



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JULIO DE MESQUITA FILHO"  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



**Trabalho de Formatura**

**Curso de Graduação em Geologia**

DATAÇÃO POR U-Pb EM RUTILOS DE ROCHAS DE  
METAMORFISMO DE ALTA PRESSÃO DO GRUPO ARAXÁ  
NA REGIÃO DE SÃO SEBASTIÃO DO PARAÍSO - MG

Mariana Diniz Silvestre

Prof. Dr. George Luiz Luvizotto

Rio Claro (SP)

2013

550 Silvestre, Mariana Diniz  
S587d Datação por U-Pb em rutilos de rochas de metamorfismo  
de alta pressão do Grupo Araxá na região de São Sebastião do  
Paraíso - MG / Mariana Diniz Silvestre. - Rio Claro, 2013  
64 f. : il., figs., gráfs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade  
Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: George Luiz Luvizotto

1. Geologia. 2. Datação in situ. 3. Rutilo. 4. Granulito. 5.  
Nappe de Passos. I. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

MARIANA DINIZ SILVESTRE

DATAÇÃO POR U-Pb EM RUTILOS DE ROCHAS DE  
METAMORFISMO DE ALTA PRESSÃO DO GRUPO ARAXÁ  
NA REGIÃO DE SÃO SEBASTIÃO DO PARAÍSO - MG

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Geólogo.

Rio Claro – SP

2013

*Aos meus pais e irmã!*

## AGRADECIMENTOS

Vou ser simples e sucinta nos agradecimentos, por que sei que de qualquer maneira irei esquecer de várias pessoas.

Agradeço primeiramente aos meus pais e à minha irmã pelo incentivo e amor dedicado todos estes anos.

Agradeço também a uma pessoa muito especial, o Zeh, meu melhor amigo e um companheiro incrível. Obrigada pela ajuda e força.

As minhas amigas, Mi, Biana, Cá, Manguinha, Camis, Lili, Thatá e Má pela amizade, conversas, ajudas, festas e muitos mais coisas que passamos nesse tempo.

Não posso esquecer da minha turma Geovárzea pelos vários momentos felizes que partilhei ao lado de vocês. Agradeço também a turma de 2009 pelo acolhimento nesse último semestre.

Ao meu orientador, George, por principalmente me fazer perceber o quanto a relação orientador/aluno pode ser agradável. Obrigada pelo conhecimento, amizade e desculpe pelas dores de cabeça.

Não posso deixar de agradecer também ao professor Peter Hackspacher por te me proporcionado um intercâmbio tão sonhado.

Ao Seu Antonio, à Dona Leonil e à Bruna, por me ajudarem inicialmente no intercâmbio, e pelo carinho que sempre tiveram por mim.

Ao “Die Fantastischen Sieben“ agradeço também por serem pessoas especiais que foram a minha família por um ano, e fizeram parte de um momento único na minha vida.

Ao Professor Thomas Zack por aceitar a parceria no estudo e se disponibilizar a fazer as análises das amostras na Universidade de Gothenburg – Suécia, e também a todos os funcionários da Universidade de Heidelberg, principalmente o Professor Hans-Peter Meyer por ajudar e autorizar o uso dos laboratórios de laminação, preparação das amostras e de análises no MEV.

A todos os funcionários (principalmente Suzi e Neuzinha) e professores da Unesp que fizeram parte do meu crescimento pessoal e profissional.

E por fim a Deus, que me acompanhou em toda essa trajetória.

Se esqueci de alguém, me desculpe!

*“It is not the strongest or the most intelligent who will survive  
but those who can best manage change.”*

*(Charles Darwin)*

## RESUMO

Apesar de vários estudos do Grupo Araxá na região de Passos, pouco se sabe sobre a idade do metamorfismo das rochas presentes nesse grupo, portanto com esse trabalho busca-se a determinação das idades de resfriamento dessas rochas através da datação *in situ* por U-Pb em rutilos.

O interessante na região de São Sebastião do Paraíso é que esta apresenta de maneira condensada toda a coluna litoestratigráfica da Nappe de Passos, além de expor as rochas de mais alto grau metamórfico já descritas na área. Este fato pode facilitar na caracterização da evolução metamórfica e estrutural do Grupo Araxá no sul do Estado de Minas Gerais.

A escolha do geocronômetro rutilo, se deve à sua facilidade de incorporação de U em sua estrutura, facilitando o cálculo da sua idade através da razão isotópica de U-Pb. Além disso, a utilização da técnica de datação *in situ* com o *Laser Ablation* vem se mostrando um estudo confiável e vantajoso pelo fato da análise ser pontual, não destruindo assim, toda a amostra a ser analisada.

As análises desse trabalho foram realizadas na Universidade de Gothenburg – Suécia e obteve-se idades por  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  entre 608 - 566 ± 10 Ma e  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  entre 627 - 572 ± 10 Ma, idades estas concordantes com às da literatura na área, sendo interpretadas como a idade de resfriamento do metamorfismo.

**Palavras-chave:** Datação *in situ*. Rutilo. Granulito. Nappe de Passos.

## ABSTRACT

Although several studies of Araxá Group in the region of Passos, just a few works deal with the age of metamorphism of this group. The current work aims to determine the cooling age of these rocks by in situ U-Pb dating in rutiles.

Interestingly, the region of São Sebastião do Paraíso shows a condensed lithostratigraphic column from the Passos Nappe and exposes the higher metamorphic grade rocks described for this unit.

The use of rutile as a geochronometer is based on its ability to incorporate U in its structure, facilitating the calculation of the age of the isotope ratio by U-Pb. Furthermore, the use of in situ dating technique with Laser Ablation has been a reliable and advantageous study because the analysis are punctual, and do not destroy the whole sample to be analyzed.

The analyses of this work were made at the University of Gothenburg - Sweden and obtained  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  ages between  $608\text{-}566 \pm 10$  Ma and  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  between  $627\text{-}572 \pm 10$  Ma, showing that these ages are concordant with the literature in the area and are interpreted as the cooling age of metamorphism.

**Keywords:** *In situ* dating. Rutile. Granulite. Passos Nappe.

## **LISTA DE ANEXOS**

- **Anexo I** – Mapa Geológico 1:50 000 com localização e idades das amostras.
- **Anexo II** - Tabela Descritiva da análise dos rutilos em cada amostra.
- **Anexo III** – Descrição petrográfica das amostras.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Localização da área de estudo e principais vias de acesso.....	15
<b>Figura 2</b> - Esquema ilustrando um funcionamento e os principais componentes do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	19
<b>Figura 3</b> - Imagem ilustrando espectro de Raio X de um grão de rutilo e o ambiente de trabalho do <i>software</i> INCA. ....	20
<b>Figura 4</b> - Fluxograma das Etapas de Trabalho.....	21
<b>Figura 5</b> - Em (A) imagem em MEV com os rutilos em detalhe; em (B) imagem scaneada da lâmina com a localização dos rutilos. ....	22
<b>Figura 6</b> - Curva de Wetherill, conhecido também como o Diagrama da Concórdia para o decaimento U/Pb.....	26
<b>Figura 7</b> - Esquema de um ICP-MS. ....	27
<b>Figura 8</b> - Tocha acoplada ao gerador de rádio frequência. O campo magnético oscilante que sustenta o plasma é gerado pela corrente que passa através do laser. ....	28
<b>Figura 9</b> - Gráfico mostrando intensidade de sinal para uma típica análise de Rt com LA-ICP-MS...	29
<b>Figura 10</b> - Esboço tectônico do Brasil central, com destaque para a Província Tocantins.....	30
<b>Figura 11</b> - Faixa Brasília compartimentada em 3 domínios tectônicos. ....	33
<b>Figura 12</b> - Coluna Estratigráfica do Grupo Araxá na Nappe de Passos. ....	36
<b>Figura 13</b> - Mapa Geológico simplificado da Nappe de Passos, apresentando detalhe da área de estudo. ....	38
<b>Figura 14</b> - Figura ilustrando texturas em corona (plagioclásio e anfibólio desenvolvidos ao redor de granada) e simplectítica (intercrescimento Cpx2 e plagioclásio) presente nos retroeclogitos. ....	42
<b>Figura 15</b> - Trajetória de pressão e temperatura para o retroeclogito. ....	43
<b>Figura 16</b> - Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) da amostra SSP-DH-12A1.....	44
<b>Figura 17</b> - Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) da amostra MG-161.....	45
<b>Figura 18</b> - Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) da amostra SSP-DH-10A2.....	46
<b>Figura 19</b> - Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) da amostra Olaria 2. ....	48
<b>Figura 20</b> - Gráficos de intensidades que mostram os sinais obtidos para o background e o pico ( <i>time-resolved signal</i> ). ....	49
<b>Figura 21</b> - Sumário de idades das amostras analisadas e seus respectivos erros. ....	52
<b>Figura 22</b> - Sumário de idades da amostra Olaria 2 e seus respectivos erros.....	53
<b>Figura 23</b> - Diagrama da Concórdia para o padrão R-10. ....	54
<b>Figura 24</b> - Diagrama da Concórdia para a amostra SSP-DH-12A1.....	55
<b>Figura 25</b> - Diagrama da Concórdia para a amostra MG-161.....	55
<b>Figura 26</b> - Diagrama da Concórdia para a amostra SSP-DH-10A2.....	56
<b>Figura 27</b> - Exemplos de 2 análises da amostra Olaria 2 com forte instabilidade do sinal.....	57
<b>Figura 28</b> - Gráfico de <i>Tera-Wasserburg</i> para a amostra Olaria 2.....	58

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Localização e tipo de rocha das amostras estudadas. ....	17
<b>Tabela 2</b> - Relação das amostras com suas quantidades de rutilos a serem analisados.....	23
<b>Tabela 3</b> - Dados isotópicos e respectivas idades obtidas para as amostras analisadas. ....	50

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	14
<b>3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA</b> .....	15
<b>4 MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO</b> .....	16
<b>4.1 Etapas Pré-Monografia</b> .....	16
4.1.1 <i>TRABALHOS DE CAMPO</i> .....	16
4.1.2 <i>ANÁLISE PETROGRÁFICA</i> .....	16
4.1.4 <i>PREPARAÇÃO PARA A ANÁLISE IN SITU</i> .....	17
<b>4.2 Etapas para o desenvolvimento da monografia</b> .....	20
4.2.1 <i>LEVANTAMENTO DE DADOS ESPECÍFICOS</i> .....	21
4.2.2 <i>SELEÇÃO DE GRÃOS PARA O LA-ICP-MS</i> .....	22
4.2.3 <i>ANÁLISE DOS GRÃOS PARA O LA-ICP-MS</i> .....	23
4.2.4 <i>TRATAMENTO, INTEGRAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS ESPECÍFICOS</i> .....	29
<b>5 GEOLOGIA REGIONAL</b> .....	30
<b>5.2 Principais Unidades Regionais da Área de Estudo</b> .....	34
5.2.1 <i>COMPLEXO BARBACENA</i> .....	34
5.2.2 <i>GRUPO BAMBUÍ</i> .....	34
5.2.3 <i>GRUPO ARAXÁ</i> .....	35
<b>5.3 Geocronologia</b> .....	39
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	41
<b>7 CONCLUSÕES</b> .....	59
<b>8 BIBLIOGRAFIA</b> .....	61

## 1 INTRODUÇÃO

A presente monografia visa apresentar os resultados obtidos pela aluna durante o desenvolvimento do projeto de Trabalho de Conclusão de Curso, focado na datação de rochas do Grupo Araxá que compõe a Nappe de Passos, na região de São Sebastião do Paraíso, Minas Gerais. Esta região é interessante do ponto de vista geológico por representar de maneira condensada toda a coluna litoestratigráfica da Nappe de Passos, facilitando, por exemplo, a caracterização da evolução metamórfica e estrutural do Grupo Araxá no sul do Estado de Minas Gerais.

A área de estudo apresenta a exposição das rochas de mais alto grau metamórfico já descritas para a Nappe de Passos (LUVIZOTTO, 2003 e LUVIZOTTO *et al.*, 2011) que ocorrem no topo da sequência, já que o gradiente metamórfico é invertido.

Estudos recentes têm abordado o metamorfismo e a idade de granulitos de alta pressão na região de Andrelândia, sudeste da área de estudo deste trabalho (CAMPOS NETO *et al.*, 2005 e RENO *et al.*, 2011). Diferentes trabalhos (VALERIANO *et al.*, 1989, SIMÕES, 1995, LUVIZOTTO, 2003 e CAMPOS NETO *et al.*, 2005) discutem a possibilidade de correlação destas rochas com as rochas da Nappe de Passos. Portanto, determinar a idade das rochas da Nappe de Passos na região de São Sebastião do Paraíso é de fundamental importância para discutir-se esta correlação. As rochas félsicas estudadas no presente trabalho apresentam a paragênese cianita + feldspato potássico. A ocorrência destes minerais em equilíbrio indica que os mesmos foram formados a partir de reações de desidratação e fusão parcial, com consumo de fases minerais hidratadas, por exemplo micas. Muitos autores consideram a paragênese presente nas rochas estudadas como indicativa de fácies granulito. Todavia, Pattison *et al.* (2003) discutem que, quando comparada com a entrada de ortopiroxênio em rochas metabásicas, a definição do início da fácies granulito em rochas pelíticas com base na paragênese cianita + feldspato potássico pode estar superestimada, ocorrendo cerca de 100°C antes da entrada do ortopiroxênio em composições básicas. Contudo, dados preliminares de Zr em rutilo, juntamente com dados termobaométricos apresentados na literatura (p. ex., SIMÕES 1995, e LUVIZOTTO 2003) sugerem que as rochas estudadas foram metamorfisadas em temperaturas na casa dos 800 a 850°C. Portanto, será utilizado ao longo do texto o termo granulito para as rochas de mais alto grau da Nappe de Passos na região de São Sebastião do Paraíso.

O interesse no estudo de minerais acessórios está ganhando destaque visto às vantagens obtidas no campo da geoquímica. Percebeu-se ao longo de diversos estudos que

alguns destes minerais conseguem espelhar a composição química (isotópica) de determinados elementos da rocha. O rutilo, por exemplo, carrega quase todo o Nb e o Ta (elementos HFSE, em geral) da rocha (ZACK *et al.*, 2002). Portanto, analisando estes minerais é possível acessar a composição química destes elementos na rocha. Pelo fato dos minerais acessórios em geral carregarem elementos incompatíveis e de baixa mobilidade química, como Nb, Ti, Zr, Ta no caso do rutilo, não há o reequilíbrio desses minerais após um pico de metamorfismo já que poucos ou nenhum mineral competem por estes elementos. Em outras palavras, eles conseguem preservar a sua composição inicial. Tal característica, somada ao fato da incorporação do Zr no rutilo ser dependente da temperatura, torna o geotermômetro Zr-in-Rt (ZACK *et al.*, 2004 e TOMKINS *et al.*, 2007) extremamente atrativo para o cálculo do pico metamórfico, especialmente em áreas de alto grau onde equilíbrios pós-pico metamórfico alteram substancialmente a relação Fe/Mg dos minerais usualmente empregados nos cálculos termométricos (ver, por exemplo, PATTISON *et al.*, 2003). Exemplos de minerais acessórios estudados em artigos recentes são o zircão, monazita, titanita e rutilo.

O rutilo também pode ser empregado em estudos de proveniência de sedimentos e sua utilização deve-se a sua resistência à alteração e as características geoquímicas citadas anteriormente. Um exemplo dessas características quando comparado ao zircão, também um mineral acessório de uma variada gama de rochas e também utilizado para fins semelhantes, é que o rutilo é capaz de fornecer informações do último ciclo metamórfico (idade e composição química), visto que ele não é estável em condições de fácies xisto verde (ZACK, *et al.*, 2004). O fato do rutilo preservar informações sobre o último ciclo metamórfico é também relevante para o presente trabalho.

Portanto, o presente estudo visa à utilização do rutilo como um geocronômetro devido à sua facilidade de incorporação de U em sua estrutura, facilitando o cálculo da sua idade através da razão isotópica de U-Pb (NOCE *et al.*, 1998). Essa facilidade se deve a posição de ligação entre ânions e cátions, sendo este último proporcionalmente maior, e minerais como o rutilo, têm facilidade para incorporar o U em sua estrutura durante o seu processo de crescimento (MEZGER *et al.*, 1989).

O método de datação do rutilo com o LA-ICP-MS, se dá por amostras de rochas em lâminas com uma espessura de aproximadamente 50  $\mu\text{m}$  que permite uma análise textural com microscópio de luz polarizada, e ainda admite a ablação por um *laser* no mineral (ZACK *et al.*, 2011). Os grãos de rutilos a serem analisados necessitam ter um tamanho maior que 25 $\mu\text{m}$ , visto que o *laser* que vai incidir no grão tem um feixe de luz próximo a 20  $\mu\text{m}$  podendo chegar a 60  $\mu\text{m}$ .

O laser produz, apenas no grão analisado, uma cratera de ablação, evitando assim a destruição de outros grãos ao entorno. Na célula, como é chamado o suporte da amostra, o gás hélio funciona como fluido carregador, que transporta o aerosol produzido pela ablação para o ICP-MS, onde é quantificada a razão de U-Pb (ZACK *et al.*, 2011).

Paralelamente a esse trabalho, outro Trabalho de Conclusão de Curso está sendo realizado pelo aluno Daniel Marinzek de Souza, com as mesmas amostras, a fim de se obter os dados de temperatura, por meio do geotermômetro Zr-*in*-Rt desses rutilos.

## 2 OBJETIVOS

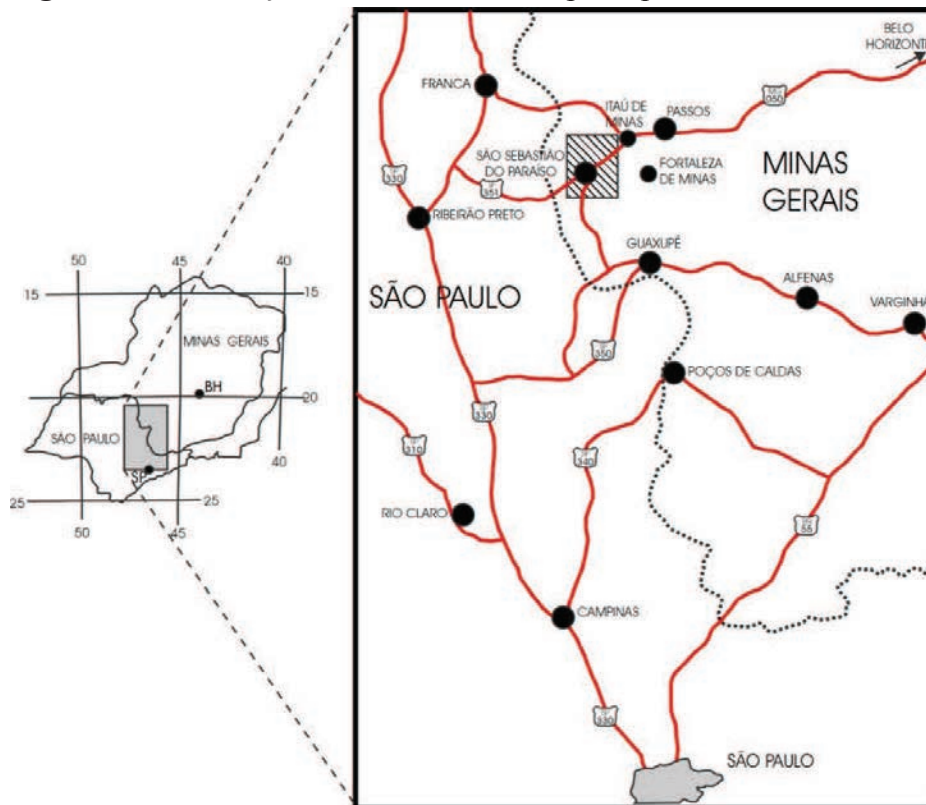
O presente trabalho tem por objetivo a datação das rochas de mais alto grau metamórfico do Grupo Araxá na região de São Sebastião do Paraíso, através do método de datação U-Pb em rutilos, utilizando-se a técnica *in situ* LA-ICP-MS.

### 3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo localiza-se no sudoeste do estado de Minas Gerais, entre as latitudes  $21^{\circ}00'$  e  $20^{\circ}45'$  e as longitudes  $46^{\circ}45'$  e  $47^{\circ}00'$ . O acesso à área pode ser feito pela rodovia SP-330, seguindo-se até Ribeirão Preto, onde chega-se a rodovia SP-351 / MG-050 que liga a região nordeste do estado de São Paulo a Belo Horizonte, passando por São Sebastião do Paraíso e Passos.

A Figura 1 representa a localização geral da área no estado de Minas Gerais com suas respectivas latitudes e longitudes, e em destaque no quadro maior, as principais rodovias que dão acesso à área representada pelo retângulo listrado.

**Figura 1** - Localização da área de estudo e principais vias de acesso.



Fonte: Extraído de Luvizotto, 2003.

## 4 MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO

Este trabalho visa dar continuidade aos outros trabalhos desenvolvidos na área de estudo, e por isso utilizar-se-á de produtos gerados em pesquisas anteriores. Admitindo essa observação, foi realizada para o melhor entendimento deste projeto, a divisão dos métodos em duas fases: Etapas pré-monografia e Etapas para o desenvolvimento da monografia que serão descritas a seguir.

### 4.1 Etapas Pré-Monografia

Como citado anteriormente, as etapas que antecederam a monografia visaram trabalhos realizados na área de estudo e são importantes suas descrições para o entendimento básico das etapas desenvolvidas por essa monografia. Essas etapas consistiram em processos fundamentais de uma pesquisa de cunho geológico como reconhecimento de campo, coleta e tratamento de amostras e confecção de lâminas.

#### 4.1.1 *TRABALHOS DE CAMPO*

As amostras para o este trabalho foram adquiridas principalmente durante a dissertação de mestrado de Luvizotto (2003), e através de uma atividade de campo adicional em 2011 para a coleta de amostras de rochas de mais alto grau metamórfico aflorantes logo abaixo do contato entre a Bacia do Paraná e as Rochas do Grupo Araxá, próximo a Cidade de São Sebastião do Paraíso.

No primeiro trabalho de campo realizado em 2003, foram coletadas 103 amostras das quais 18 foram laminadas. No campo adicional realizado em 2011, foram confeccionadas 6 lâminas referentes a uma coleta de 28 amostras.

