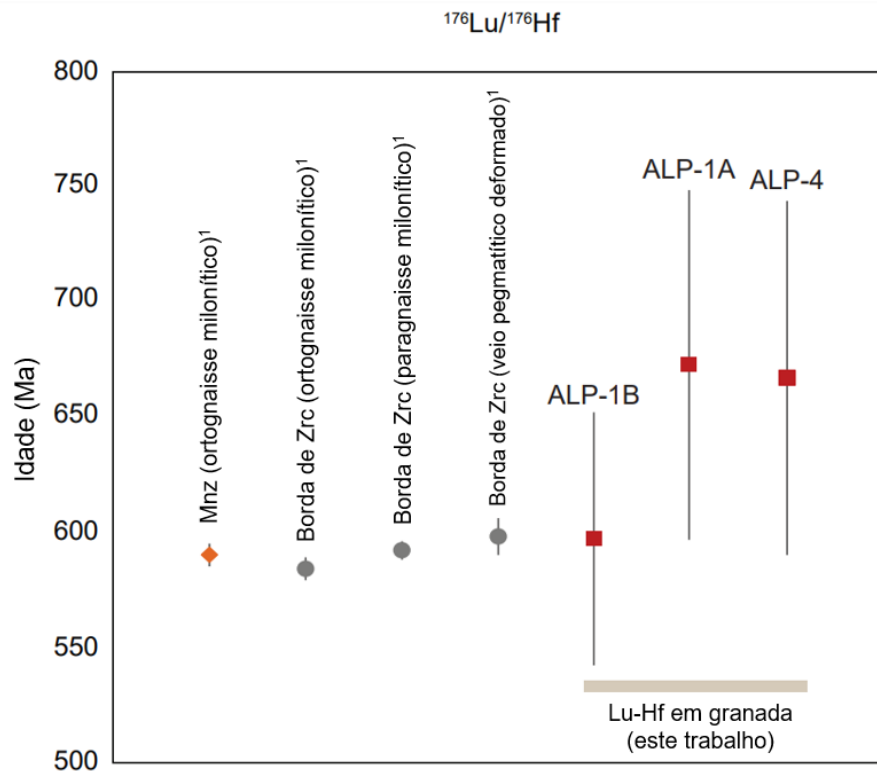


Figura 15. Idades observadas no presente estudo. <sup>1</sup>(Giraldo et al., 2019)

## 7. CONCLUSÕES

Os dados de P-T aferidos a partir das lâminas mostraram-se satisfatórios, apresentando resultados condizentes com a bibliografia para o pico metamórfico da região. O pico metamórfico está dentro do alcance das temperaturas de fechamento do sistema Lu-Hf em granadas estipuladas por Scherer et al. (2000), levantando a possibilidade de interferências por reabertura do sistema nas idades isocrômicas obtidas por LA-ICP-MS/MS.

A precisão das idades obtidas foi menor do que a esperada, mas ainda sim satisfatória para a assembleia mineral e as condições analíticas utilizadas. As idades das amostras ALP-01A e ALP-04 podem apontar para um evento metamórfico mais antigo do que as idades aceitas para a zona de cisalhamento, podendo representar um evento metamórfico anterior de alta temperatura, mas ainda não se exclui a possibilidade de interferência por reabertura do sistema Lu-Hf, visto que a temperatura de fechamento pode variar grandemente.

O presente trabalho originalmente visava ainda a análise de Sm-Nd, utilizando métodos de interpretação mais recentes dos dados de Lu-Hf associados a Sm-Nd para se obter idades de eventos posteriores à cristalização das granadas. Porém, devido a problemas logísticos foi decidido por deixar os materiais e resultados aqui apresentados disponíveis para um trabalho posterior de análise pelo método Sm-Nd, algo que será de suma importância para expandir o conhecimento geocronológico da zona de cisalhamento Além Paraíba.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, F. F. M. de, Hasui, Y., Carneiro C. D. R., 1975, Lineamento de Além-Paraíba: An. Acad. Bras. Ciênc. v. 47 p. 575.

Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., 1976, The upper precambrian of South America: Boletim IG, v. 7, p. 45-80.

Bento dos Santos, T. M., Munhá, J. M., Tassinari, C. C., Fonseca, P. E., & Neto, C. D., 2011, Metamorphic PT evolution of granulites in the central Ribeira Fold Belt, SE Brazil: Geosciences Journal, v. 15 no. 1, p. 27-51.

Campanha, G. A. C. 1981, O lineamento de Além Paraíba na área de Três Rios (RJ). [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, doi:10.11606/D.44.1981.tde-22082013-105555.

Cheng, H., Vervoort, J. D., Dragovic, B., Wilford, D., & Zhang, L., 2018, Coupled Lu–Hf and Sm–Nd geochronology on a single eclogitic garnet from the Huwan shear zone, China: Chemical Geology, v. 476, p. 208-222.

Cheng, H., 2018, Garnet Lu–Hf and Sm–Nd geochronology: a time capsule of the metamorphic evolution of orogenic belts: Geological Society, London, Special Publications, SP474.7. doi:10.1144/sp474.7

Cordani, U. G., Delhal, J., & Ledent, D., 1973, Orogeneses superposées dans le Précambrien du Brésil sud-oriental (États de Rio de Janeiro et de Minas Gerais): Revista Brasileira de Geociências, v. 3, no. 1, p. 1-22.

Dixon, D., McNair, A., Curran, S. C., 1954, LXXV. The natural radioactivity of lutetium: The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, v. 45(366), p. 683-694.

Duchêne, S., Blichert-Toft, J., Luais, B., Télouk, P., Lardeaux, J. M., & Albarède, F., 1997, The Lu–Hf dating of garnets and the ages of the Alpine high-pressure metamorphism: Nature, v. 387(6633), p. 586-589.

Egydio-Silva, M., Vauchez, A., Fossen, H., Cavalcante, G. C. G., & Xavier, B. C. 2018. Connecting the Araçuaí and Ribeira belts (SE–Brazil): Progressive transition from contractional

to transpressive strain regime during the Brasiliano orogeny: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 86, p. 127-139.

Egydio-Silva, M., Vauchez, A., Bascou, J., & Hippertt, J., 2002, High-temperature deformation in the Neoproterozoic transpressional Ribeira belt, southeast Brazil: *Tectonophysics*, v. 352, no. 1-2, p. 203-224.

Faure, G., Mensing, T.M., 2004, *The Lu-Hf Method in Isotopes: Principles and Applications* (third edition): Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., p. 284-297.

Fossen, H. (2016). *Structural geology*. Cambridge university press.

Giraldo, S. J., Trouw, R. A. J., Duffles, P., da Costa, R. V., Mejia, M. I., & Marimon, R. S., 2019, Structural analysis combined with new geothermobarometric and geochronological results of the Além Paraíba shear zone, between Três Rios and Bananal, Ribeira Orogen, SE Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 90, p. 118-136. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.11.018>

Griffin, W.L., Brueckner, H.K., 1980. Caledonian Sm–Nd ages and a crustal origin for Norwegian eclogites: *Nature*, v. 285, p. 319–321, <https://doi.org/10.1038/285319a0>

Heilbron, M., Ribeiro, A., Valeriano, C.M., Paciuлло, F.V., Almeida, J.C.H, Trouw, R.A.J., Tupinambá, M. Silva, L.G.E., 2017, The Ribeira Belt. *In* Heilbron, M., Cordani, U., Alkmim, F. (eds) São Francisco Craton, Eastern Brazil Regional Geology Reviews. Springer, p. 277-302.

Li, Y., Vermeesch, P., 2021. Inverse isochron regression for Re-Os, K-Ca and other chronometers: *Geochronology Preprint*. <https://doi.org/10.5194/gchron-2021-7>

Nebel, O., Morel, M.L.A., Vroon, P.Z., 2009. Isotope Dilution Determinations of Lu, Hf, Zr, Ta and W, and Hf Isotope Compositions of NIST SRM 610 and 612 Glass Wafers: *Geostand Geoanal Res*, v. 33, p. 487–499. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2009.00032.x>

Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woodhead, J., & Hergt, J., 2011, Lolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data: *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, v. 26(12), p. 2508-2518.