#### 4.1.2 *ANÁLISE PETROGRÁFICA*

Os trabalhos de petrografia visaram a caracterização dos diferentes tipos de rochas e paragênese metamórfica para a melhor compreensão das amostras. Essas análises foram realizadas no laboratório de microscopia do Departamento de Petrologia e Metalogenia da Unesp - Rio Claro. Para a documentação dos trabalhos (fotomicrografia) utilizou-se câmera digital acoplada aos microscópios.

#### 4.1.3 SELEÇÃO DAS AMOSTRAS

A partir da descrição petrográfica das amostras da área de estudo, realizou-se então uma seleção de amostras focando o interesse do atual trabalho, ou seja, foram selecionadas apenas as amostras que contém rutilo e apresentam paragênese que indica alto grau metamórfico para a futura análise.

Considerando essas características para a seleção das amostras, decidiu-se pela utilização de cinco amostras para o presente trabalho, por serem as mais representativas em função da área, e por apresentarem propriedades em potencial para o estudo. São as amostras: MG-161, Olaria-2, SSP-DH-9A1, SSP-DH-10A2 e SSP-DH-12A2. Abaixo, a tabela 1 apresenta o tipo de rocha e a localização das amostras.

**Tabela 1** - Localização e tipo de rocha das amostras estudadas.

AMOSTRA	COORDENADA	ROCHA
MG-161	300682 / 769272	Biotita-granada gnaiss
Olaria 2	301204 / 769784	Retroeclogito
SSP-DH-9A1	297326 / 7689879	Cianita-biotita-granada gnaiss
SSP-DH-10A2	297791 / 7693003	Biotita-granada gnaiss
SSP-DH-12A1	297374 / 7692826	Biotita-granada gnaiss

Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.1.4 PREPARAÇÃO PARA A ANÁLISE IN SITU

Com a definição das amostras a serem estudadas, foi realizado um preparo prévio para otimização da análise dos grãos de rutilo, focando a técnica *in situ* que é uma análise guiada pela textura metamórfica das rochas e estruturação interna dos grãos. Para essa técnica, é necessária a identificação dos minerais de interesse na lâmina, nesse caso o rutilo.

O primeiro passo para essa identificação, foi a obtenção da imagem completa das lâminas. Para isso, as lâminas foram scaneadas em um aparelho de *scanner* convencional para a reprodução de uma imagem (imagem A4), 42 vezes maior que o tamanho original da lâmina. Com a imagem, e com o auxílio do microscópio petrográfico, foi feita a identificação dos rutilos e posterior marcação da localização dos mesmos na imagem impressa. Cada grão recebeu um código que inclui a letra R seguida de um número (por exemplo: R1, R2, R3). Neste procedimento de seleção prévia foram selecionados cerca de 20 a 30 grãos por lâmina.

Com a identificação dos rutilos uma etapa seguinte foi realizada para a obtenção de novas imagens de alta resolução do mineral a partir do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

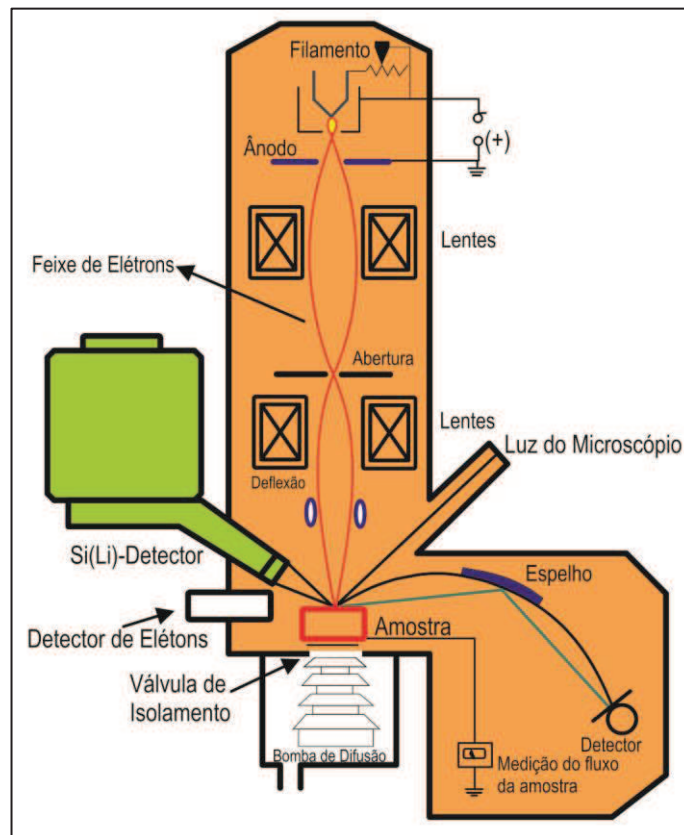
#### *4.1.4.1 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)*

O processo de seleção e imageamento dos rutilos, incluindo-se a etapa anterior é de fundamental importância para o presente projeto, bem como para o projeto do aluno Daniel Marinzek de Souza, que visa o cálculo da temperatura de metamorfismo das mesmas amostras utilizadas neste trabalho. O imageamento das amostras com o MEV foi realizado pelo aluno Daniel Marinzek de Souza, junto a Universidade de Heidelberg na Alemanha. Ambos os alunos participaram de intercâmbio junto a Universidade de Heidelberg e tiveram a oportunidade de cursar disciplina sobre a operação do equipamento. A interpretação e manipulação dos dados (imagens e dados químicos / EDS) foram realizadas em conjunto com o orientador e ambos os alunos.

O princípio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para interagir com os elétrons da superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente (KESTENBACH, 1994).

A Figura 2 apresenta de maneira esquemática um microscópio eletrônico de varredura.

**Figura 2** - Esquema ilustrando um funcionamento e os principais componentes do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



Fonte: Adaptado de Hans-Peter Meyer (material de aula), 2012.

De acordo com a natureza das amostras estudadas, é necessária metalização, adicionando-se à amostra uma cobertura eletricamente condutiva. Esse caso se aplica para amostras sólidas, não condutivas. A metalização é feita de forma a ser uma cobertura ultrafina (aprox.  $1\mu\text{m}$ ) de material eletricamente condutivo que é depositado pelo método de evaporação de alto vácuo, e essa cobertura pode ser principalmente de ouro, platina, tungstênio ou carbono. Nas amostras estudadas utilizou-se carbono.

Além de fornecer uma superfície eletricamente condutiva para a amostra, a metalização também é realizada para prevenir a acumulação de campos elétricos estáticos na amostra devido irradiação elétrica durante a produção da imagem, e ainda para melhorar em algumas situações, o contraste da imagem.

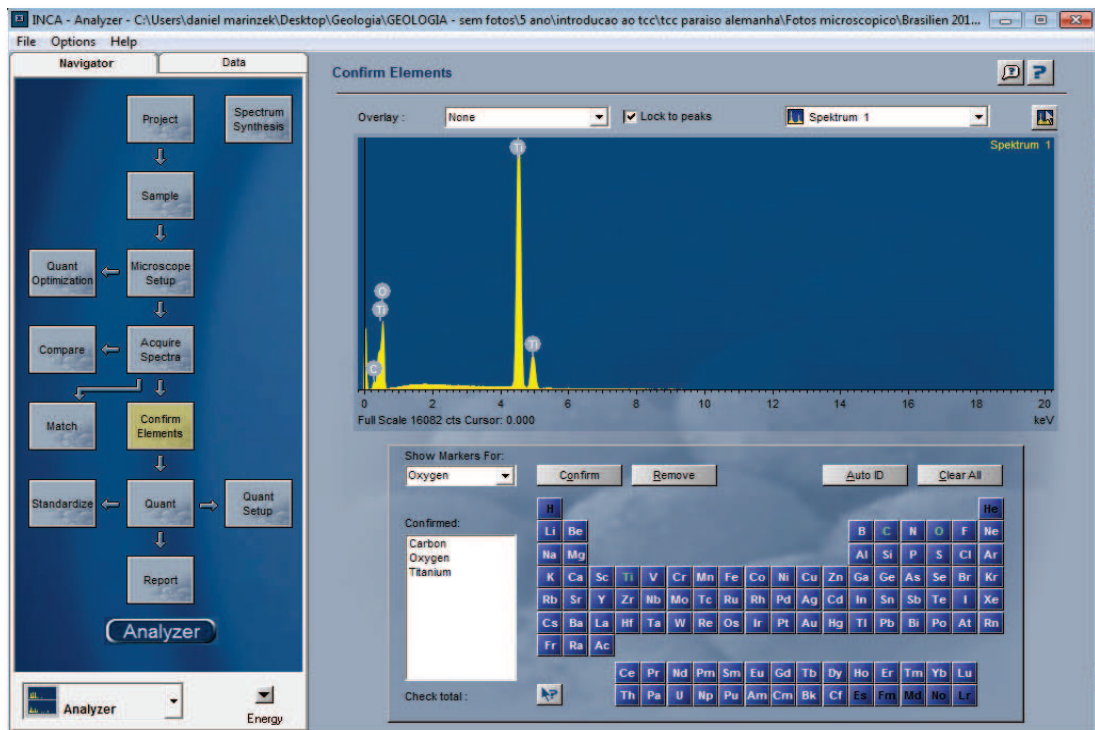
Para o trabalho em questão, as amostras selecionadas foram metalizadas com carbono e o detector utilizado no MEV foi o BSE (*Backscattering Electron*) que se refere à detecção pelos elétrons retroespalhados.

Os elétrons retroespalhados, são aqueles que sofreram espelhamento elástico. Os elétrons retroespalhados de alta energia, por serem resultantes de uma simples colisão

elástica, provêm de camadas mais superficiais da amostra. A imagem gerada por esses elétrons fornece diferentes informações em relação ao contraste que apresentam: além de uma imagem topográfica (contraste em função do relevo) também obtêm-se uma imagem de composição (contraste em função do número atômico dos elementos presentes na amostra).

Para a confirmação da ocorrência de rutilo nas amostras, alguns grãos foram analisados com o auxílio de um detector EDS (*Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy*) acoplado ao MEV. Para tal, utilizou-se o *software* INCA (Figura 3).

**Figura 3** - Imagem ilustrando espectro de Raio X de um grão de rutilo e o ambiente de trabalho do *software* INCA.

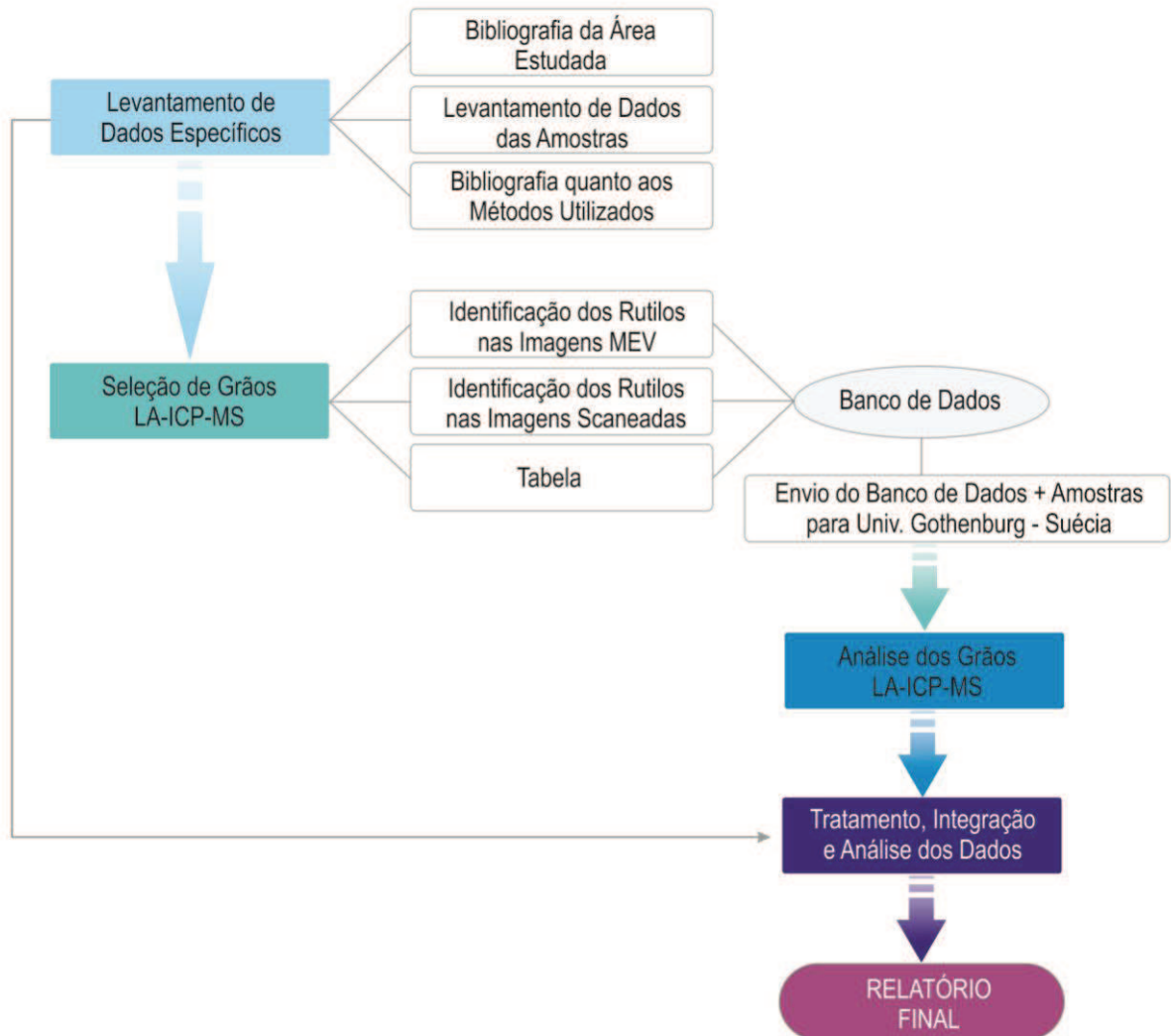


Fonte: Da autora.

## 4.2 Etapas para o desenvolvimento da monografia

As atividades específicas do presente trabalho foram divididas em 5 etapas que fazem parte dos 5 meses finais do trabalho em questão. As etapas principais estão indicadas no fluxograma abaixo (Figura 4).

**Figura 4 - Fluxograma das Etapas de Trabalho.**



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.2.1 LEVANTAMENTO DE DADOS ESPECÍFICOS

Esta etapa visou seleção bibliográfica existente na área como, por exemplo, geologia da região da Nappe de Passos, datações existentes e também bibliografia relacionada aos métodos propostos por esse trabalho como a técnica *in situ* para datação e a utilização do espectrômetro de massa.

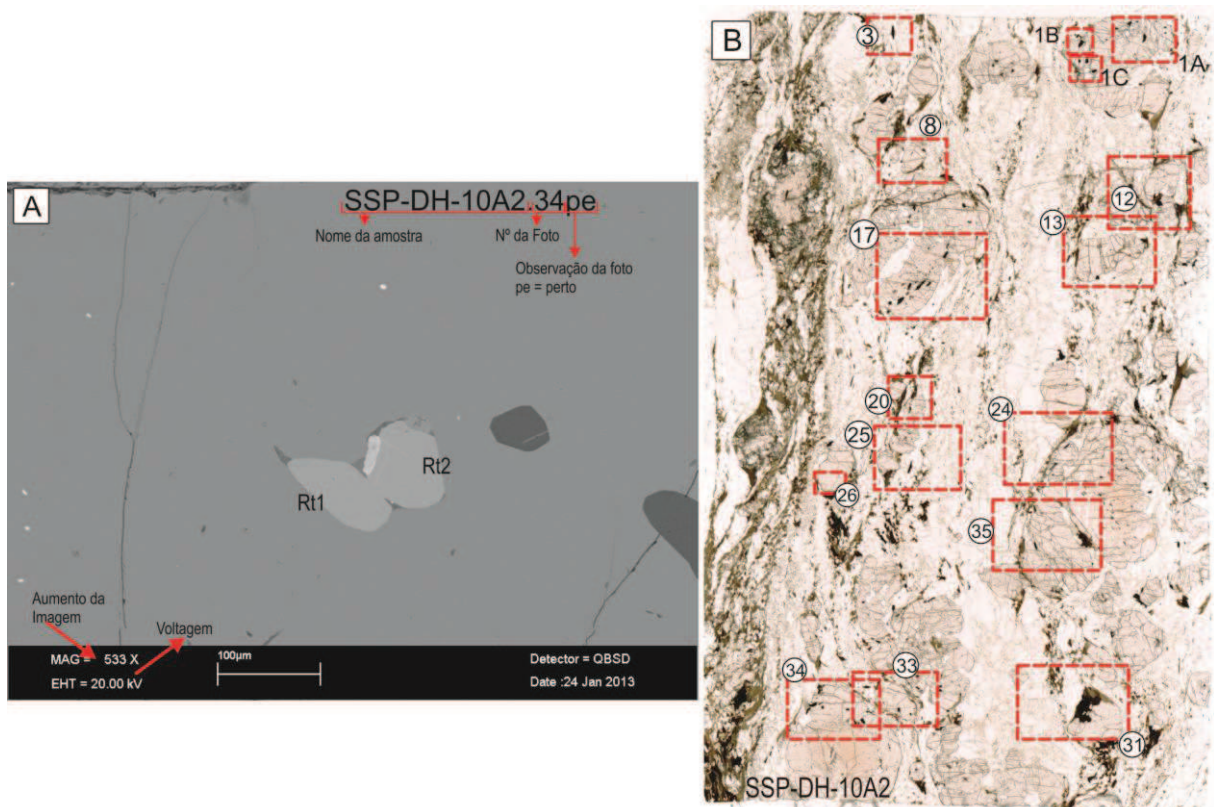
Esta etapa foi sendo desenvolvida por todo o tempo de duração dessa pesquisa visando o conhecimento necessário para a interpretação dos dados obtidos e a conclusão do trabalho em si.

#### 4.2.2 SELEÇÃO DE GRÃOS PARA O LA-ICP-MS

Esta etapa foi realizada no mês de março, e objetivou a reunião de todos os dados adquiridos na Etapa Pré-Monografia para a otimização do estudo futuro dos grãos.

Com as imagens obtidas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura nas 5 amostras escolhidas para o trabalho, sendo elas, MG-161, Olaria-2, SSP-DH-9A1, SSP-DH-10A2 e SSP-DH-12A2, foi feita a identificação dos rutilos em cada imagem e posteriormente foi feita a localização desses rutilos na imagem das lâminas scaneadas. A Figura 5 exemplifica o procedimento de identificação dos rutilos nas imagens em MEV e a localização dos mesmos na imagem scaneada.

**Figura 5** - Em (A) imagem em MEV com os rutilos em detalhe; em (B) imagem scaneada da lâmina com a localização dos rutilos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Essa prática foi efetuada para as 5 lâminas juntamente com a criação de uma tabela com as informações de cada rutilo em potencial para o estudo. Nessa tabela, há informações como a identificação da amostra, nome das imagens obtidas pelo MEV, localização do rutilo

na lâmina, mineral hospedeiro, presença de fraturas, entre outros, e será melhor discutida no Capítulo 6.

Ao todo foram separados 146 grãos de rutilos distribuídos pelas 5 lâminas. A Tabela 2 apresenta essa distribuição.

**Tabela 2** - Relação das amostras com suas quantidades de rutilos a serem analisados.

AMOSTRAS	RUTILOS
MG-161	38
Olaria 2	15
SSP-DH-9A1	25
SSP-DH-10A2	42
SSP-DH-12A1	26

Fonte: Elaborado pela autora.

Com os rutilos nessas imagens devidamente localizados em conjunto com a tabela, obteve-se um banco de dados a fim de auxiliar a etapa seguinte, que consiste na análise dos grãos de rutilo por meio de LA-ICP-MS. As 5 lâminas do presente estudo, em conjunto com o banco de dados, foram enviadas para a Universidade de Gothenburg, Suécia.

#### 4.2.3 ANÁLISE DOS GRÃOS PARA O LA-ICP-MS

Essa etapa ocorreu durante os meses de Abril e Maio de 2013 no laboratório de petrologia da Universidade de Gothenburg na Suécia e foi realizada pelo Prof. Dr. Thomas Zack, pesquisador colaborador do trabalho em questão. Com as informações obtidas pela seleção dos grãos, utilizou-se o espectrômetro de massa com um laser acoplado para fazer a datação dos rutilos por U-Pb. Foram analisadas quatro das cinco amostras selecionadas para a análise, amostras MG-161, Olaria 2, SSP-DH-10A2 e SSP-DH-12A1. A amostra SSP-DH-9A1 será analisada em estudos posteriores.

##### 4.2.3.1 Datação por U-Pb em rutilos

O Sistema U-Pb baseia-se no decaimento isotópico, sob taxas diferentes, de dois isótopos-pai ( $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ ) que geram dois isótopos-filhos ( $^{207}\text{Pb}$  e  $^{206}\text{Pb}$ , respectivamente).

O mineral mais utilizado para datar rochas pelo sistema U-Pb é o zircão ( $ZrSiO_4$ ), porém para este trabalho optou-se pelo rutilo que também é um mineral acessório encontrado em uma grande variedade de rochas.

Embora o rutilo seja um mineral acessório comum nas rochas, sua utilização como geocronômetro ainda é bastante restrita, sendo mais comum a utilização do zircão e da monazita. Esse fato se deve principalmente às baixas concentrações de urânio nos rutilos o que pode resultar em datações por U/Pb sem sucessos. Todavia, técnicas modernas, como por exemplo LA-ICP-MS, possuem limites de detecção extremamente baixos, superando limitações encontradas nas décadas passadas.

Zack *et al.*, (2011) propuseram uma técnica de pré seleção entre os grãos de rutilo que contenham U e posteriormente uma nova seleção analítica com esses grãos que contenham uma quantidade suficiente de urânio, onde foi estabelecido como sendo de  $>5\text{ppm}$ , para a datação com U/Pb.

Dentre os motivos para a utilização do rutilo na datação U/Pb destaca-se que, quando comparado ao zircão, o rutilo é considerado instável nas condições de metamorfismo de baixo grau e dessa forma não desenvolve núcleos resultantes de antigos eventos metamórficos ou ígneos. Ainda, a incorporação do Zr no rutilo é sensível à temperatura, e por esse motivo pode-se obter e combinar informações de idades e temperaturas para este mineral. Além disto, juntamente com outros estudos como, por exemplo, a difusão do Pb ou a proporção de Nb/Cr nos rutilos, pode-se desenvolver estudos relacionados à proveniência, bem como obter informações sobre seu resfriamento (ZACK *et al.*, 2011).

O princípio da datação por U-Pb é pelo decaimento dos isótopos radioativos de  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$  para  $^{206}\text{Pb}$  e  $^{207}\text{Pb}$ , respectivamente, e cujas meia-vidas e constantes de desintegração são:

$$\begin{aligned} \text{U}^{238} : T_{1/2} &= 4.468 \times 10^9 \text{ anos} \\ \lambda_{(1)} &= 1.55125 \times 10^{-10} \text{ ano}^{-1} \\ \text{U}^{235} : T_{1/2} &= 0,7038 \times 10^9 \text{ anos} \\ \lambda_{(2)} &= 9.8485 \times 10^{-10} \text{ ano}^{-1} \end{aligned}$$

Para fases de baixo Th como rutilo, o Pb comum ( $^{204}\text{Pb}$  que representa apenas 1,4% da abundância do chumbo total na natureza, estando muitas vezes abaixo do limite de detecção), pode ser calculado com maior precisão medindo  $^{208}\text{Pb}$  sabendo que a maioria  $^{208}\text{Pb}$  não é derivado de decaimento radioativo de  $^{232}\text{Th}$  dentro da fase, ou seja, a concentração existente de  $^{208}\text{Pb}$  na amostra não foi modificado pelo decaimento radioativo. Com isso, é possível

calcular a concentração total de Pb usando o  $^{208}\text{Pb}$  (que possui uma abundância de 52% do Pb total na natureza), para obter a concentração inicial do Pb na amostra. A concentração inicial de chumbo comum calculada através do isótopo  $^{208}\text{Pb}$  é utilizada para a correção, isto é, para o cálculo da concentração dos isótopos  $^{206}\text{Pb}$  e  $^{207}\text{Pb}$  realmente gerada pelo decaimento radioativo.

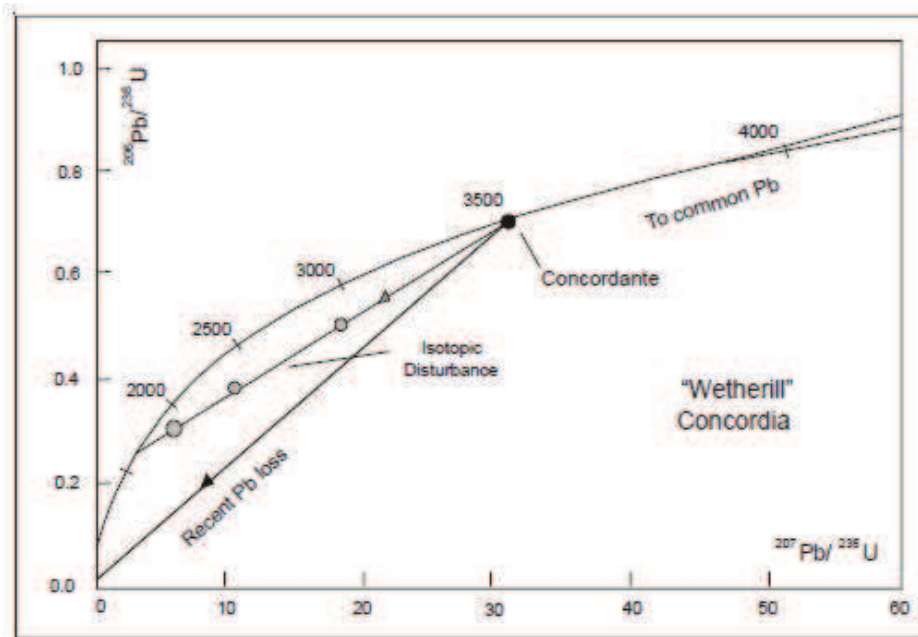
A utilização do rutilo para o método U-Pb é feita por se tratar de um sistema relativamente rico em urânio e pobre em chumbo comum. Contudo ocorre que as idades calculadas desta maneira são geralmente, muito diferentes, conforme se utilize o método  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  ou  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ . Esta discordância é devida a uma abertura do sistema U-Pb. Entretanto, os resultados podem ser reinterpretados usando-se um diagrama com a razão  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  como abscissa e  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  como ordenada (PEUCAT, 1988). Este diagrama é chamado de diagrama concórdia.

Sobre este diagrama é colocada uma linha curva, calibrada em intervalos de 500 Ma, chamada de linha concórdia, sendo definida como o local onde plotam todos os pontos cujas idades  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  e  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  são iguais.

Os pontos lançados neste diagrama frequentemente estão alinhados segundo uma linha reta chamada discórdia, a qual intercepta a concórdia em dois pontos. O intercepto superior corresponde a idade primária, de formação do mineral, e o intercepto inferior corresponde tanto à idade presente, ou a alguma idade intermediária, mais jovem que a idade primária.

O diagrama concórdia mais utilizado é o de Wetherill (1956) onde as razões filho/pai  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  e  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  são plotadas nos eixos X e Y, respectivamente (Figura 6).

**Figura 6** - Curva de Wetherill, conhecido também como o Diagrama da Concórdia para o decaimento U/Pb.



Fonte: Wetherill, 1956.

#### 4.2.3.2 LA-ICP-MS

A espectrometria de massa com fonte de plasma (ICP-MS) teve seu início no começo dos anos 70 com a procura de uma técnica complementar à emissão atômica com fonte de plasma (ICP-AES) para análise multielementar de elementos constituintes em amostras geológicas (GRAY, 1985). Para se tornar mais eficiente, a nova técnica teria que apresentar baixos limites de detecção, sem as interferências associadas aos espectros de emissão para elementos com propriedades químicas semelhantes, principalmente, para materiais geológicos.

No começo dos anos 80 iniciou-se a comercialização dos primeiros espectrômetros de massa com fonte de plasma induzido. Nos últimos anos a técnica da espectrometria de massa com fonte de plasma tem sido considerada como uma poderosa ferramenta para análise multielementar de metais na faixa de traços e sub-traços em diversas matrizes: ambiental, biológica, geológica, materiais de alta pureza e nuclear (JARVIS *et al.*, 1992).

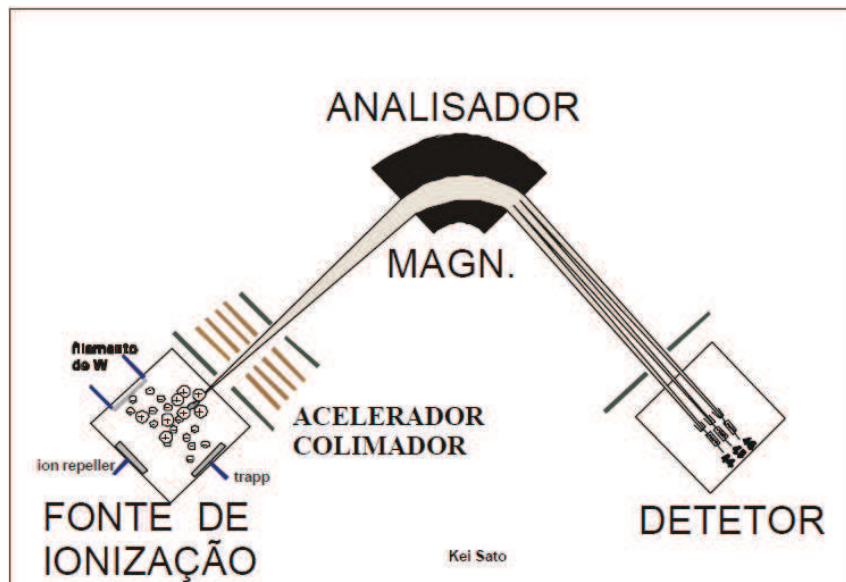
A diferença, básica entre a espectrometria de massa convencional e a espectrometria de massa com fonte de plasma é que neste último os íons são gerados em um plasma de argônio sustentado por um gerador de rádio frequência, onde os íons são gerados à pressão atmosférica (JARVIS *et al.*, 1992). Esse sistema de ionização é denominado ICP (*Inductively*

*Coupled Plasma*), ou fonte de plasma induzido, e pode ser acoplada tanto a um espectrômetro de massa, quanto a um espectrômetro de emissão atômica (ICP- AES).

A espectrometria de massa com fonte de plasma (ICP-MS) apresenta várias vantagens, dentre elas: análise multielementar de elementos-traços, baixos limites de detecção, facilidade na identificação dos espectros e capacidade de determinação da razão isotópica dos elementos. A principal dificuldade apresentada por esta técnica são as interferências espectrais, principalmente a formação de íons poliatômicos e de óxidos refratários.

Um Espectrômetro de Massa é composto basicamente de três partes: fonte de íons; analisador de massas e sistema de detecção, como pode ser observado na Figura 7.

**Figura 7** - Esquema de um ICP-MS.



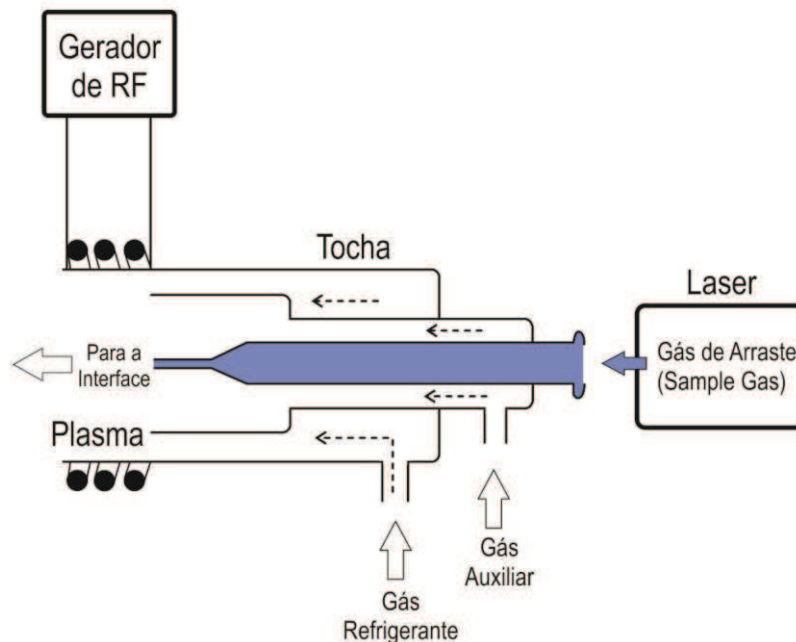
Fonte: Sato, 2002.

A configuração do ICP utilizado na espectrometria de massa consiste basicamente de uma fonte de rádio frequência acoplada a uma bobina de cobre que circunda a extremidade final da tocha. O gás utilizado normalmente é o argônio, gerando um plasma de argônio.

Na Figura 8, observa-se um esquema da tocha, que se constitui de três tubos concêntricos de quartzo por onde passam:

- 1) Tubo central: gás de arraste com a amostra nebulizada;
- 2) Tubo intermediário: gás auxiliar, que dá forma e sustenta o plasma;
- 3) Tubo externo: gás refrigerante, que evita o superaquecimento da tocha.

**Figura 8** - Tocha acoplada ao gerador de rádio frequência. O campo magnético oscilante que sustenta o plasma é gerado pela corrente que passa através do laser.



Fonte: Modificado de Shibuya, 1999.

O plasma é iniciado por uma descarga elétrica e sustentado por um campo magnético oscilante, gerado por uma corrente que passa através da bobina e a ionização do gás ocorre através da colisão entre os átomos, íons e elétrons. A temperatura de ionização da amostra é em torno de 5 000 a 7 000 K, embora na região central o plasma possa atingir uma temperatura de 10 000 K (JARVIS *et al.*, 1992).

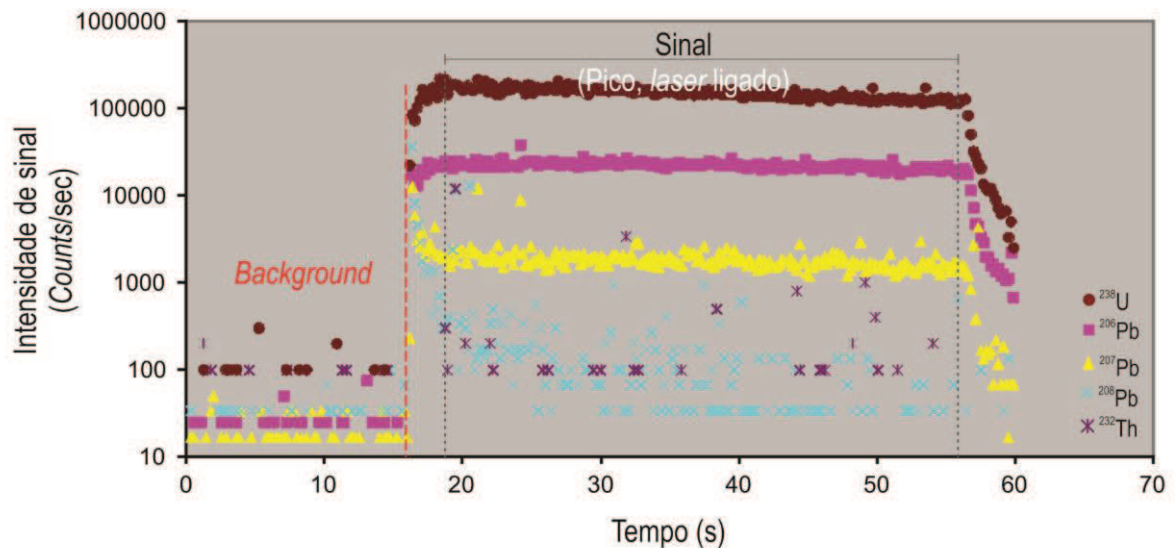
No plasma, as moléculas em geral são quebradas e seus elementos químicos são todos ionizados simultaneamente devido à altíssima temperatura do plasma. As análises são intercaladas com os padrões para normalizar e/ou corrigir eventuais desvios nas medidas de razões isotópicas das amostras. Para a análise das amostras do presente trabalho, utilizar-se há o padrão (*standard*) R10.

A datação por ablação a laser em rutilos por U-Pb foi realizada na Universidade de Gothenburg – Suécia usando o sistema de ablação a laser *New Wave* NWR213 acoplado ao analisador quadrupolar *Agilent* 7500a ICP-MS. A câmara que abriga as amostras, chamada de célula de grande formato tem a capacidade, por exemplo, de acomodar até 9 discos regulares de 1 polegada cada, ou de 6 a 8 lâminas retangulares de dimensões de 4,5x3,0 cm dispostas de maneira organizada. Combinada com uma câmara de ablação de 1 centímetro de diâmetro (posicionada sobre a amostra quando a mesma é analisada) permite uma rápida varredura em

qualquer lugar que a amostra esteja na célula de grande formato. As análises são realizadas utilizando-se feixe de 50  $\mu\text{m}$  de energia de densidade aproximada de  $4\text{J}/\text{cm}^2$  e taxa de repetição de 10 Hz. A câmara de ablação foi “preenchida” com hélio, gás utilizado para transportar o aerosol produzido durante a ablação para o ICP-MS. Antes de atingir a tocha, o transportador de gás é misturado com argônio e nitrogênio, com uma taxa total de 0.90l /min hélio, 0.65 l/min argônio e 2 ml/min nitrogênio.

As concentrações de Th e U e razões  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ , assim como as idades  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$  e  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  foram calculadas a partir dos dados de intensidade utilizando-se os sinais obtidos para o *background* e o pico (*time-resolved signal*), como observado na Figura 9.

**Figura 9** - Gráfico mostrando intensidade de sinal para uma típica análise de Rt com LA-ICP-MS.



Fonte: Da autora.

#### 4.2.4 TRATAMENTO, INTEGRAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS ESPECÍFICOS

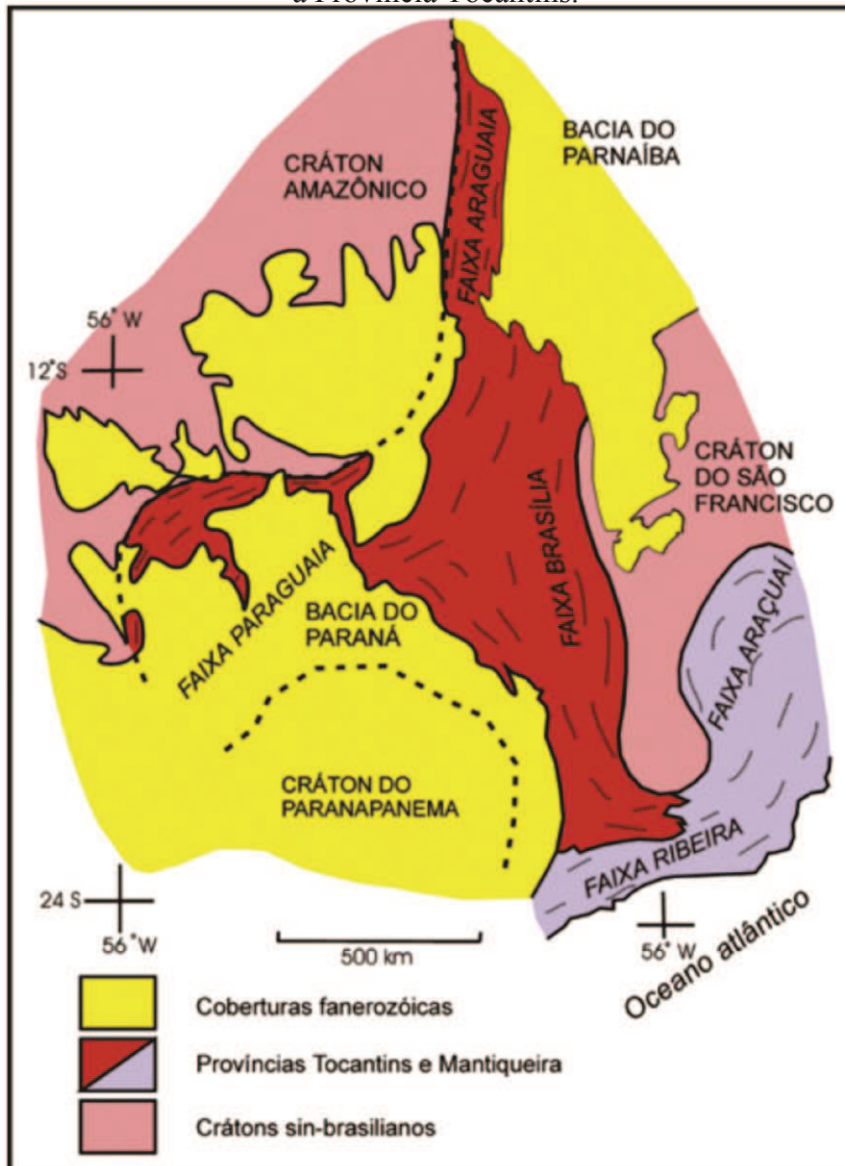
Esta etapa consiste na compreensão das idades obtidas através do LA-ICP-MS e o tratamento das mesmas para a futura integração com os dados relevantes encontrados na literatura da região estudada do presente trabalho.

Essas idades estudadas serão apresentadas em formato de tabela e quando possível serão comparadas com idades já existentes. Além da apresentação em tabela, essas idades serão plotadas no mapa da área estudada.

## 5 GEOLOGIA REGIONAL

A Província Tocantins é uma unidade tectônica e representa o ciclo orogênico Neoproterozóico desenvolvida durante a colisão de três blocos continentais, o Cráton Amazônico a oeste, o Cráton São Francisco a leste e o Cráton Paranapanema a sudoeste e é resultado da amalgamação do Gondwana Oriental (DELGADO *et al.*, 2003). Compondo a Província Tocantins, estão três cinturões dobrados conhecidos como Faixa Brasília (que bordeja o Cráton São Francisco) e Faixas Paraguaia e Araguaia (que bordejam o Cráton Amazônico) (ALMEIDA *et al.*, 1981) (Figura 10).

**Figura 10** - Esboço tectônico do Brasil central, com destaque para a Província Tocantins.



## 5.1 Faixa Brasília

A faixa Brasília é um cinturão móvel Neoproterozóico situado na porção oriental da Província Tocantins e constitui um conjunto de terrenos com dobras e escamas de empurrão de origem crustal que afluem no sentido leste em encontro com o Cráton São Francisco. Essas estruturas apresentam estilos metamórficos-deformacionais distintos, o que resulta em duas compartimentações tectônicas chamadas de Faixa Brasília Setentrional (FBS) com orientação NNE, e Faixa Brasília Meridional (FBM) com orientação NNW (ALMEIDA, 1985), onde se encontra localizada a área de estudo. Cada um desses compartimentos apresentam características evolutivas próprias e contrastes no arcabouço tectono-estratigráfico e metalogenético (FONSECA & DARDENNE, 1994).

A FBS é marcada por uma série de sistemas de dobras e empurrões de direção preferencial N-S (FONSECA *et al.*, 1995) e principalmente pela grande variação de graus de metamorfismo, estilos estruturais e materiais envolvidos, e seus limites são definidos a leste pelo Arco Magmático de Goiás e pelo Maciço Goiano e a sul pela estrutura conhecida como Megaflexura dos Pirineus.

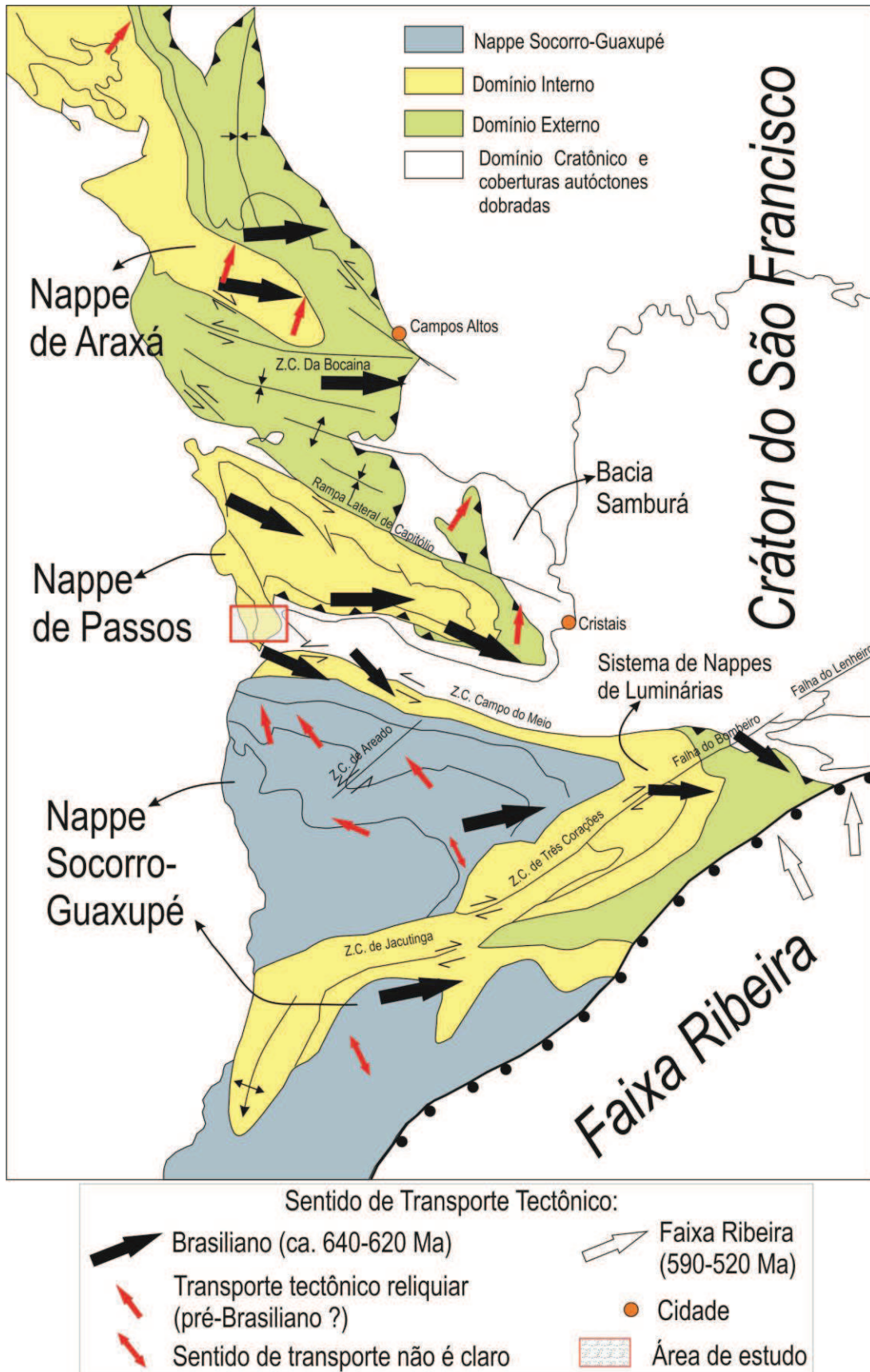
Já a FBM é caracterizada tectonicamente pelo cavalgamento sucessivo de extensas *nappes* formadas principalmente por rochas empurradas em direção ao Cráton São Francisco (ALMEIDA *et al.*, 1981). A variação na intensidade do metamorfismo fez com que alguns autores (SIMÕES & VALERIANO, 1990, VALERIANO *et al.*, 1995) determinassem uma divisão em três domínios tectônicos sendo eles:

- Domínio Interno: representando o último episódio de empilhamento tectônico (aproximadamente 600 Ma.). As rochas que compõem este domínio cavalgam todas as unidades pré-cambrianas adjacentes incluindo o Grupo Bambuí (porção autóctone). Além disso, é marcado por ser o domínio estruturalmente superior com graus mais intensos de metamorfismo e deformação (VALERIANO *et al.*, 1995). Na região da área de estudo compreende a unidade tectônica Nappe de Passos, compostas por rochas do Grupo Araxá, objeto de estudo do presente trabalho.
- Domínio Externo: sotoposto ao Domínio Interno, este domínio cavalga parte das rochas do Grupo Bambuí e seu embasamento. Sua petrologia é bastante variada compreendendo rochas arqueanas que fazem parte do *Greenstone Belt* de Piumhi, rochas do Grupo canastra e metassedimentos de baixo grau metamórfico de origem ainda pouco conhecida (VALERIANO *et al.*, 1995).

- Domínio Cratônico: este domínio inclui parte do Grupo Bambuí e seu embasamento, onde possui uma continuidade a leste com o Cráton São Francisco (VALERIANO *et al.*, 1995).

A Figura 11 representa a compartimentação da Faixa Brasília nos 3 domínios tectônicos citados acima.

Figura 11 - Faixa Brasília compartimentada em 3 domínios tectônicos.



Fonte: Modificado de Valeriano, 1999.

A área de estudo do presente trabalho insere-se no Domínio Interno da Faixa Brasília Meridional. As rochas presentes na área pertencem à unidade tectônica Nappe de Passos, uma unidade alóctone composta por uma sequência metassedimentar com rochas metabásicas a metaultrabásicas denominada de Grupo Araxá (SIMÕES, 1995).

## 5.2 Principais Unidades Regionais da Área de Estudo

### 5.2.1 COMPLEXO BARBACENA

Perfazendo parte do embasamento da região da área de estudo, as rochas associadas a esse grupo, foram inicialmente incluídas no Complexo Campos Gerais definido por Cavalcante *et al.*, (1979). Porém, estudos realizados por Zanardo *et al.*, (1996), permitiram a separação em duas unidades distintas, visto que esse complexo é constituído por rochas de diferentes idades, resultantes de regimes tectônicos distintos.

A unidade posicionada a norte é representativa do complexo Barbacena (ZANARDO *et al.*, 1996) por compreender terrenos do tipo granito-*greenstone* de idade arqueana (BARBOSA, 1954). Já a unidade situada na porção sul, Zanardo *et al.*, (1996) sugere a associação com uma sequência metavulcano-sedimentar correlacionável ao Grupo Araxá.

### 5.2.2 GRUPO BAMBUÍ

Fazendo parte do Domínio Cratônico, o Grupo Bambuí é constituído por rochas metamórficas, representadas por metacalcários, metarenitos (quartzíticos), metarcóseos, metaconglomerados, e principalmente perfazendo quase que a totalidade da unidade, metasiltitos, metamargas e filitos ardoseanos (LUVIZOTTO, 2003), e representa ainda a cobertura deste domínio (FUCK *et al.*, 1993).

Simões & Valeriano (1990) descrevem essa unidade próxima à área de estudo com a presença de ardósias e metassiltitos, por vezes carbonáticos, ocorrendo pontualmente lentes de mármore.

No contexto estrutural, Morales *et al.*, (1991) interpretaram de modo geral, uma evolução tectônica do Domínio Cratônico baseada em um regime compressivo no sentido EW que transportou as rochas da Nappe de Passos sobre o embasamento. Com esse modelo,

entende-se que as rochas do embasamento responderam aos esforços compressivos através do desenvolvimento de zonas de cisalhamento direcionais de alto ângulo de mergulho.

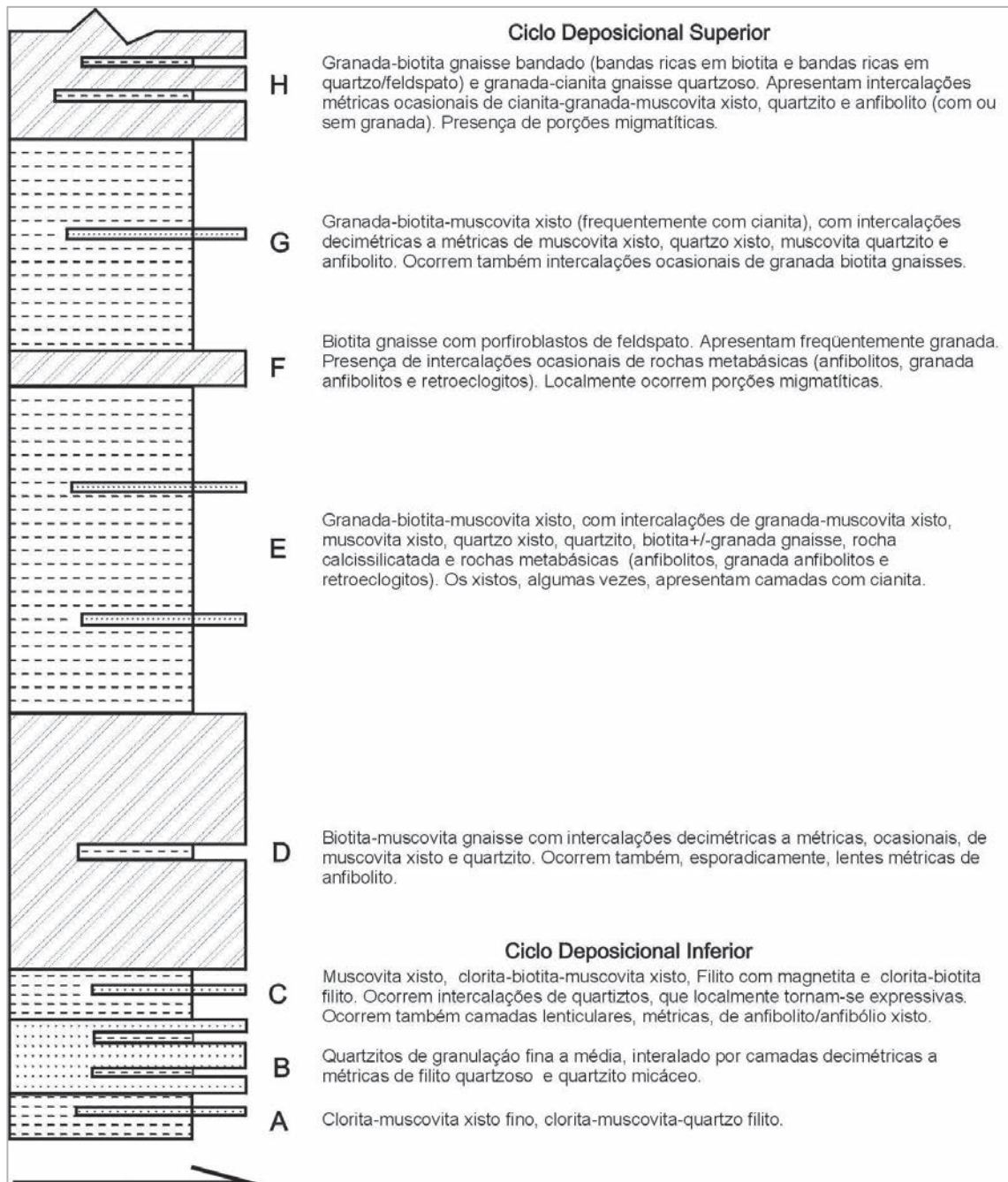
### 5.2.3 GRUPO ARAXÁ

Compreendendo uma das unidades do Domínio Interno, o Grupo Araxá em seus primeiros estudos, era denominado como Formação Araxá (BARBOSA, 1955) sendo composto por mica xistos, quartzitos e migmatitos. A partir de 1970, passou-se a utilizar o termo Grupo, limitando o Grupo Araxá aos xistos e quartzitos, admitindo então as rochas gnáissicas como parte de um conjunto mais antigo.

Contudo, a utilização do termo Grupo Araxá sempre foi muito contestada, sendo justificada pelo problema de conseguir criar colunas estratigráficas guias em um âmbito regional, visto a complexidade da ampla distribuição e variações faciológicas (sedimentares e metamórficas) desse grupo (HEILBRON *et al.*, 1987, VALERIANO *et al.*, 1995).

Simões (1995) realizou estudos na região de Passos, local próximo à área de estudo, onde dividiu o Grupo Araxá em nove unidades denominadas de A a I (Figura 12). O autor considerou A, B e C unidades correspondentes ao Ciclo Depositional Inferior e representantes da base desse Grupo, e as unidades D à unidade I, correspondem ao Ciclo Depositional superior da Nappe de Passos. A porção sul da Nappe de Passos, próximo a Cidade de São Sebastião do Paraíso foi estudada por Luvizotto (2003). O autor constatou que as mesmas divisões propostas por Simões (1995) também podem ser aplicadas para esta porção da Nappe.

**Figura 12 - Coluna Estratigráfica do Grupo Araxá na Nappe de Passos.**



Fonte: Extraído de Simões, 1995.

### 5.2.3.1 Nappe de Passos

A Nappe de Passos é uma unidade tectônica que começou a ser objeto de estudo no final da década de 70, início da década de 80. Neste período foi possível a obtenção de informações relativas às delimitações e contornos da Nappe, bem como a sua petrologia e suas orientações estruturais.

De maneira geral, a Nappe de Passos é constituída por um pacote predominantemente metassedimentar, alóctone, que cavalga um terreno autóctone (Domínio Cratônico) que engloba o Grupo Bambuí (cobertura metassedimentar pelito-carbonática de baixo grau metamórfico) no topo, e o Complexo Campos Gerais (constituído por um granito-gnaiss-migmatito-*greenstone*) perfazendo o seu embasamento (SIMÕES, 1995).

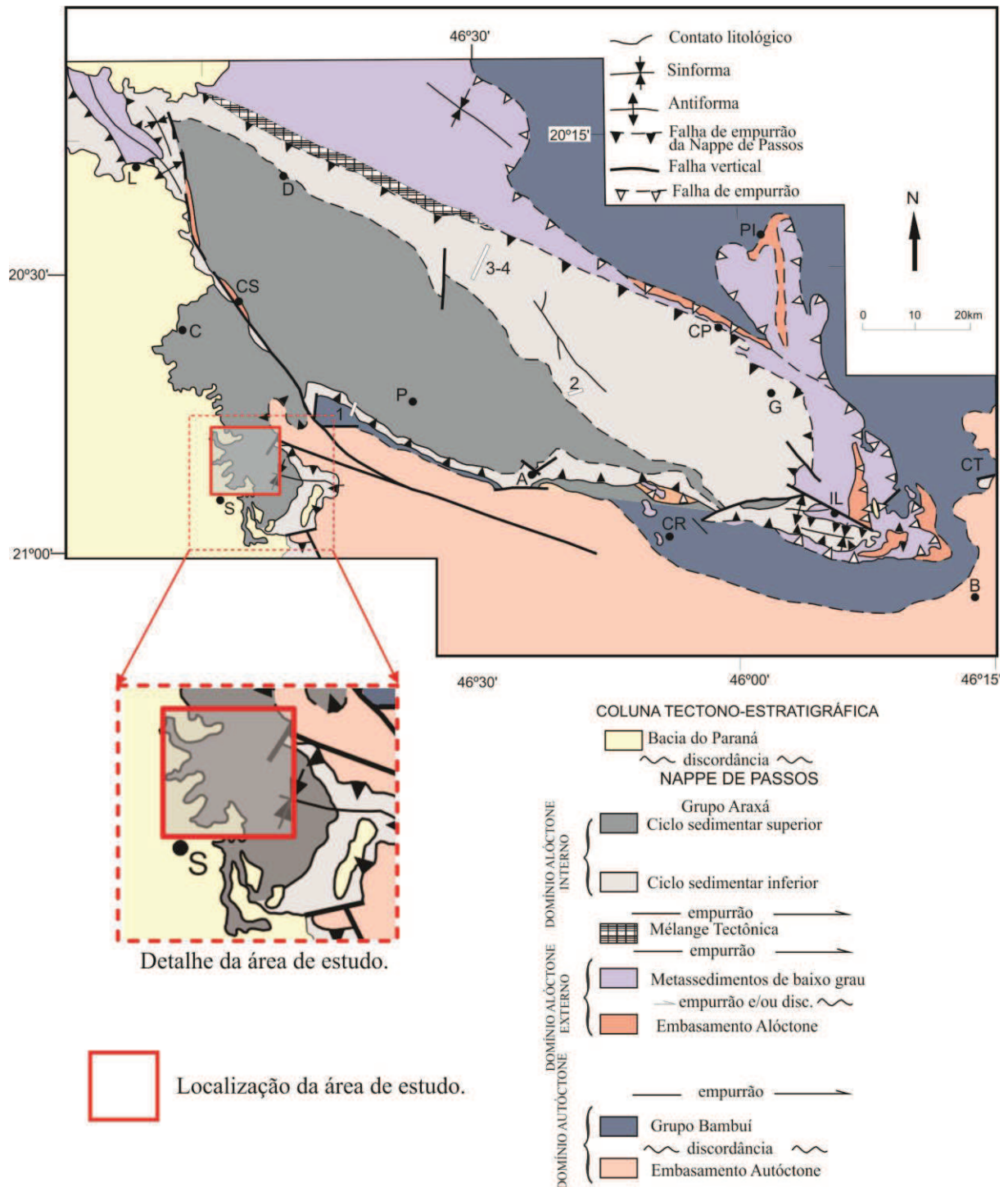
Por apresentar feições tectônicas distintas, a Nappe de Passos pode ser delimitada através de sua superfície de cavalgamento, responsável por essas feições. O limite norte da nappe é dado por uma superfície de cavalgamento com uma zona de cisalhamento subvertical, sinistral, podendo ser provavelmente caracterizada como uma rampa lateral (SIMÕES, 1995).

Já na porção sul, o limite está relacionado ao truncamento da superfície de cavalgamento com a zona de cisalhamento de Cássia, e segundo Simões (1995), a ESE da cidade de São Sebastião do Paraíso, área de estudo do presente trabalho, o limite é marcado por zonas de cisalhamento verticais aproximadamente EW, que seccionam a nappe, mascarando o seu traçado. Ainda, de acordo com o mesmo autor, a continuidade desse limite ao sul, pode ser representada pelos grupos Carrancas e Andrelândia.

A Nappe de Passos é formada por 3 grandes dobras, denominadas de norte para sul de Braquissinforma de Passos (SIMÕES, 1995), que compreende a maior parte da nappe, a Antiforma de Itaú de Minas e a Sinforma da Serra do Chapadão (MORALES *et al.*, 1996), resultando em uma grande estrutura sinclinorial. Zanardo (1992) coloca também a Sinforma de Capetinga no limite norte da área de trabalho, situando-se entre as Zonas de Cisalhamento de Cássia e Serra da Fábrica.

A Figura 13 apresenta de forma simplificada o mapa geológico da Nappe de Passos e a localização da área de estudo.

**Figura 13** - Mapa Geológico simplificado da Nappe de Passos, apresentando detalhe da área de estudo.



Localidades: L – Laje. C – Capetinga. CS – Cássia. S – São Sebastião do Paraíso. D – Delfinópolis. P – Passos. V – Vargem Bonita. A – Alpinópolis. CR – Rio Claro. G– Guapé. CT – Cristais. B – Boa Esperança. IL – Illicinea. PI – Piumhi. CP – Capitólio. Fonte: Extraído de Simões, 1995.

Zanardo (1992) e Simões (1995) confirmaram os dados da literatura que mostravam que as rochas que compõem a Nappe de Passos possuem metamorfismo invertido. Através de

estudos geotermobarométricos os autores obtiveram temperaturas do auge metamórfico variando de 450° C e 6 kbar na base a 750° C e 11 kbar no topo. Hoppe et al., 1989, Zanardo 1992, descreveram ocorrências de retroeclogitos em rochas do Grupo Araxá, na região de São Sebastião do Paraíso, evidenciando o caráter de alta pressão das rochas. O autor calculou, por meio de geotermômetros e geobarômetros aplicados a rochas metapelíticas, metabásicas e gnaisses, temperaturas maiores que 750°C para as rochas encaixantes, o que indica condições de reequilíbrio em fácies granulito e pressões superiores a 14 kbar (ver também LUVIZOTTO *et al.*, 2011).

O auge metamórfico é datado de 640 Ma. pelo método U-Pb (VALERIANO *et al.*, 2004). A inversão metamórfica pode ser explicada com uma subducção das rochas da nappe em fases precoces da orogenia brasileira, através de uma zona de subducção que mergulhava aproximadamente para oeste. Posteriormente, essas rochas foram rapidamente exumadas e empurradas contra o Cráton do São Francisco, preservando a inversão das isothermas geradas na zona de subducção (SIMÕES, 1995).

### 5.3 Geocronologia

Valeriano (1999) e Valeriano *et al.*, (2000), calcularam idades da região pelo método K-Ar para as rochas do Domínio Cratônico, que indicaram idades de resfriamento paleo a mesopoterozóicas para as rochas do embasamento da Nappe de Passos, e relacionando ao estudo de metamorfismo da área, mostraram que o sistema K-Ar não foi totalmente aberto durante a orogenia neoproterozóica, que resultou no cavalgamento da Nappe de Passos. Assim, pode-se concluir que o metamorfismo que atuou nas rochas do Grupo Araxá não afetou o seu embasamento.

Para o Domínio Interno, Seer (1999) reuniu os dados geocronológicos de K-Ar, Sm-Nd e U-Pb na região de Araxá, e concluiu que existiram dois eventos colisionais na Faixa Brasília Meridional, sendo o mais antigo datado por volta de 790 Ma. e o evento mais novo em torno de 630 Ma., refletindo a colagem final do continente Gondwana. Com os dados de K-Ar obtidos por Hasui & Almeida (1970), Seer (1999) afirma a ocorrência de um resfriamento regional após 630 Ma. que ocorreu durante os estágios finais de transporte das escamas tectônicas sobre os níveis crustais mais rasos.

Compilações de dados geocronológicos por K-Ar obtidos em rochas da Nappe de Passos realizados por Valeriano (1999) e Valeriano *et al.*, (2000), concluem que essas idades restringem o resfriamento regional da nappe no intervalo de 674-640 Ma. e 673-566 Ma..

Valeriano *et al.*, (2004) apresentaram idades de rutilos da área da Nappe de Passos com cerca de 594 Ma. que coincidem com o erro apresentado nas idades de monazitas (604 - 606 ± 8Ma.) e ele as interpreta como sendo as idades de resfriamento (*cooling ages*).

Recentemente, estudos geocronológicos foram realizados na região do Complexo de Nappes de Andrelândia localizado a aproximadamente 400 km à leste de São Sebastião do Paraíso. Estudos de (U-Th)-Pb em monazitas (RENO *et al.*, 2012) datam 662-655 Ma. e é interpretado como um estágio tardio do fechamento do pico da evolução prográdante que atingiu a área.

Nesse mesmo trabalho, Reno *et al.*, (2012) apresenta idades de zircão, Rb-Sr e  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  e os novos dados de (U-Th)-Pb que mostram que o Complexo de Nappes de Andrelândia possui idade semelhante àquela relatada por Valeriano *et al.*, (2004) na região norte do Complexo da Nappe de Passos. Esta similaridade pontual na evolução temporal sugere que os eventos registrados em ambos os complexos podem ser regionalmente significativos.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a compreensão espacial das amostras que foram estudadas, foi utilizado o mapa geológico da região de São Sebastião do Paraíso de Luvizotto (2003) de 1:50 000, onde foi delimitada a área do presente estudo e o georeferenciamento das amostras.

Um detalhe do mapa geológico da região de São Sebastião do Paraíso (LUVIZOTTO 2003) é apresentado no Anexo I. Nota-se que 4 amostras (MG-161, SSP-DH-9A1, SSP-DH-10A2 e SSP-DH-12A2) inserem-se na Unidade H da coluna estratigráfica da Nappe de Passos na área estudada, e a amostra Olaria 2 se encontra no contato entre as unidades E e F.

As amostras da Unidade H possuem uma mineralogia similar resultando em granada-biotita gnaisse ou cianita-granada-biotita gnaisse e a amostra Olaria é representada por retroeclogito. Todas as amostras são representativas de um metamorfismo regional, de alta temperatura e pressão.

Luvizotto (2003) estudou a caracterização metamórfica das rochas da Nappe de Passos na região de São Sebastião do Paraíso e confirmou o aumento da pressão e da temperatura em direção ao topo da coluna estratigráfica (Unidade H), descrito na literatura. Por outro lado, a ocorrência de retroeclogitos no contato entre as unidades E e F, representa o registro de mais alta pressão descrito para a Nappe de Passos, sugerindo que o pico de pressão e o pico de temperatura não ocorreram no mesmo momento ao longo da trajetória  $P-T-t$ .

O Anexo II apresenta a tabela criada para as 5 amostras onde se encontram as informações necessárias para as análises de cada rutilo de interesse. Essa análise focou em selecionar rutilos inclusos em granadas, onde é mais fácil a preservação da composição química original do rutilo, e também a procura por rutilos pouco ou não fraturados, pois as fraturas podem estar associadas à alguma modificação na estrutura química.

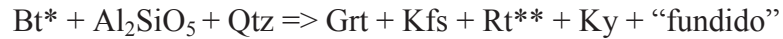
Na tabela buscou-se ainda informar a identificação das imagens obtidas pelo MEV e de cada rutilo na imagem, o tamanho do mineral, a localização do rutilo no mineral hospedeiro (nesse caso a granada), se está na borda ou no núcleo e observações gerais. No total há a identificação de 146 rutilos distribuídos nas 5 lâminas estudadas.

Como citado no item 5.2.2, a tabela em conjunto com as imagens scaneadas e as imagens de MEV, constituíram um banco de dados que foram enviados para a Universidade de Gothenburg, Suécia para serem analisadas sob a supervisão do Prof. Dr. Thomas Zack.

O Anexo III apresenta uma breve descrição petrográfica das 5 amostras para o melhor entendimento das amostras da área estudada, e também confirmou-se a mineralogia dos

granulitos, bem como do eclogito. Com isso, tornou-se possível um breve esclarecimento da trajetória PxT e a evolução metamórfica dessas rochas.

A paragênese do granulito (de origem pelítica) é caracterizada basicamente por:



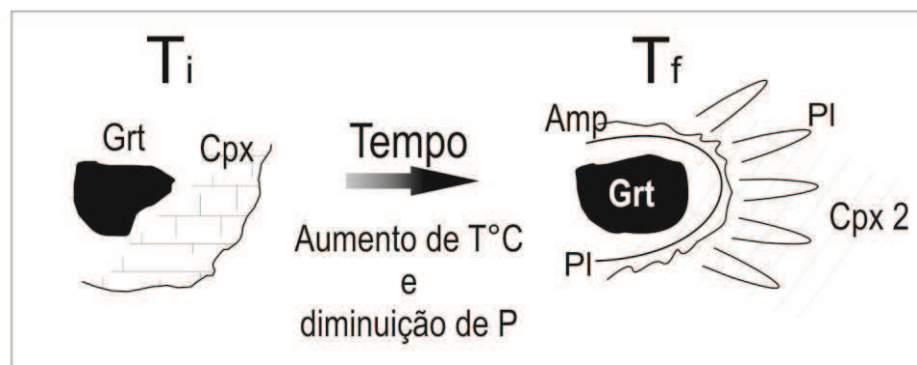
\*Biotita com alto teor Ti

\*\*Rutilo formado com o Ti anteriormente presente na biotita (quebra da biotita)

Segundo a reação apresentada acima, rutilo foi formado no pico do metamorfismo e, portanto deveria preservar a idade deste evento. Todavia, a composição isotópica pode variar devido à difusão química entre o pico do metamorfismo e a temperatura de fechamento do sistema U-Pb no rutilo.

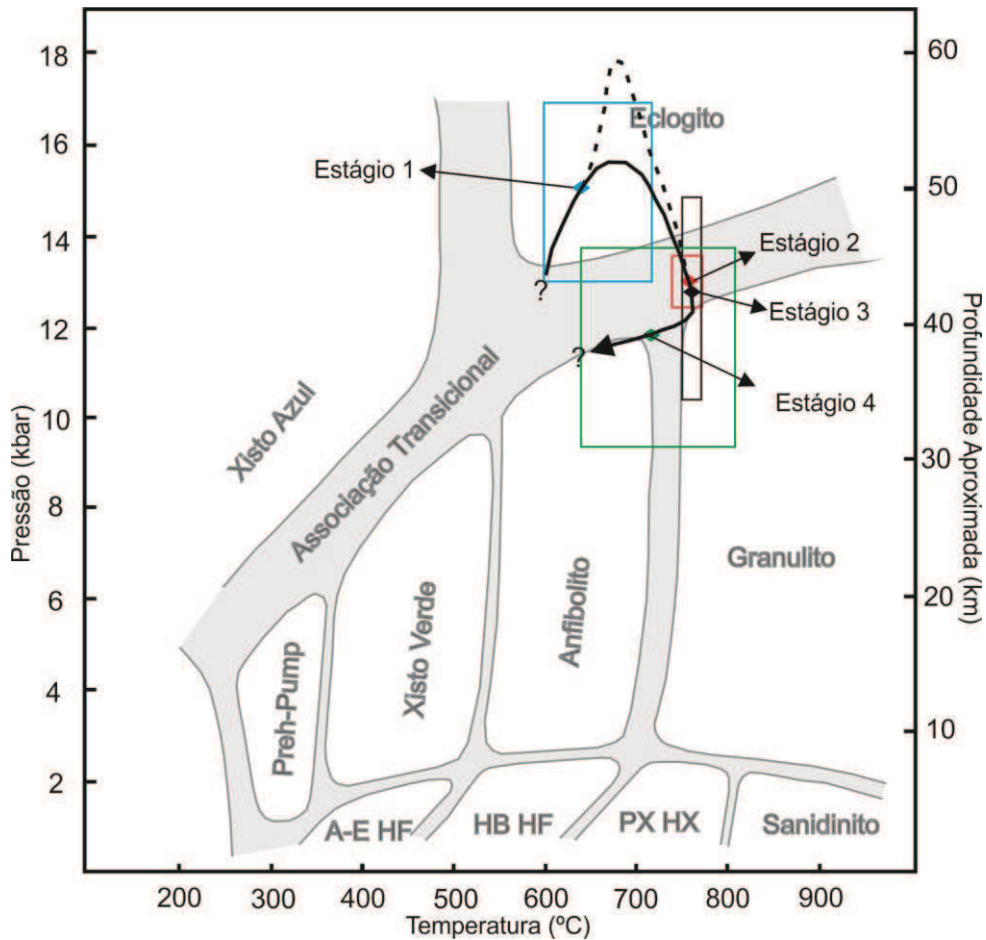
Já na análise microscópica do retroeclogito observou-se por toda a lâmina texturas tipo corona e simplectítica, indicando reequilíbrios metamórficos pós-pico de pressão. Essas texturas são marcadas pelo intercrescimento de plagioclásio e clinopiroxênio (Cpx2), desenvolvido a partir do clinopiroxênio original (Cpx1) como pode ser observado pelo esquema da Figura 14. Com base nesta textura e em dados de química mineral, Luvizotto (2003) identificou trajetória de pressão e temperatura horária para o retroeclogito (Figura 15).

**Figura 14** - Figura ilustrando texturas em corona (plagioclásio e anfibólio desenvolvidos ao redor de granada) e simplectítica (intercrescimento Cpx2 e plagioclásio) presente nos retroeclogitos.



A paragênese inicial da fácies eclogito (Grt + Cpx) é quebrada gerando uma corona de plagioclásio ao redor dos cristais de granada e simplectitos de clinopiroxênio, plagioclásio e anfibólio. Fonte: Elaborado pela autora.

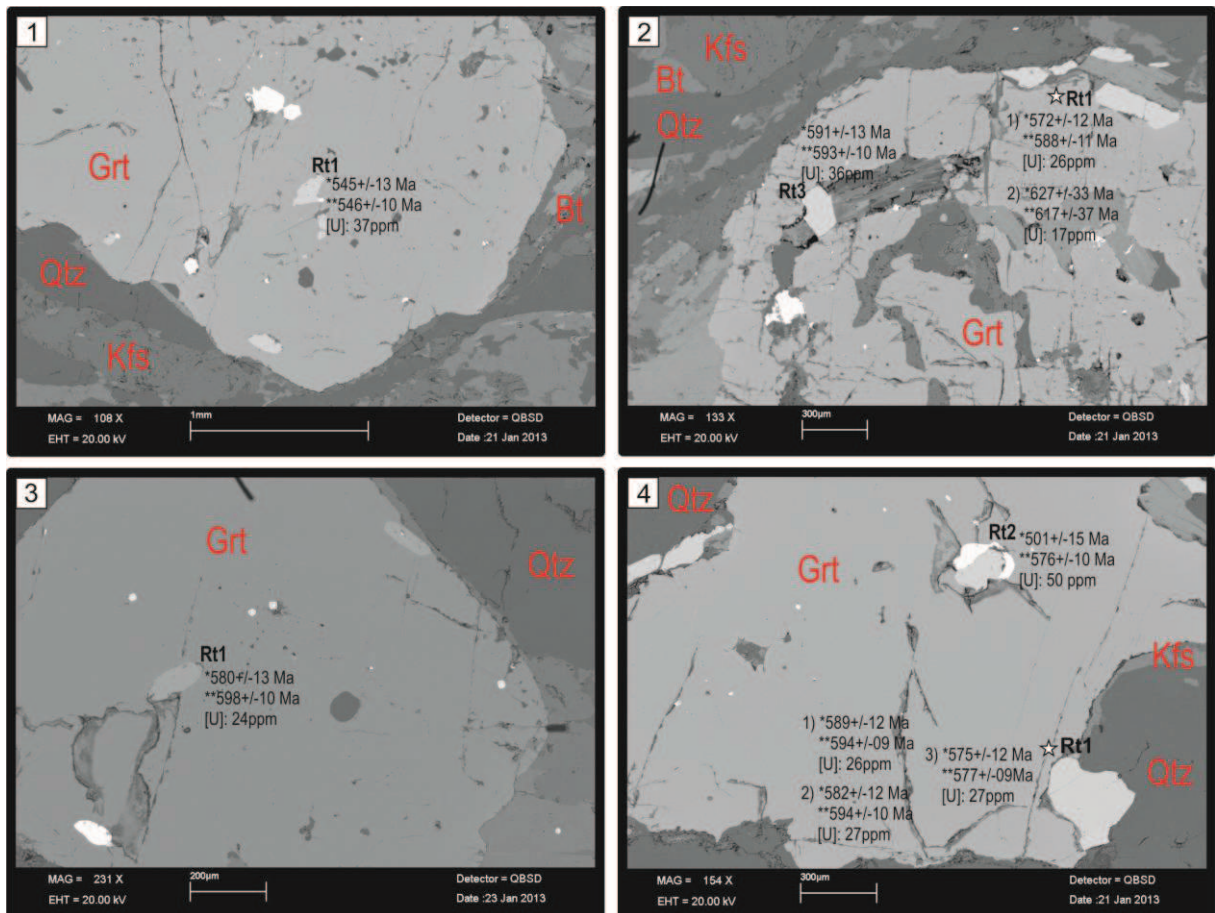
**Figura 15** - Trajetória de pressão e temperatura para o retroeclogito.



Estágios obtidos por estudos petrográficos. Estágio 1: Grt + Paragênese; Estágio 2: Grt + Cpx1; Estágio 3: Cpx2 + Pl (simpl) + Grt; Estágio 4: Hbl + Pl (corona) + Grt. A linha tracejada representa a possível posição da trajetória original, considerando que os valores de pressão obtidos para o estágio eclogito (estágio 2) parecem estar subestimados. Retângulos correspondem às variações máximas e mínimas de cada estágio e os pontos à média dos valores. Campos do diagrama segundo Yardley (1990). Fonte: Extraído de Luvizotto (2003).

Das cinco amostras enviadas para a Suécia para as análises do rutilo no LA-ICP-MS, quatro foram analisadas e datadas, sendo elas SSP-DH-12A1, MG-161, SSP-DH-10A2 e Olaria 2. Abaixo seguem as imagens em MEV apresentando os rutilos estudados (figuras 16, 17, 18 e 19). A amostra SSP-DH-9A1 será analisada em estudos posteriores.

Figura 16 - Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) da amostra SSP-DH-12A1.



\* Idade  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$

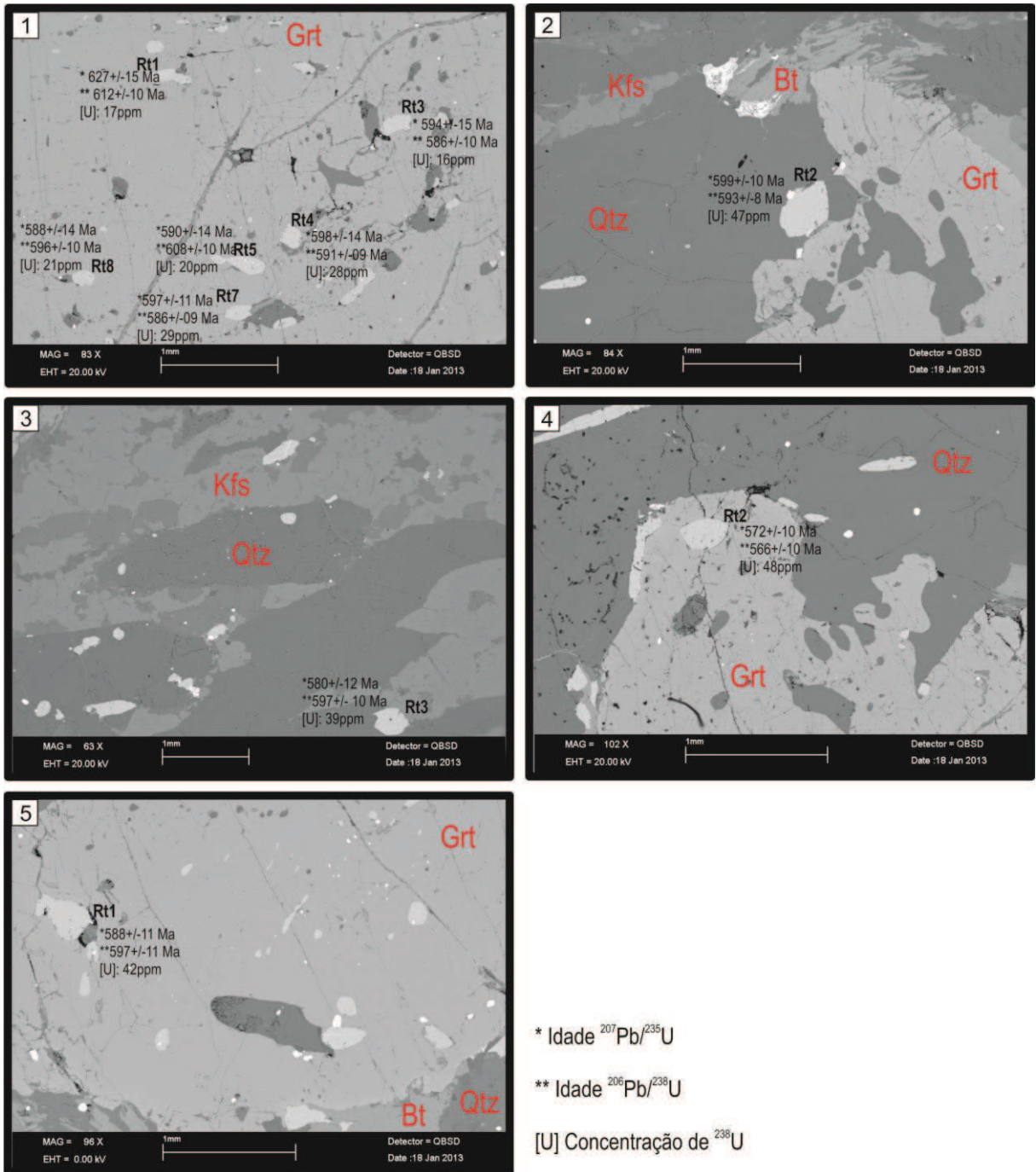
\*\* Idade  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

[U] Concentração de  $^{238}\text{U}$

☆ Grão datado mais de uma vez

Em destaque os rutilos analisados com as idades de  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  e suas concentrações de U. Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 17 - Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) da amostra MG-161.



Em destaque os rutilos analisados com as idades de  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  e suas concentrações de U. Fonte: Elaborado pela autora.

**Figura 18** - Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) da amostra SSP-DH-10A2.

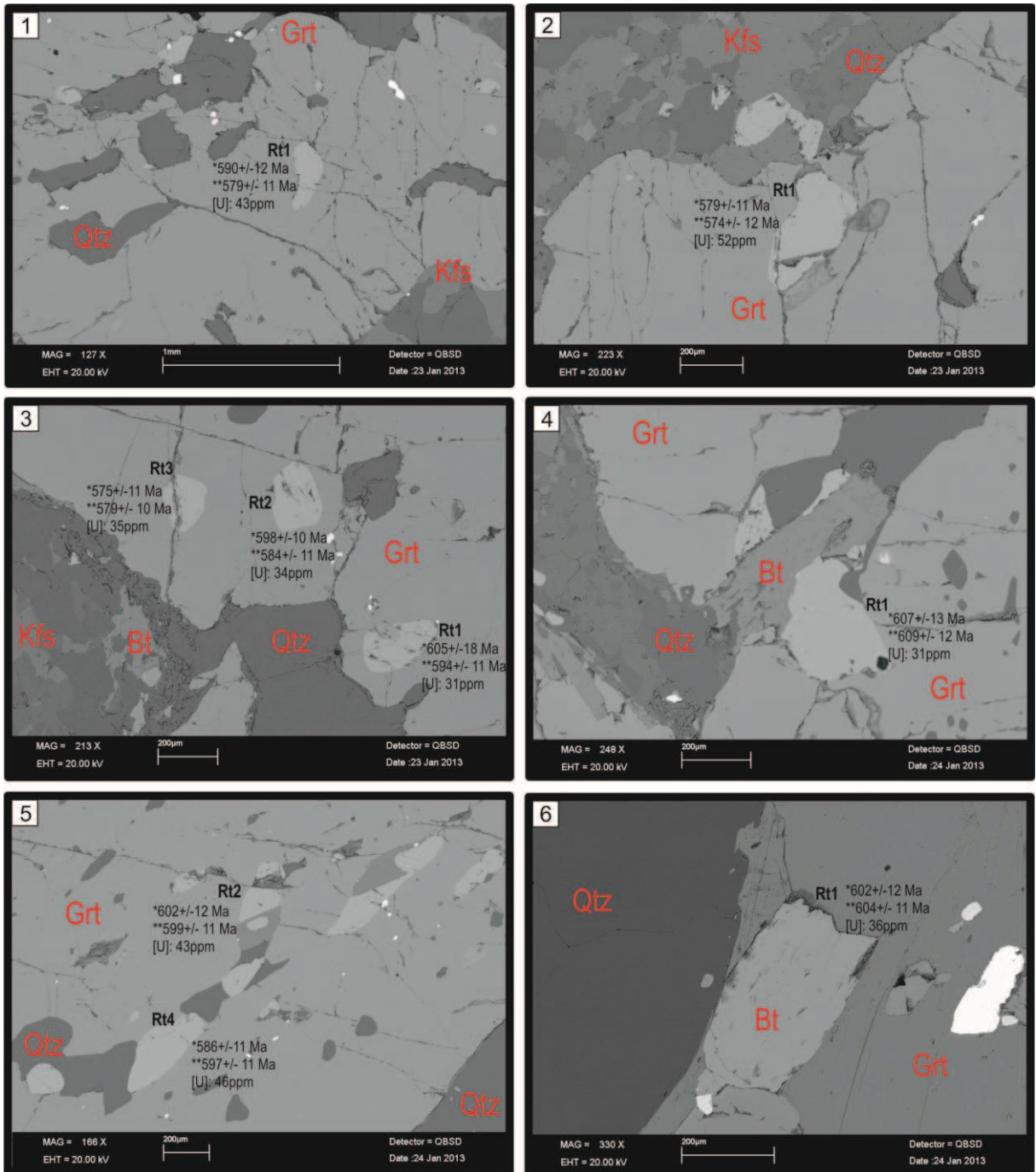
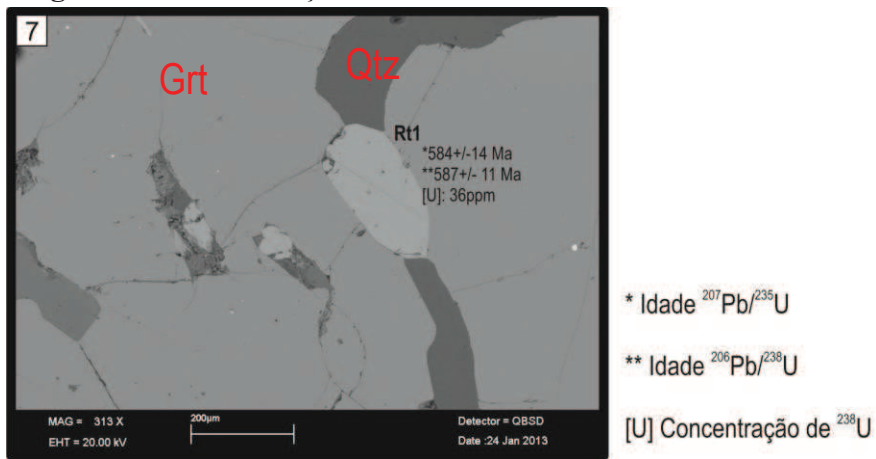
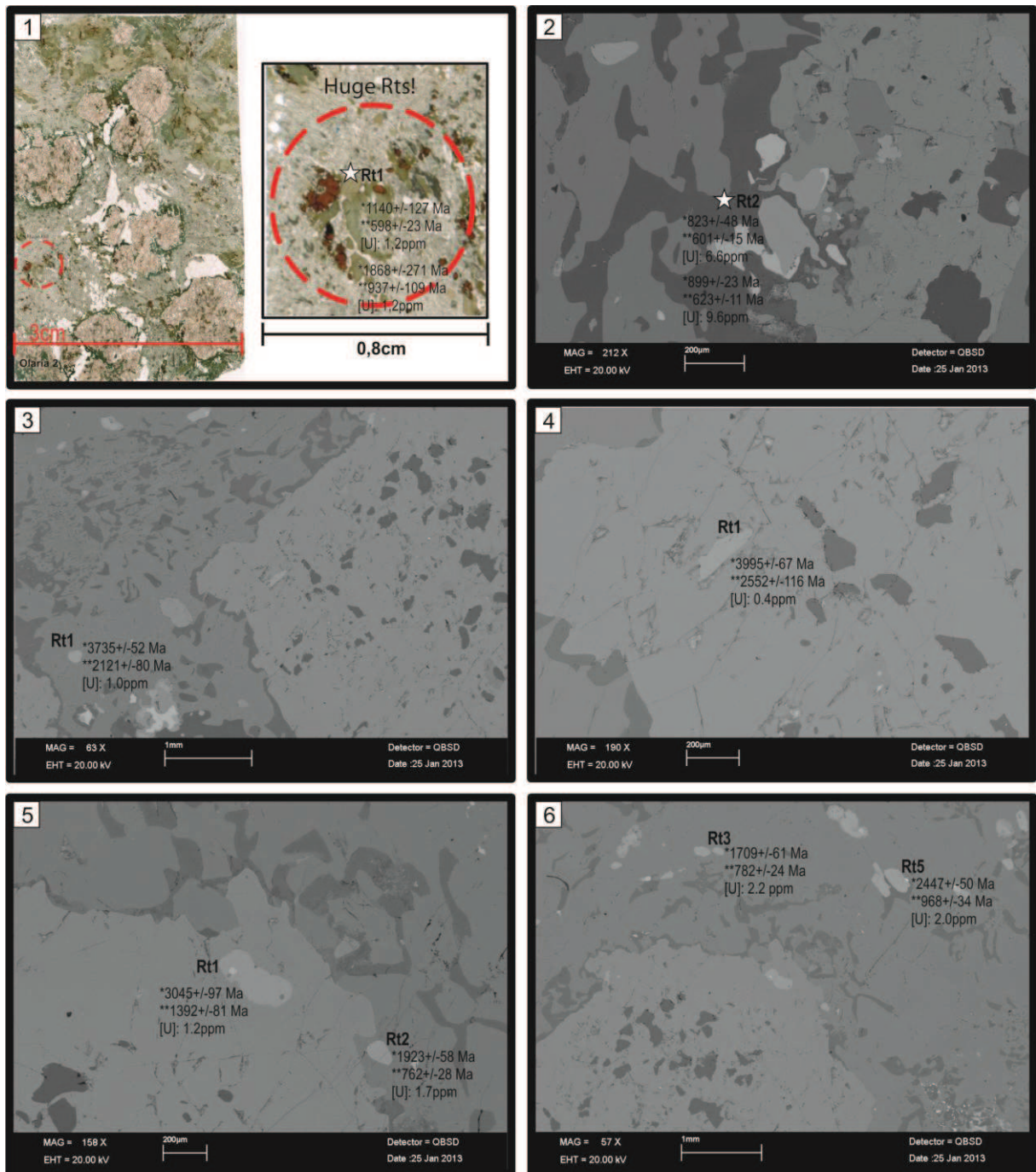


Figura 18 – Continuação.



Em destaque os rutilos analisados com as idades de  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  e suas concentrações de U. Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 - Imagens de elétrons retroespalhados (BSE) da amostra Olaria 2.



\* Idade  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  [U] Concentração de  $^{238}\text{U}$

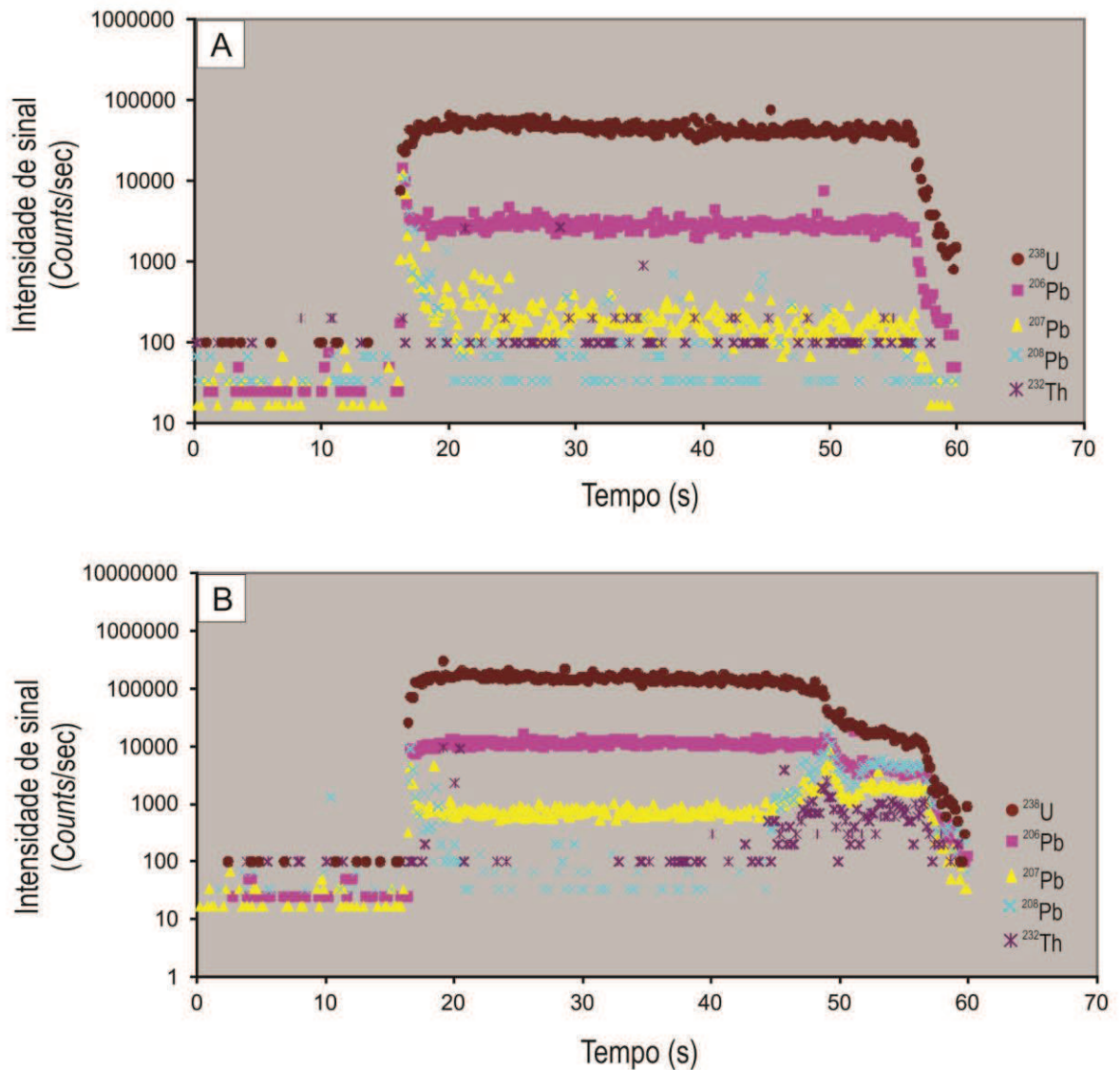
\*\* Idade  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ☆ Grão datado mais de uma vez

Em destaque os rutilos analisados com as idades de  $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  e suas concentrações de U. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 20 representa os gráficos de intensidades que mostram os sinais obtidos para o *background* e o pico (*time-resolved signal*). Na Figura 20A os sinais desenham um patamar

ao longo do tempo que o laser está ligado. Na Figura 20B é possível notar que o sinal cai anormalmente após aproximadamente 45 segundos de análise, o que invalida a análise.

**Figura 20** - Gráficos de intensidades que mostram os sinais obtidos para o background e o pico (*time-resolved signal*).



Em (A) sinal com intensidade constante ao longo do tempo em que o laser está ligado (gráfico da amostra SSP-DH-12A1, imagem em MEV n°1, Rt1); em (B) Má qualidade do sinal após aprox. 45 segundos de análise (gráfico da amostra SSP-DH-12A1, imagem em MEV n° 2, Rt1, análise 2). Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados obtidos para as amostras analisadas são apresentados na Tabela 3. R10 é o padrão utilizado para datação U-Pb em rutilos (Luvizotto *et al.*, 2009) e R13 um padrão do próprio laboratório (*in-house standard*) onde foram realizadas as análises.

**Tabela 3 - Dados isotópicos e respectivas idades obtidas para as amostras analisadas.**

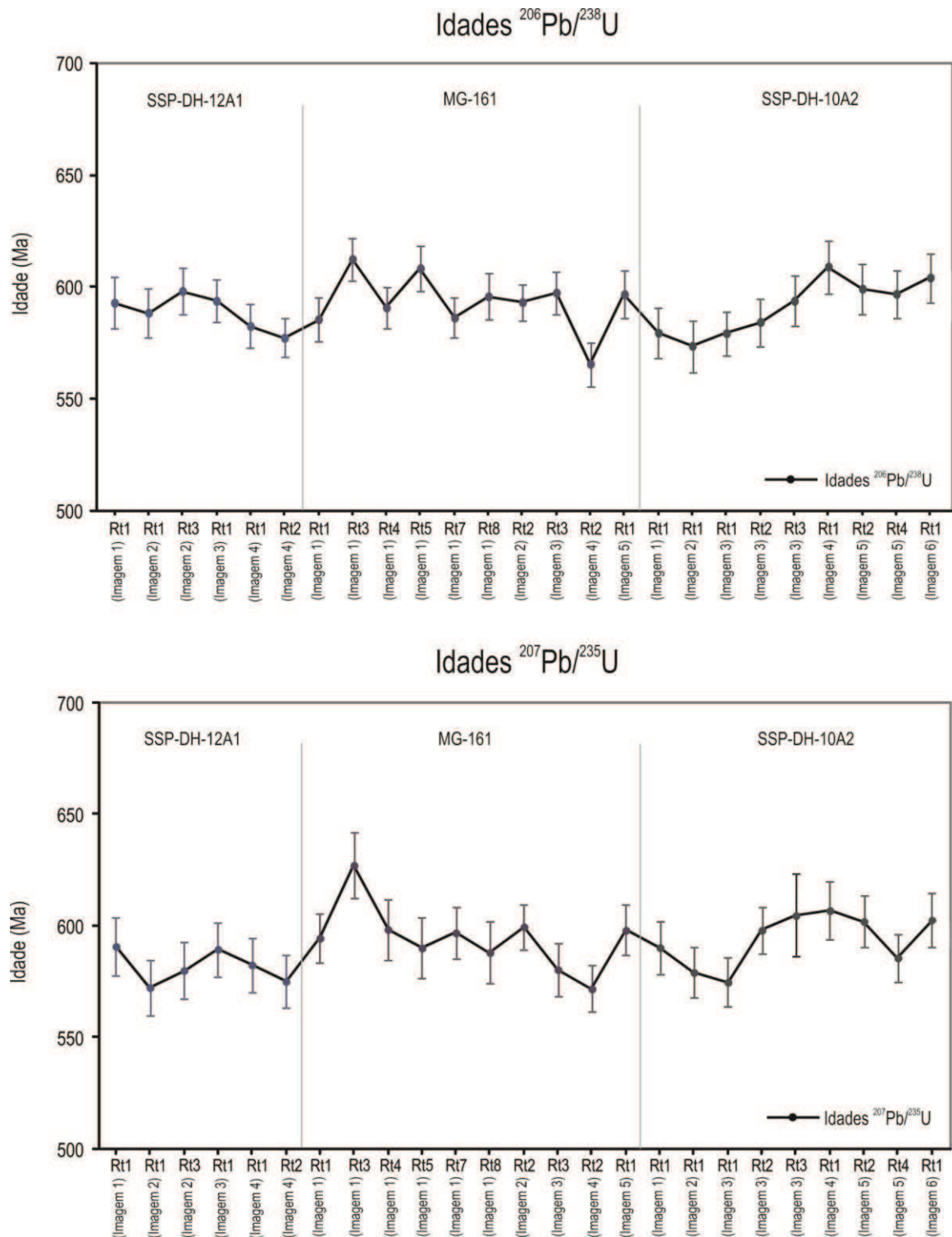
Amostra	Imag	U	Th	Razão <sup>206</sup> Pb/ <sup>208</sup> Pb	Razão <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	Erro 1s	Razão <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	Erro 1s	rho	Razão <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	Erro 1s	Idade <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	Erro 1s	Idade <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	Erro 1s
R10		48	<0.012	234	1.94	0.04	0.1829	0.0026	0.48	0.0771	0.0015	1096	14	1083	14
R10		48	0.007	277	1.92	0.04	0.1834	0.0026	0.52	0.0759	0.0013	1088	13	1085	14
R13		17	<0.008	>11	0.84	0.04	0.0815	0.0015	0.21	0.0746	0.0040	618	25	505	9
R13		17	<0.013	129	0.74	0.04	0.0825	0.0016	0.20	0.0648	0.0033	561	22	511	10
SSP-DH-12A1	1	36	0.037	172	0.71	0.02	0.0884	0.0018	0.47	0.0583	0.0016	545	13	546	10
SSP-DH-12A1	2	34	<0.009	339	0.79	0.02	0.0963	0.0019	0.45	0.0594	0.0016	591	13	593	11
SSP-DH-12A1	2	26	<0.012	189	0.76	0.02	0.0956	0.0019	0.43	0.0574	0.0015	572	12	588	11
SSP-DH-12A1	2	17	0.232	13	0.85	0.06	0.1004	0.0063	0.52	0.0618	0.0040	627	33	617	37
SSP-DH-12A1	3	24	<0.008	296	0.77	0.02	0.0972	0.0018	0.42	0.0575	0.0016	580	13	598	10
SSP-DH-12A1	4	26	<0.008	88	0.79	0.02	0.0965	0.0016	0.44	0.0591	0.0015	589	12	594	9
SSP-DH-12A1	4	27	0.033	29	0.77	0.02	0.0946	0.0017	0.44	0.0594	0.0015	582	12	582	10
SSP-DH-12A1	4	27	<0.010	>278	0.76	0.02	0.0937	0.0015	0.41	0.0590	0.0015	575	12	577	9
SSP-DH-12A1	4	50	3.033	4	0.64	0.02	0.0935	0.0016	0.33	0.0494	0.0018	501	15	576	10
R10		50	<0.009	947	1.93	0.04	0.1855	0.0027	0.58	0.0753	0.0012	1091	12	1097	15
R10		50	<0.014	>1,250	1.96	0.04	0.1872	0.0026	0.59	0.0759	0.0011	1101	12	1106	14
R13		14	0.020	58	0.69	0.03	0.0792	0.0017	0.30	0.0636	0.0024	536	16	491	10
R13		16	0.053	>125	0.56	0.02	0.0774	0.0015	0.26	0.0526	0.0020	452	14	481	9
MG-161	1	46	0.020	>70	0.80	0.02	0.0951	0.0017	0.47	0.0607	0.0014	594	11	586	10
MG-161	1	17	<0.012	>17	0.85	0.03	0.0996	0.0017	0.35	0.0622	0.0019	627	15	612	10
MG-161	1	28	<0.012	>319	0.80	0.02	0.0960	0.0016	0.36	0.0606	0.0017	598	14	591	9
MG-161	1	20	<0.010	>293	0.79	0.02	0.0989	0.0017	0.37	0.0577	0.0017	590	14	608	10
MG-161	1	29	<0.011	266	0.80	0.02	0.0952	0.0015	0.40	0.0609	0.0014	597	11	586	9
MG-161	1	21	<0.015	>246	0.78	0.02	0.0968	0.0018	0.35	0.0587	0.0018	588	14	596	10
MG-161	2	47	<0.010	355	0.80	0.02	0.0964	0.0014	0.43	0.0605	0.0013	599	10	593	8
MG-161	3	39	<0.011	>423	0.77	0.02	0.0971	0.0016	0.43	0.0576	0.0014	580	12	597	10
MG-161	4	48	<0.012	67	0.76	0.02	0.0917	0.0017	0.52	0.0598	0.0013	572	10	566	10
MG-161	5	42	<0.008	>468	0.80	0.02	0.0970	0.0018	0.54	0.0600	0.0013	598	11	597	11
R10		52	<0.011	>1,041	1.90	0.03	0.1822	0.0025	0.59	0.0756	0.0011	1080	12	1079	14
R10		52	<0.010	>980	1.91	0.04	0.1842	0.0027	0.55	0.0751	0.0012	1083	13	1090	15
R13		19	<0.010	185	0.75	0.03	0.0877	0.0019	0.27	0.0617	0.0026	566	18	542	12
R13		19	0.014	>166	0.64	0.03	0.0786	0.0016	0.34	0.0587	0.0024	500	17	488	10

R10	51	<0.011	896	1.91	0.04	0.1825	0.0030	0.52	0.0757	0.0013	1083	13	1081	17
R10	51	<0.009	>985	1.91	0.04	0.1845	0.0034	0.50	0.0750	0.0015	1084	14	1092	19
R13	18	<0.009	130	0.71	0.03	0.0875	0.0021	0.26	0.0591	0.0025	546	18	541	12
R13	19	0.013	>166	0.62	0.03	0.0786	0.0018	0.32	0.0569	0.0024	488	17	488	11
Olaria	1.2	0.015	2	5.29	1.47	0.1565	0.0194	0.02	0.2452	0.0742	<b>1868</b>	<b>271</b>	<b>937</b>	<b>109</b>
Olaria	1.2	0.033	9	2.07	0.36	0.0971	0.0039	0.05	0.1547	0.0274	<b>1140</b>	<b>127</b>	<b>598</b>	<b>23</b>
Olaria	10	0.042	9	1.40	0.05	0.0999	0.0025	0.40	0.1018	0.0036	<b>890</b>	<b>22</b>	<b>614</b>	<b>15</b>
Olaria	6.6	<0.010	12	1.27	0.11	0.0962	0.0027	0.13	0.0956	0.0085	<b>832</b>	<b>51</b>	<b>592</b>	<b>16</b>
Olaria	1.0	0.069	1	38.60	1.98	0.3895	0.0171	0.23	0.7187	0.0425	<b>3735</b>	<b>52</b>	<b>2121</b>	<b>80</b>
Olaria	0.4	0.058	1	48.67	3.58	0.4750	0.0382	0.24	0.7430	0.0706	<b>3966</b>	<b>76</b>	<b>2506</b>	<b>169</b>
Olaria	1.2	0.262	1	19.06	1.84	0.2411	0.0155	0.06	0.5733	0.0643	<b>3045</b>	<b>97</b>	<b>1392</b>	<b>81</b>
Olaria	1.7	<0.010	1.4	5.64	0.37	0.1255	0.0049	0.25	0.3262	0.0219	<b>1923</b>	<b>58</b>	<b>762</b>	<b>28</b>
Olaria	2.2	0.126	2	4.38	0.31	0.1289	0.0042	0.15	0.2464	0.0182	<b>1709</b>	<b>61</b>	<b>782</b>	<b>24</b>
Olaria	2.0	<0.013	1	10.14	0.54	0.1619	0.0061	0.27	0.4540	0.0254	2447	50	968	34
R10	52	<0.007	>1,028	1.97	0.04	0.1845	0.0037	0.56	0.0773	0.0015	1104	14	1092	20
R10	53	<0.013	857	1.90	0.04	0.1806	0.0037	0.62	0.0763	0.0014	1081	14	1070	20
R13	18	0.027	32	0.69	0.03	0.0871	0.0021	0.33	0.0574	0.0022	533	16	538	13
R13	16	<0.008	25	0.72	0.05	0.0874	0.0029	0.13	0.0597	0.0047	550	33	540	17
SSP-DH-10A2	43	<0.009	>500	0.79	0.02	0.0941	0.0019	0.46	0.0608	0.0015	590	12	579	11
SSP-DH-10A2	52	<0.012	372	0.77	0.02	0.0931	0.0020	0.57	0.0599	0.0013	579	11	574	12
SSP-DH-10A2	35	0.173	6.7	0.76	0.02	0.0940	0.0017	0.41	0.0587	0.0014	575	11	579	10
SSP-DH-10A2	34	0.009	9	0.80	0.02	0.0949	0.0018	0.48	0.0613	0.0013	598	10	584	11
SSP-DH-10A2	31	0.037	4	0.81	0.03	0.0965	0.0019	0.27	0.0612	0.0024	605	18	594	11
SSP-DH-10A2	34	<0.009	372.5	0.82	0.02	0.0991	0.0020	0.45	0.0598	0.0016	607	13	609	12
SSP-DH-10A2	43	<0.009	139	0.81	0.02	0.0974	0.0019	0.45	0.0602	0.0014	602	12	599	11
SSP-DH-10A2	46	<0.009	>250	0.78	0.02	0.0970	0.0018	0.42	0.0583	0.0014	586	11	597	11
SSP-DH-10A2	36	<0.014	>482	0.81	0.02	0.0982	0.0019	0.39	0.0598	0.0015	602	12	604	11
SSP-DH-10A2	92	0.133	17	0.78	0.02	0.0953	0.0018	0.38	0.0591	0.0017	584	14	587	11
R10	46	<0.007	>987	1.94	0.04	0.1851	0.0033	0.53	0.0762	0.0014	1097	14	1095	18
R10	46	<0.012	>425	1.93	0.04	0.1880	0.0033	0.53	0.0744	0.0014	1091	13	1111	18
R13	18	<0.012	>170	0.73	0.03	0.0844	0.0018	0.23	0.0628	0.0028	557	19	522	11
R13	18	<0.009	>152	0.69	0.03	0.0829	0.0019	0.33	0.0600	0.0022	531	16	513	11

Concentrações de U e Th e ppm. Idades em milhões de anos (Ma). Amostras em *italico*: Idades fora do padrão. Amostras em **negrito e itálico**: amostra Olaria 2.

Os resultados de idade apresentados na tabela são apresentados resumidamente nos gráficos da Figura 21.

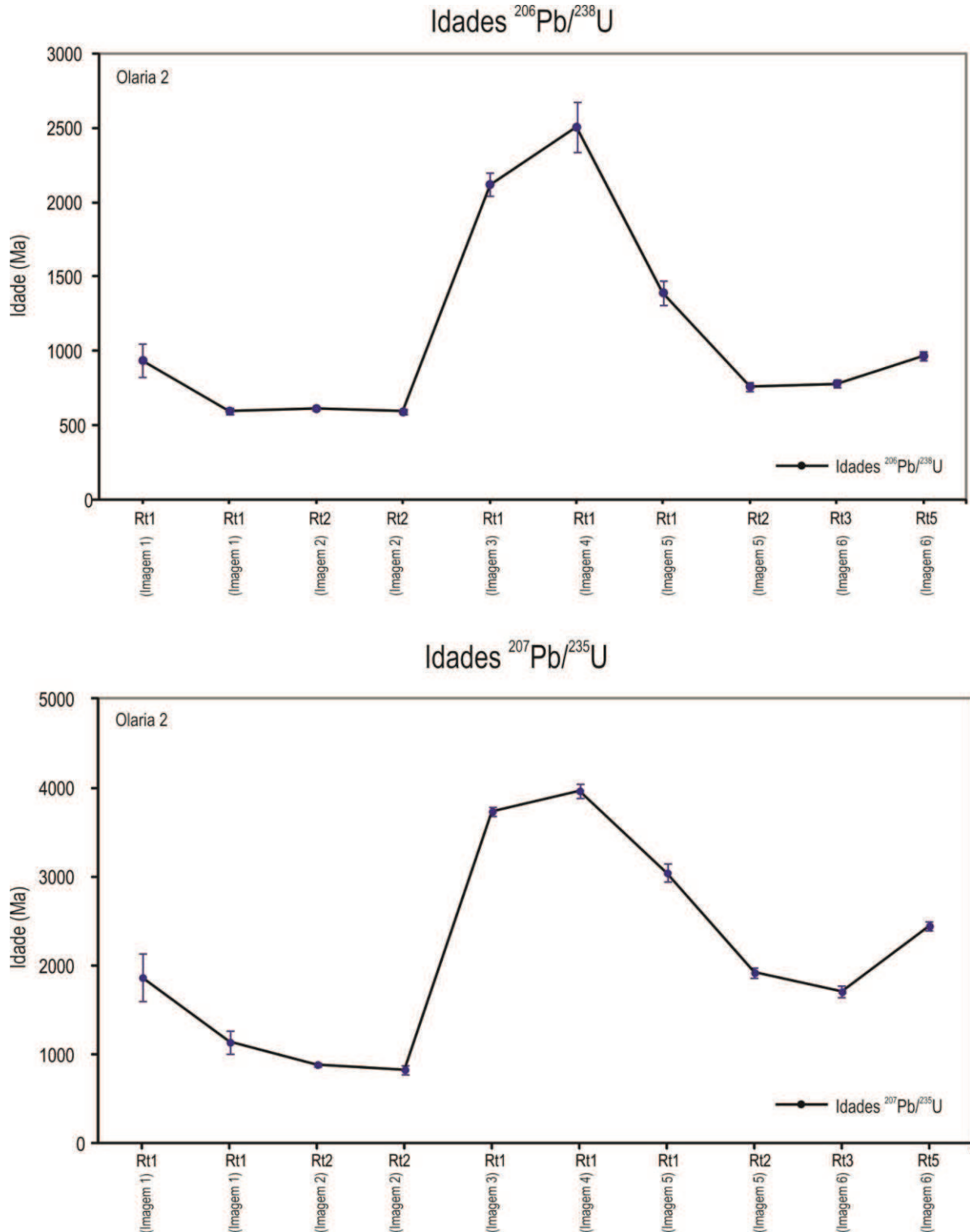
**Figura 21** - Sumário de idades das amostras analisadas e seus respectivos erros.



Fonte: Elaborado pela autora.

O sumário de idades da amostra Olaria 2 (figura 22) foi tratado separadamente pelo fato da amostra conter baixas concentrações de U, e altas concentrações de  $^{206}\text{Pb}$  o que será discutido ainda nesse capítulo.

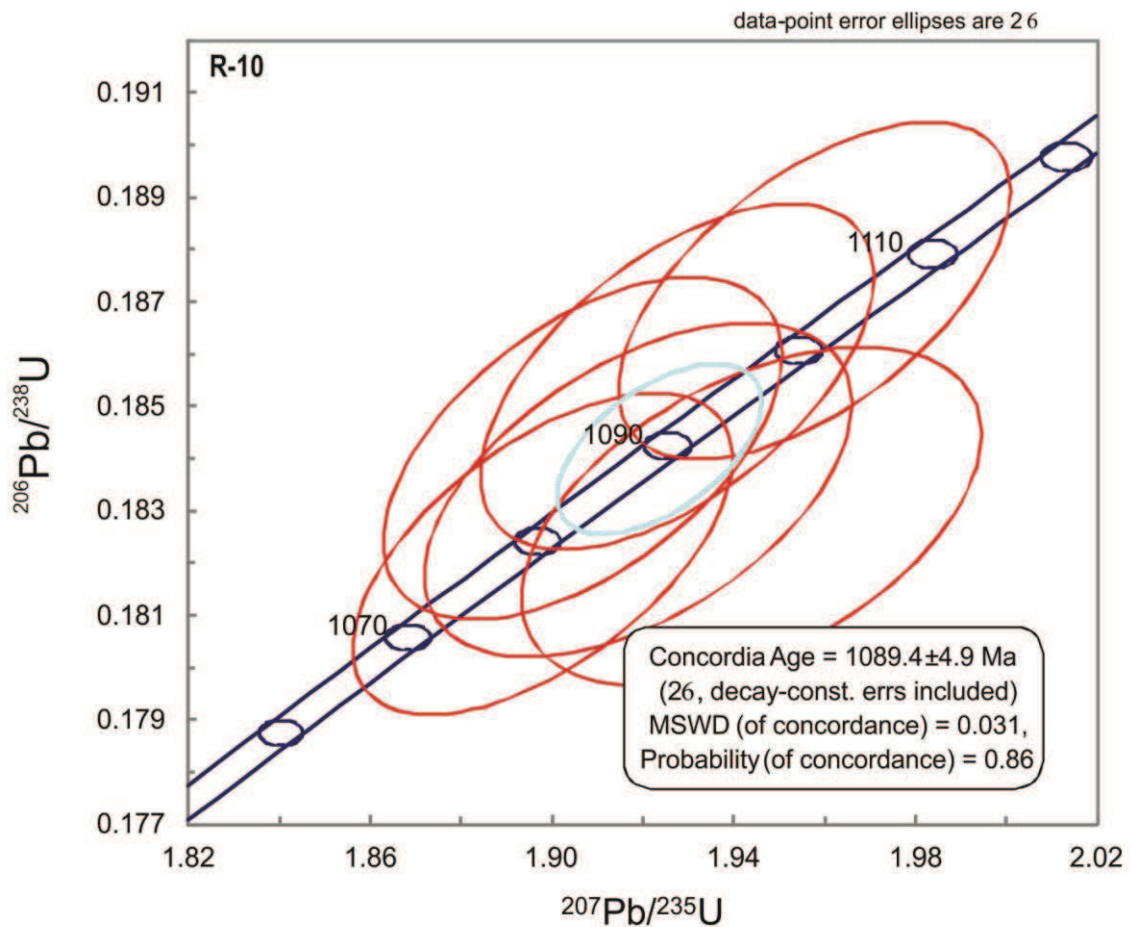
**Figura 22** - Sumário de idades da amostra Olaria 2 e seus respectivos erros.



Fonte: Elaborado pela autora.

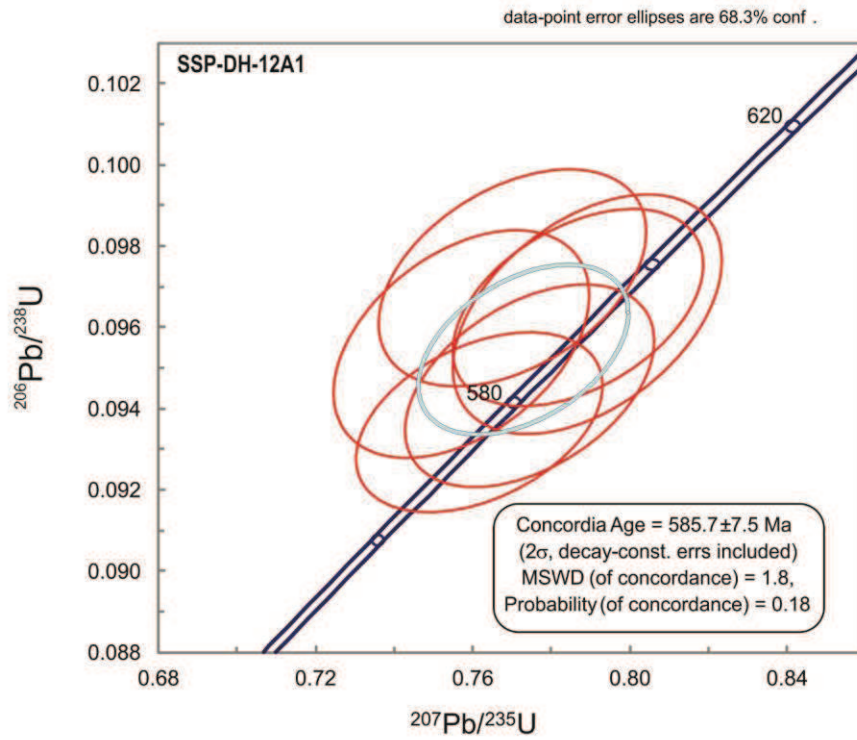
Abaixo seguem os Diagramas da Concórdia geradas para cada uma das análises. O primeiro diagrama (Figura 23) representa o padrão R-10 (Luvizotto *et al.*, 2009) e é apresentado como parâmetro de comparação das datações U-Pb obtidas para as amostras estudadas. O diagrama da Figura 24 representa a amostra SSP-DH-12A1, o diagrama da Figura 25 corresponde à amostra MG-161 e o diagrama da Figura 26 corresponde à amostra SSP-DH-10A2.

**Figura 23** - Diagrama da Concórdia para o padrão R-10.



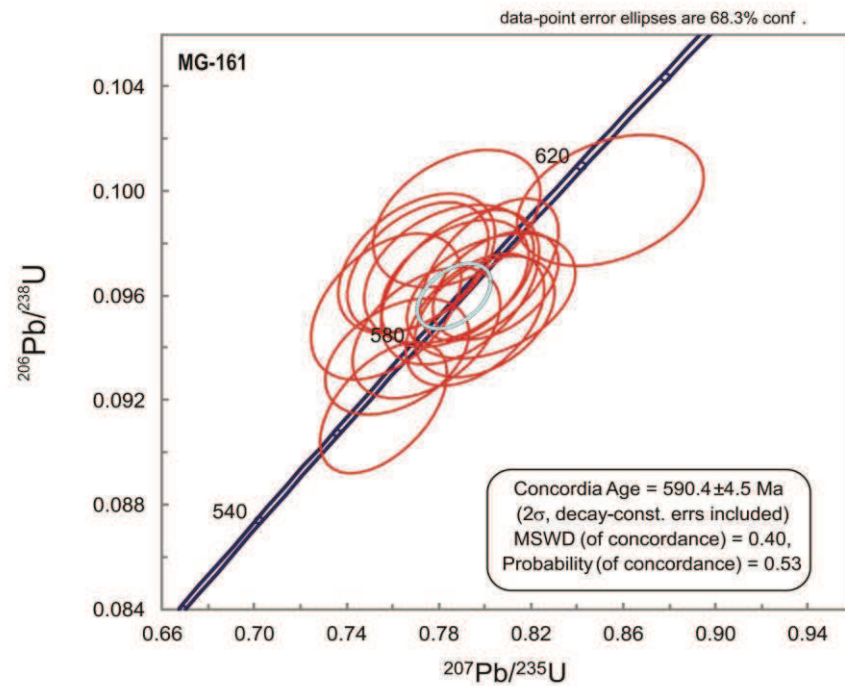
Fonte: Da autora.

**Figura 24** - Diagrama da Concórdia para a amostra SSP-DH-12A1.



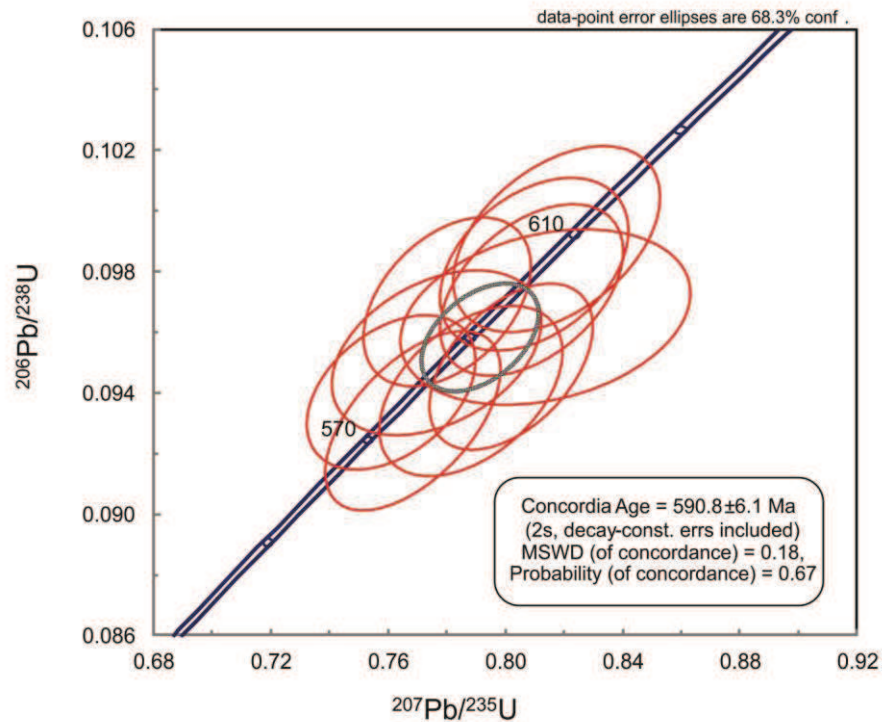
Fonte: Da autora.

**Figura 25** - Diagrama da Concórdia para a amostra MG-161.



Fonte: Da autora.

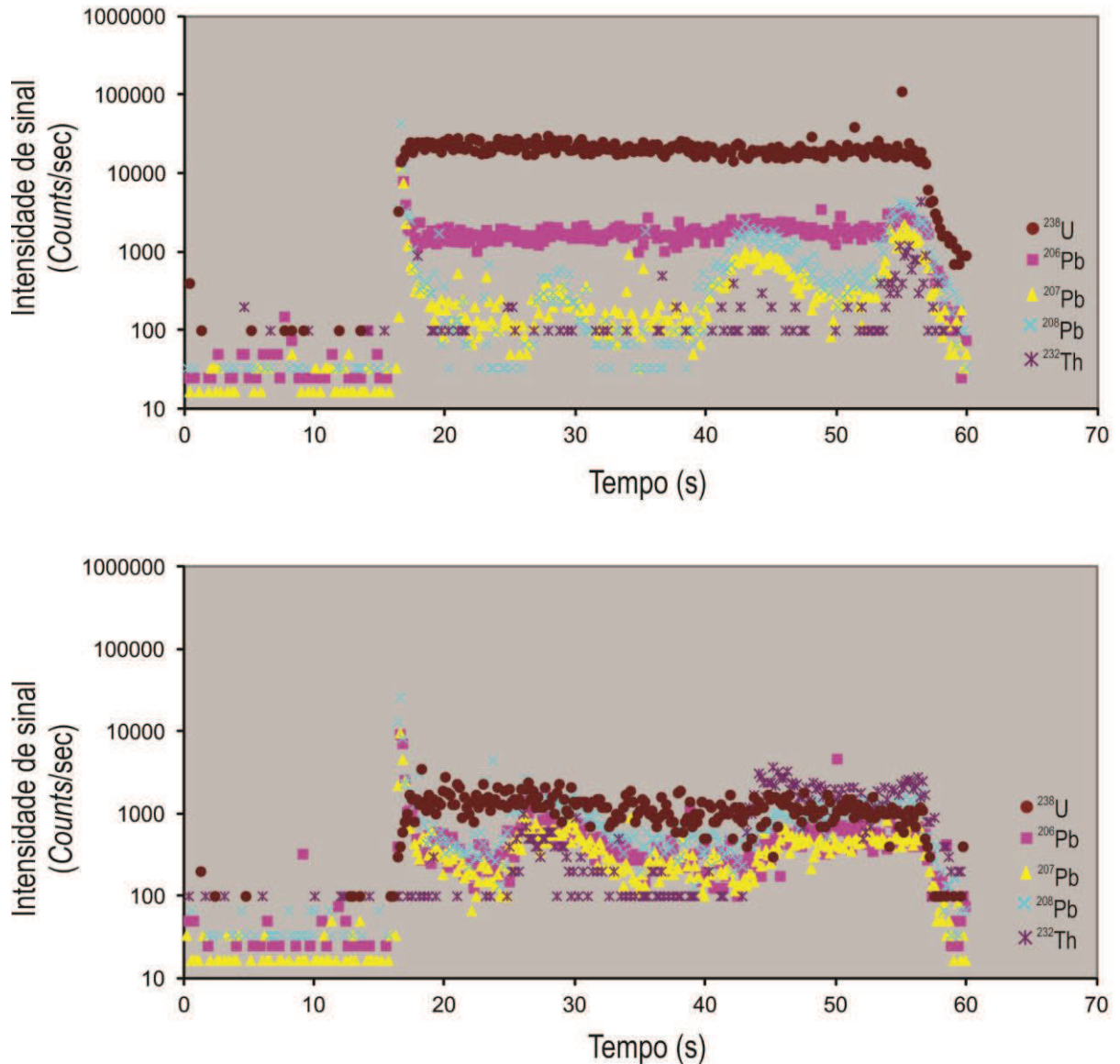
**Figura 26** - Diagrama da Concórdia para a amostra SSP-DH-10A2.



Fonte: Da autora.

As concentrações de U obtidas para a os rutilos da amostra Olaria são consideravelmente mais baixas quando comparadas com as concentrações obtidas para as demais amostras. Tal fato se relaciona com a própria natureza básica da rocha. As baixas concentrações de U, cerca de 1 ppm (ver Tabela 3), acarretam em erros analíticos bem maiores. Adicionalmente, as concentrações de  $^{208}\text{Pb}$  nos rutilos desta amostra, são significativamente mais elevadas (ver razão  $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$  na Tabela 3). Tal fato se deve provavelmente à inclusões submicroscópicas nos rutilos analisados ou fases minerais associadas à fraturas presentes em alguns grãos e pode ser comprovada pela instabilidade do sinal como é exemplificado na Figura 27.

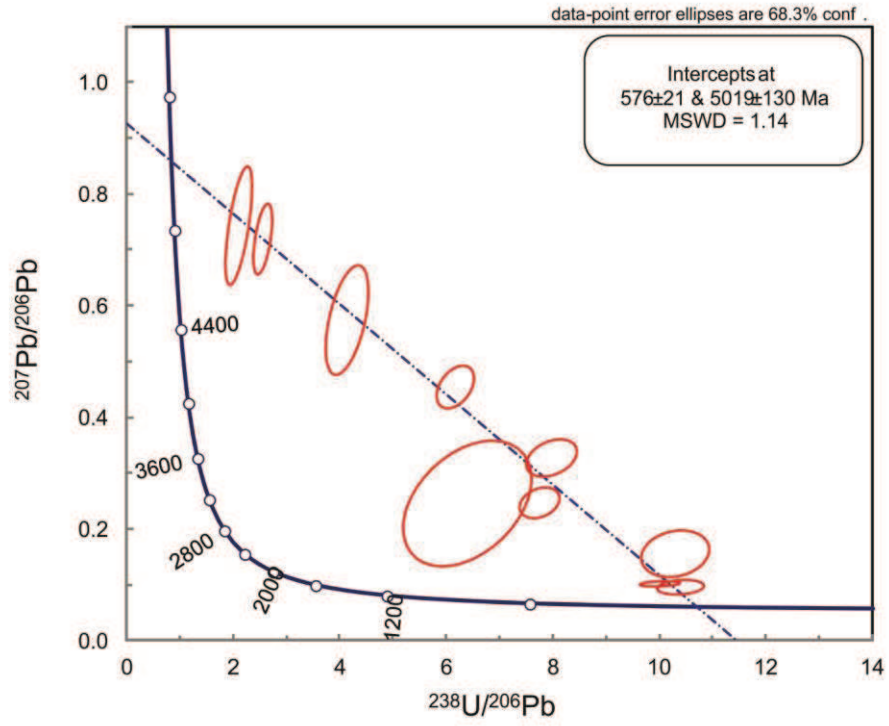
**Figura 27** - Exemplos de 2 análises da amostra Olaria 2 com forte instabilidade do sinal.



Fonte: Da autora.

A concentração relativamente alta de  $^{208}\text{Pb}$  nos rutilos da amostra Olaria impossibilita a correção do chumbo comum com  $^{208}\text{Pb}$ , aplicada nas demais amostras. Uma alternativa é não aplicar a correção do chumbo comum e utilizar o gráfico de *Tera-Wasserburg* para representar os dados (Figura 28). Os dados fornecem intercepto inferior com idade de  $576 \pm 21$  Ma, que se correlaciona bem, dentro do limite do erro, com as idades de 590 Ma obtidas para as demais amostras (Figuras 23 a 26). Nota-se, todavia, que os erros para a amostra Olaria são consideravelmente maiores, na casa dos 20 Ma.

Figura 28 - Gráfico de *Tera-Wasserburg* para a amostra Olaria 2.



Fonte: Da autora.

## 7 CONCLUSÕES

Analisando-se os diagramas apresentados nas figuras 23 a 26 e na Figura 28, é possível observar que os resultados são consistentes e indicam idade de 590 Ma., com erros consideravelmente baixos para as rochas metapelíticas. Essas idades corroboram os dados apresentados na literatura para a Nappe de Passos, onde idades de rutilo (VALERIANO *et al.*, 2004) e da monazita (VALERIANO *et al.*, 2004 e RENO *et al.*, 2011) fornecem ca. 590 Ma. e são interpretadas como sendo a idade de resfriamento, pós pico do metamorfismo.