Pereira, R. M., Guimarães, P., 2012, A Faixa Khondalítica Marangatu e a descoberta de novas mineralizações de grafita no N-NW do Estado do Rio de Janeiro: *Geosciences= Geociências*, v. 31(2), p. 197-205.

Rosenblum, S., 1958, Magnetic susceptibilities of minerals in the Frantz isodynamic magnetic separator: *American Mineralogist*, v. 43, p. 170–173.

Scherer, E.E., Cameron, K.L., Blichert-Toft, J., 2000, Lu–Hf garnet geochronology: closure temperature relative to the Sm–Nd system and the effects of trace mineral inclusions: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 64, p. 3413–3432, [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00440-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00440-3)

Scherer, E.E., Munker, C., Mezger, K., 2001, Calibration of the lutetium-hafnium clock: *Science*, v. 293(5530), p. 683-687, doi:10.1126/science.1061372

Sguigna, A. P., Larabee, A. J., Waddington, J. C., 1982, The half-life of  $^{176}\text{Lu}$  by a  $\gamma$ – $\gamma$  coincidence measurement: *Canadian Journal of Physics*, v. 60(3), p. 361-364.

Shu, Q., Brey, G. P., Gerdes, A., & Hofer, H. E., 2014, Mantle eclogites and garnet pyroxenites—the meaning of two-point isochrons, Sm–Nd and Lu–Hf closure temperatures and the cooling of the subcratonic mantle: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 389, p. 143-154.

Simpson, A., Gilbert, S., Tamblin, R., Hand, M., Spandler, C., Gillespie, J., Nixon, A., Glorie, S., 2021. In-situ Lu Hf geochronology of garnet, apatite and xenotime by LA ICP MS/MS: *Chem Geol* v. 577, 120299. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120299>

Smit, M. A., Scherer, E. E., & Mezger, K., 2013, Lu–Hf and Sm–Nd garnet geochronology: chronometric closure and implications for dating petrological processes: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 381, p. 222-233.

Söderlund, U., Patchett, P.J., Vervoort, J.D., Isachsen, C.E., 2004. The  $^{176}\text{Lu}$  decay constant determined by Lu–Hf and U–Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions: *Earth Planet Sci Lett*, v. 219, p. 311–324. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(04)00012-3)

Van Breemen, O., Hawkesworth, C.J., 1980, Sm–Nd isotopic study of garnets and their metamorphic host rocks: *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, v. 71, p. 97–102, <https://doi.org/10.1017/S0263593300013535>

Vermeesch, P., 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology: *Geoscience Frontiers* v. 9, p. 1479–1493. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.04.001>

White, R. W., Powell, R., & Holland, T. J. B., 2008, Calculation of partial melting equilibria in the system Na<sub>2</sub>O–CaO–K<sub>2</sub>O–FeO–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O (NCKFMASH): *Journal of Metamorphic Geology*, v. 19(2), p. 139–153. doi:10.1046/j.0263-4929.2000.00303.x

Wingate, M.T.D., Kirkland, C.L., Johnson, S.P., 2011. 190667: granite pegmatite, Camel Hill; *Geochronology Record 1003*: Geological Survey of Western Australia, 6p.

Wingate, M.T.D., Lu, Y., Kirkland, C.L., Spaggiari, C.V., 2016. 182431: psammitic gneiss, Gwynne Creek; *Geochronology Record 1319*: Geological Survey of Western Australia, 6p.

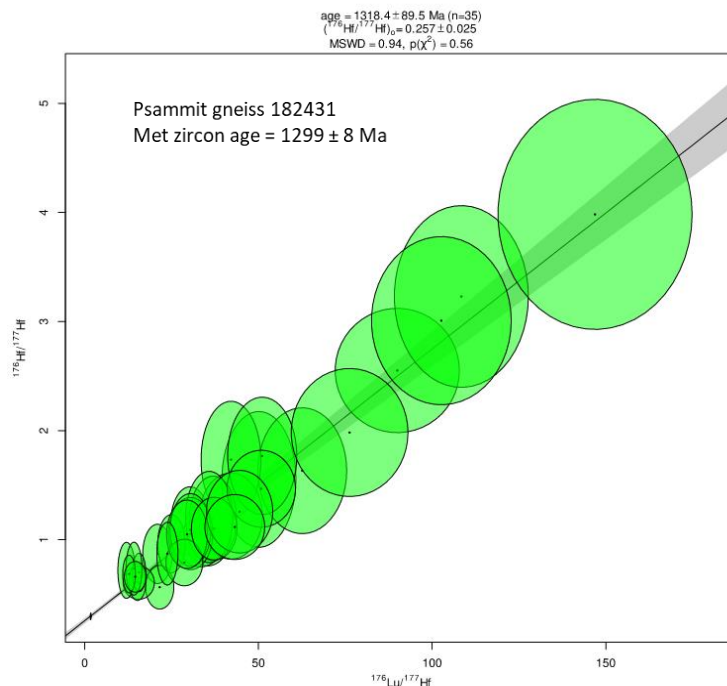


## 9. ANEXO

Samples	Isotopic ratios			
	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)
610-50 - 1.d	0,137891	0,000503	0,281957	0,001095
610-50 - 2.d	0,137956	0,000463	0,283348	0,001213
610-50 - 3.d	0,137895	0,000419	0,281462	0,001056
610-50 - 4.d	0,137731	0,000544	0,281575	0,001306
610-50 - 5.d	0,137987	0,000389	0,282340	0,001377
610-50 - 6.d	0,137801	0,000544	0,281381	0,001248
610-50 - 7.d	0,137946	0,000513	0,282608	0,001170
610-50 - 8.d	0,137790	0,000529	0,282578	0,001381
610-50 - 9.d	0,138123	0,000513	0,282324	0,001299
610-50 - 10.d	0,137657	0,000540	0,281466	0,001402
610-50 - 11.d	0,138068	0,000515	0,282865	0,001412
610-50 - 12.d	0,137741	0,000547	0,282133	0,001542
610-50 - 13.d	0,138009	0,000517	0,282490	0,001232
610-50 - 14.d	0,137829	0,000564	0,281221	0,001467
610-50 - 15.d	0,137958	0,000550	0,281795	0,001333
610-50 - 16.d	0,137811	0,000465	0,282329	0,001396
610-50 - 17.d	0,138026	0,000440	0,282439	0,001335
610-50 - 18.d	0,137756	0,000540	0,281415	0,001487
610-50 - 19.d	0,137911	0,000605	0,282359	0,001493
610-50 - 20.d	0,137930	0,000408	0,282852	0,001282
610-50 - 21.d	0,137880	0,000559	0,281728	0,001258
610-50 - 22.d	0,137870	0,000616	0,281513	0,001438
610-50 - 23.d	0,137933	0,000535	0,282617	0,001232
610-50 - 24.d	0,137893	0,000466	0,282467	0,001585
610-50 - 25.d	0,137855	0,000555	0,281601	0,001180
610-50 - 26.d	0,137950	0,000479	0,281975	0,001508
610-50 - 27.d	0,137989	0,000571	0,282827	0,001368
610-50 - 28.d	0,137535	0,000603	0,281561	0,001459
610-50 - 29.d	0,138138	0,000503	0,282198	0,001321
610-50 - 30.d	0,137811	0,000556	0,282200	0,001463