Mezger *et al.*, (1989) e Möller *et al.*, (2000) afirmam que as idades do rutilo de maneira geral indicam resfriamento pós pico do metamorfismo. Mezger *et al.*, (1989), com base em dados de difusão iônica para outros elementos presentes na estrutura cristalina do rutilo e em idades U-Pb obtidas para rutilos de áreas onde o resfriamento é bem caracterizado, afirma que a temperatura de fechamento para rutilo com aproximadamente 500  $\mu\text{m}$  será cerca 420°C +/-30°C.

Com isso, as idades obtidas no presente trabalho, datam o momento pós pico na trajetória *P-T-t*, visto que a temperatura de fechamento do sistema U-Pb no rutilo é mais baixa que a do Zr (cerca de 700°C, ver por exemplo discussão em ZACK *et al.*, 2001). A temperatura de 450°C representa o momento em que o sistema fecha por completo, ou seja, entre o intervalo do pico de temperatura e a temperatura de fechamento, ocorre difusão, mas não necessariamente todo o Pb se perde por difusão. Portanto conclui-se que as amostras datadas representam o resfriamento e podem variar do instante logo após o pico de temperatura e a temperatura de fechamento (aproximadamente 450°C).

Os dados preliminares de temperatura das amostras analisadas neste trabalho (Trabalho de Conclusão de Curso do aluno Daniel Marinzek de Sousa, em preparação) indicam temperaturas entre 750°C a 850°C para as rochas pelíticas e 650°C a 750°C para o retroeclogito, e com isso é possível estimar a taxa de resfriamento para o intervalo de temperatura entre o pico de temperatura e o fechamento do sistema para U-Pb.

Admitindo-se temperatura de aproximadamente 800°C para o “pico de temperatura” dessas amostras e temperatura de 450°C do fechamento do sistema, temos uma diferença de 350°C. Ainda, de acordo com a literatura (VALERIANO, 2003 e RENO *et al.*, 2011) a idade do pico metamórfico da região da Nappe de Passos ocorreu por volta de 630 Ma, e as idades de rutilo desse trabalho que representam o resfriamento, obtemos uma diferença próxima de 40 Ma. As diferenças de temperatura e idade então, nos fornece uma taxa de resfriamento de 8.7°C/Ma, o que é extremamente elevado, considerando que a temperatura aumenta cerca de

30°C por Km, ou seja, por cada 33 a 34 metros de profundidade a temperatura aumenta 1°C. Isto implicaria em uma exumação bastante rápida para as rochas da área de estudo. Todavia, é possível que outros fatores além da taxa de exumação influenciem os resultados apresentados. Por exemplo, a deformação paralela aos estratos, responsável pelo transporte tectônico da Nappe de Passos, pode resultar em taxas aparentes de exumação extremamente elevadas, já que este processo é responsável pelo transporte de rochas de alto grau metamórfico para porções mais rasas da crosta. Observa-se com isso, uma questão a ser estudada futuramente para melhor caracterizar a taxa de resfriamento desta porção da Nappe de Passos.

Os dados obtidos no presente trabalho estão também em consonância com idades de resfriamento apresentadas para o Complexo Andrelândia (RENO *et al.*, 2012). Os próprios autores já haviam ressaltado a correlação destas idades com idades apresentadas por Valeriano *et al.*, (2004) para região norte do Complexo da Nappe de Passos. Todavia, tal correlação ainda não havia sido feita para a porção sul da Nappe de Passos, área do presente estudo. Ressalta-se que na área estudada estão presentes as únicas ocorrências de retro-eclogito descritas para a Nappe de Passos. É também a região onde foram descritas as rochas de mais alta temperatura da nappe. Rochas semelhantes ocorrem na região de Andrelândia. Portanto, os resultados aqui apresentados corroboram a correlação das rochas da Nappe de Passos com as rochas do Complexo de Nappes de Andrelândia.

## 8 BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, F.F.M.; HASUY, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.D. Brazilian Structural Provinces: an introduction. **Earth Science Rev.**, v.17, 1981, p. 1-29.

BARBOSA, O. Guia das excursões do IX Congresso da Sociedade Brasileira de Geologia, **Notas da Sociedade Brasileira de Geologia.**, São Paulo, 1955. v.3, p.3-5.

CAMPOS NETO, M.C.; CABY, R. Neoproterozoic high-pressure metamorphism and tectonic constraint from the nappe system south of the São Francisco Craton, southeast Brazil. **Precambrian Research**, v. 97, 2005, p. 3-26.

CAVALCANTE, J.C.; CUNHA, H.C. das; CHIEREGATTI, L.A.; KEFFER, L.Q.; ROCHA, J.M. da; DAITX, E.C.; COUTINHO, M.G. da; YAMAMOTO, K.; DRUMOND, J.B.V.; ROSA, D.; RAMALHO, R. **Projeto Sapucaí**. São Paulo: CPRM-DNPM, 4 mapas. Relatório Final, 1979. 299p.

DELGADO IM, SOUZA JD, SILVA LC, SILVEIRA FILHO NC, SANTOS RG, PEDREIRA AJ, GUIMARÃES JT, ANGELIM LAA, VASCONCELOS AM, GOMES IP, LACERDA FILHO JV, VALENTE CR, PERROTTA MM & HEINECK CA. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: BIZZI LA, SCHOBENHAUS C, VIDOTTI RM & GONÇALVES JH (Eds.). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG. CPRM, 2003, p. 227-334.

FONSECA, M. A.; DARDENNE, M. A.; UHLEIN, A. Faixa Brasília Setor Setentrional: Estilos Estruturais e Arcabouço Tectônico. **Rev. Bras. de Geociências**. 25 (4): 1995. 267-278.

FUCK, R.A.; PIMENTEL, M. M.; DEL-REY SILVA, L. J. H. Compartimentação tectônica da porção oriental da Província Tocantins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, 1994, Camboriú. **Anais**. Camboriú, SBG, p. 215-216..

GRAY, A.L., **The ICP as an ion source - origins, achievements and prospects**, Spectrochimica Acta, 41B, 10-12, 1985, p.1525-1537.

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, M. C.; SILVA, L. C.; TROUW, R. A. J.; JANASI, V. A. Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES; B. B (Org.). **Geologia do Continente Sul-Americano “Uma evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida”**. São Paulo: Beca, 2004. Cap. 13, p. 203-236.

JARVIS, I. e JARVIS, K. "Plasma spectrometry in the earth sciences: techniques, applications and future trends" - **Chemical Geology** - v. 95, 1992 p. 1-33.

KESTENBAC, H.J.; BOTA FILHO W.J. Microscopia eletrônica transmissão e varredura. São Paulo: ABM, 1994.

LUVIZOTTO, G. **Caracterização metamórfica das rochas do Grupo Araxá na região de São Sebastião do Paraíso, sudoeste de Minas Gerais**. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 2003.

LUVIZOTTO, G.L. ; SIMOES, L. S. A. ; MORAES, R. ; de Souza, D. M. ; CARNEIRO, H. P. . High-Pressure Granulite facies rocks from the Passos Nappe in São Sebastião do Paraíso - MG, Brazil. In: 12 Simpósio de Geologia do Sudeste, 2011, Nova Friburgo. **Anais do 12 Simpósio de Geologia do Sudeste**, 2011.

MEZGER, K.; HANSON, G.N.; BOHLEN, S.R. Highprecision U-Pb ages of metamorphic rutile: application to the cooling history of high-grade terranes. **Earth and Planetary Science Letters**, 1989, 96:106-118.

MORALES, N; ZANARDO, A; SIMÕES, L.S.A.; GODOY, A.M. A zona de cisalhamento Campo do Meio na região entre Fortaleza de Minas e Alpinópolis, sul de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 3, 1991, Rio Claro. **Boletim**. Rio Claro: Sociedade Brasileira de Geologia. 1991. p.34-36.

MORALES, N; ZANARDO, A; HASUI, Y; SIMÕES, L.S.A. Evolução Tectônica do Grupo Araxá nas Serras do Chapadão e da Fortaleza, Sudoeste do Estado de Minas Gerais. **Geociências**, São Paulo, v. 15(n.esp.), 1996, p. 41-66.

NOCE, C. M.; MACHADO, N. Eventos de cisalhamento e mineralização aurífera na região nordeste do Quadrilátero Ferrífero: considerações baseadas em análises U-Pb de rutilo e titanita. **Geonomos**, Belo Horizonte, 1998, v. 6, n.1, p. 21-24,

PATTISON, D. R. M., CHACKO, T., FARQUHAR, J. and McFARLANE, C. R. M.: Temperatures of granulite-facies metamorphism: constraints from experimental phase equilibria and thermobarometry corrected for retrograde exchange. **Journal of Petrology**, 44(5), 2003, p. 867-901.

PEUCAT,J.J. & VIDAL,P. -**Geochronology**. In: ZOUBEK,V., COGNÉ,J., KOZHOUKHAROV,D., KRAUTNER,H.G. - Precambrian in younger fold belts. European Variscides, the Carpathians and Balkans (International Geological Correlation Programme, project 22). Chichester, John Wiley, 1988, p. 49-67.

RENO, B. L.; PICCOLI, P. M.; BROWN, M.; TROUW, R. A. J. In situ monazite (U–Th)–Pb ages from the Southern Brasília Belt, Brazil: constraints on the high-temperature retrograde evolution of HP granulites. **Journal of Metamorphic Geology**, 2011 29: 1,– 32.

SATO, K., KAWASHITA K., Espectrometria de Massas em Geologia Isotópica – **Revista do Instituto de Geociências - USP.**; v.2, 2002, p.57-77.

SEER, H.J. **Evolução tectônica dos grupos Araxá, Ibiá e Canastra na sinforma de Araxá, Araxá, Minas Gerais.** 267f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

SIMÕES, L., VALERIANO, C. Porção meridional da Faixa de Dobramentos Brasília; estágio atual do Conhecimento, 1990.

SIMÕES, L. **Evolução tectono-metamórfica da Nappe de Passos, sudoeste de Minas Gerais.** Ph.D. thesis, IG-Universidade de São Paulo, 1995.

SHIBUYA, E. K., **Acoplamento Laser - Espectrômetro de Massa de Dupla Focalização do Fonte de Plasma Induzido (La-Hr-Icpms): Estudos Fundamentais e Análises Quantitativas em Amostras Sólidas.** Tese de Mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), autarquia da Universidade de São Paulo, 1999.

TOMKINS, H. S., POWELL, R. & ELLIS, D. J. THE PRESSURE DEPENDENCE OF THE ZIRCONIUM-INRUTILE THERMOMETER. **Journal Of Metamorphic Geology**, 2007, 25(6), p. 703-713.

VALERIANO, C.M.; ALMEIDA, J. C.H.; SIMÕES, L.S.A.; DUATT, B.P.; ROIG, H.; HEILBRON, M. Evolução estrutural do Domínio Externo da Faixa Brasília no sudoeste de Minas Gerais: registros de uma tectônica pré-Brasíliana. **Revista Brasileira de Geociências**, 1995, 25(4), p.221-234.

VALERIANO, C., TEIXEIRA, W., HEILBRON, M., SIMÕES, L. Southern Brasilia belt (SE Brazil): tectonic discontinuities, K-Ar data and evolution during the Neoproterozoic Brasiliano orogeny. **Revista Brasileira de Geociências**, 2000, 20: p.93–110.

VALERIANO, C. M.; DARDENNE, M. A.; FONSECA, M. A.; SIMÕES, L. A.; SEER, H. J. Evolução tectônica da Faixa Brasília. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES; B. B (Org.). **Geologia do Continente Sul-Americano “Uma evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida”.** São Paulo: Beca, 2004. Cap. 32, p. 574-594.

VALERIANO, C.M.; MACHADO, N.; SIMONETTI, A.; VALLADARES, C.S.; SEER, H.J.; SIMÕES, L.S. U-Pb geochronology of the southern Brasília Belt (SE Brazil): sedimentary provenance, Neoproterozoic orogeny and assembly of West-Gondwana. **Precambrian Research**, 2004, 130(1-4) p. 27-55.

ZACK, T.; VON EYNATTEN, H. & KRONZ, A. Rutile geochemistry and its potential use in quantitative provenance studies. **Sedimentary Geology**, 2004.

ZACK, T., STOCKLI, D., LUVIZOTTO, G., BARTH, M., WOLFE, M., HINTON, R., BERNDT-GERDES, J., KOOIJMAN, E., In-situ U/Pb rutile dating by LA-ICP-MS: 208Pb correction and prospects for thermochronological applications. *Contributions to Mineralogy and Petrology* . 2011.

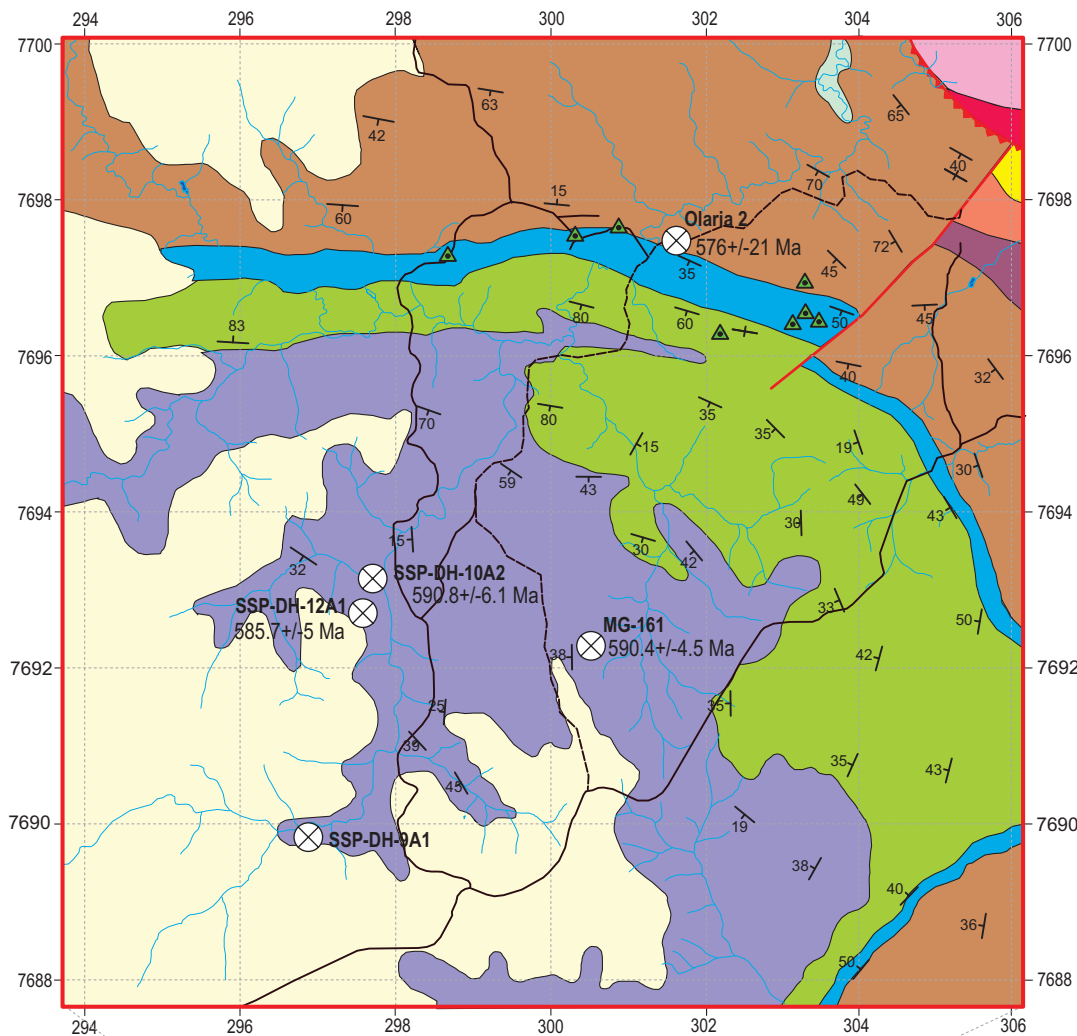
ZANARDO, A. **Análise petrográfica, estratigráfica e microestrutural da região de Guaxupé-Passos- Delfinópolis (MG)**. Ph.D. thesis, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Brazil, 1992.

ZANARDO, A.; OLIVEIRA, M.A.F.; DEL LAMA, E.A. Geologia do Grupo Araxá na região de Passos – São Sebastião do Paraíso, sul de Minas Gerais. **Geociências**, São Paulo, v. 15, n. 1, 1996, p. 253-27.

WETHERILL G. W.. Discordant U-Pb ages, I. *Transactions – American Geophysical Union*, 1956. 37, p. 320-326.

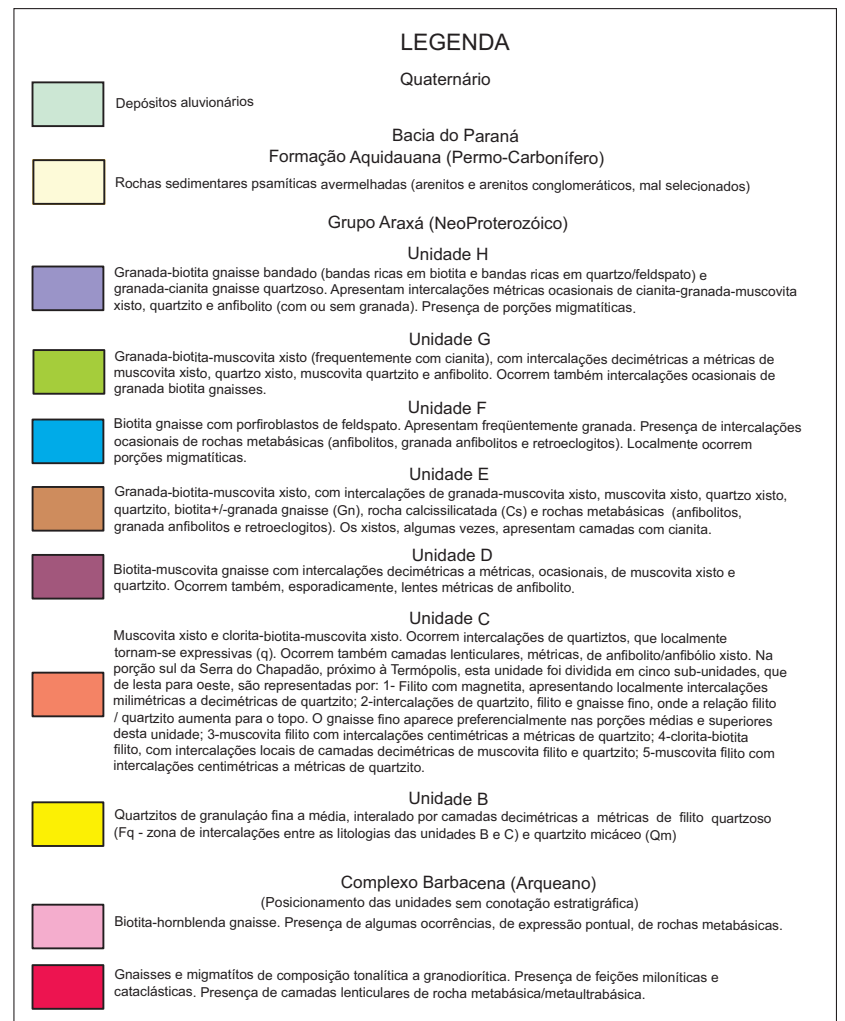
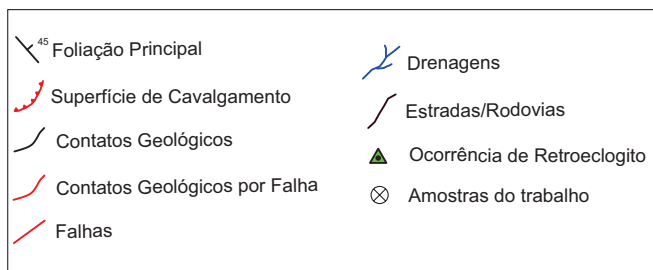
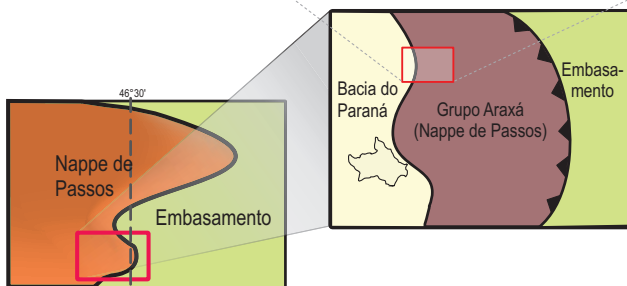
## **ANEXO I**

Mapa Geológico 1:50 000 com localização e idade das amostras



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR

ESCALA 1:50 000



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas

---

**Trabalho de Conclusão de Curso**

---

**ANEXO I:**  
Mapa Geológico 1:50000 com a Localização e Idade das Amostras

---

Aluna: Mariana Diniz Silvestre  
Orientador: George Luiz Luvizotto

---

Julho, 2013

## **ANEXO II**

Tabela Descritiva da análise dos rutilos em cada amostra

Sample	BSE/ FILE/name	Rutile	mtx/incl	Host mineral	Location (rim or core)	aprox size (mm)	Cracks ( When included)	obs
MG-101	MG-101-1	Rt1	Inc	Grt	Core	0.4X0.3	yes	
		Rt2	Inc	Grt	Core	0.3X0.2	no	
		Rt3	Inc	Grt	Core	0.175X0.2	no	
		Rt4	Inc	Grt	Core	0.4X0.4	yes	
		Rt5	Inc	Grt	Core	0.5X0.3	no	
		Rt6	Inc	Grt	Core	0.5X0.3	yes	
		Rt7	Inc	Grt	Core	0.3X0.25	no	
		Rt8	Inc	Grt	Core	0.3X0.3	no	
MG-101-2	MG-101-2	Rt1				0.4X0.3	yes	
		Rt2				0.4X0.2	no	
MG-101-3	MG-101-3	Rt1	Inc	Grt	Core	0.4X0.2	yes	
		Rt2	Mtx			0.2X0.2	no	
		Rt3	Inc	Grt	Core	0.4X0.4	no	
		Rt4	