Samples	Isotopic ratios			
	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)
612-50 - 1.d	0,136118	0,001129	0,283136	0,004022
612-50 - 2.d	0,133651	0,001071	0,280296	0,004170
612-50 - 3.d	0,134487	0,001189	0,284311	0,003712
612-50 - 4.d	0,134040	0,001153	0,277830	0,004034
612-50 - 5.d	0,132282	0,001110	0,282449	0,004151
612-50 - 6.d	0,133844	0,001258	0,284477	0,004312
612-50 - 7.d	0,132696	0,001182	0,279218	0,004650
612-50 - 8.d	0,133747	0,001207	0,283889	0,003811
612-50 - 9.d	0,133045	0,001198	0,281490	0,004978
612-50 - 10.d	0,133609	0,001090	0,283478	0,004219
612-50 - 11.d	0,133407	0,001259	0,281475	0,004269
612-50 - 12.d	0,134210	0,001170	0,285225	0,004620
612-50 - 13.d	0,133553	0,001127	0,286502	0,004600
612-50 - 14.d	0,134803	0,001225	0,280816	0,004548
612-50 - 15.d	0,133341	0,001289	0,283289	0,004558
612-50 - 16.d	0,134925	0,001131	0,285498	0,004600
612-50 - 17.d	0,132897	0,001190	0,281870	0,004450
612-50 - 18.d	0,135375	0,001313	0,280663	0,003896
612-50 - 19.d	0,134161	0,001070	0,283949	0,004369
612-50 - 20.d	0,134775	0,001450	0,282175	0,004803
612-50 - 21.d	0,134881	0,001258	0,281286	0,004349
612-50 - 22.d	0,133257	0,001314	0,278571	0,004080
612-50 - 23.d	0,134313	0,001155	0,282062	0,004924
612-50 - 24.d	0,133547	0,001335	0,280197	0,004931
612-50 - 25.d	0,133874	0,001333	0,282376	0,004069
612-50 - 26.d	0,132473	0,001123	0,277933	0,004162
612-50 - 27.d	0,135609	0,001315	0,279932	0,004674
612-50 - 28.d	0,133993	0,001196	0,282434	0,004771
612-50 - 29.d	0,135959	0,001362	0,280509	0,004396
612-50 - 30.d	0,133631	0,001290	0,277990	0,004821

Samples	Isotopic ratios			
	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)
182431-gneiss - 1.d	20,959	3,423	0,869653	0,219
182431-gneiss - 2.d	35,445	5,431	1,067341	0,247
182431-gneiss - 3.d	50,154	8,572	1,552612	0,501
182431-gneiss - 4.d	30,326	4,413	1,168263	0,255
182431-gneiss - 5.d	33,311	5,107	0,971144	0,178
182431-gneiss - 6.d	62,629	10,285	1,632259	0,464
182431-gneiss - 7.d	89,976	14,381	2,551130	0,458
182431-gneiss - 8.d	21,593	3,270	0,564352	0,161
182431-gneiss - 9.d	108,418	15,520	3,229442	0,670
182431-gneiss - 10.d	42,114	6,939	1,734061	0,431
182431-gneiss - 11.d	42,121	7,274	1,216446	0,318
182431-gneiss - 12.d	146,897	22,481	3,982411	0,849
182431-gneiss - 13.d	36,957	5,416	1,195334	0,312
182431-gneiss - 14.d	24,934	3,162	0,962637	0,215
182431-gneiss - 15.d	15,541	3,627	0,605783	0,123
182431-gneiss - 16.d	51,092	8,011	1,768106	0,434
182431-gneiss - 17.d	35,846	5,469	1,207839	0,337
182431-gneiss - 18.d	30,487	5,125	1,055565	0,267
182431-gneiss - 19.d	30,440	4,713	1,089291	0,268
182431-gneiss - 20.d	28,685	4,266	0,790745	0,172
182431-gneiss - 21.d	50,829	7,926	1,467064	0,284
182431-gneiss - 22.d	12,017	1,989	0,718884	0,207
182431-gneiss - 23.d	15,186	1,961	0,612345	0,136
182431-gneiss - 24.d	29,467	4,743	1,048886	0,253
182431-gneiss - 25.d	23,797	2,452	0,872227	0,232
182431-gneiss - 26.d	102,665	16,182	3,007743	0,620
182431-gneiss - 27.d	37,281	5,284	1,101591	0,231
182431-gneiss - 28.d	1,734	0,083	0,297086	0,025
182431-gneiss - 29.d	44,598	7,678	1,256869	0,305
182431-gneiss - 30.d	15,662	1,545	0,700061	0,142
182431-gneiss - 31.d	76,250	13,519	1,982570	0,472
182431-gneiss - 32.d	14,179	1,845	0,734752	0,195
182431-gneiss - 33.d	12,773	1,476	0,685523	0,139
182431-gneiss - 34.d	43,211	6,930	1,116334	0,239
182431-gneiss - 35.d	14,557	2,541	0,660100	0,113



Samples	Isotopic ratios				rho
	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (2SE, int)	
190667-peg - 1.d	7,446	0,595	0,495093	0,082	1,00
190667-peg - 2.d	5,998	0,445	0,427479	0,068	0,97
190667-peg - 3.d	8,760	0,903	0,473785	0,077	0,93
190667-peg - 4.d	20,580	1,660	0,623463	0,081	1,00
190667-peg - 5.d	21,271	1,160	0,658907	0,076	0,87
190667-peg - 6.d	18,588	1,289	0,631101	0,079	1,00
190667-peg - 7.d	0,210	0,012	0,283910	0,031	0,19
190667-peg - 8.d	13,418	1,429	0,649086	0,111	
190667-peg - 9.d	28,265	3,035	0,867681	0,157	1,00
190667-peg - 10.d	21,826	2,329	0,804484	0,119	1,00
190667-peg - 11.d	9,411	0,813	0,556663	0,097	0,96
190667-peg - 12.d	7,152	0,713	0,423029	0,085	0,94
190667-peg - 13.d	31,808	2,589	0,938882	0,107	0,91
190667-peg - 14.d	0,243	0,010	0,288291	0,025	0,94
190667-peg - 15.d	0,530	0,025	0,284455	0,027	0,91
190667-peg - 16.d	0,263	0,012	0,296409	0,027	0,86
190667-peg - 17.d	17,985	1,514	0,653927	0,110	1,00
190667-peg - 18.d	26,023	2,601	0,699752	0,124	1,00
190667-peg - 19.d	27,281	2,298	0,838123	0,099	0,99
190667-peg - 20.d	18,462	1,467	0,563678	0,078	1,00
190667-peg - 21.d	17,853	1,493	0,604104	0,075	0,54
190667-peg - 22.d	17,741	1,069	0,612134	0,064	0,91
190667-peg - 23.d	17,783	1,381	0,603449	0,083	0,87
190667-peg - 24.d	20,733	1,427	0,684789	0,097	1,00
190667-peg - 25.d	20,665	1,681	0,607593	0,065	0,67
190667-peg - 26.d	27,812	2,389	0,764514	0,094	0,87
190667-peg - 27.d	22,560	2,127	0,636247	0,084	0,94
190667-peg - 28.d	19,257	1,600	0,656583	0,095	0,93
190667-peg - 29.d	15,363	1,235	0,620963	0,083	1,00
190667-peg - 30.d	29,110	3,110	0,898867	0,137	0,88
190667-peg - 31.d	0,207	0,015	0,281955	0,032	0,89
190667-peg - 32.d	0,200	0,011	0,310372	0,034	0,96
190667-peg - 33.d	0,543	0,028	0,303419	0,030	0,85
190667-peg - 34.d	0,370	0,015	0,295781	0,027	0,25
190667-peg - 35.d	0,764	0,054	0,289320	0,039	0,98
190667-peg - 36.d	2,584	0,137	0,329980	0,038	0,90
190667-peg - 37.d	0,792	0,032	0,309344	0,031	0,96
190667-peg - 38.d	4,390	0,274	0,341050	0,055	0,97
190667-peg - 39.d	0,463	0,014	0,295481	0,020	0,86
190667-peg - 40.d	4,112	0,429	0,343604	0,067	0,96

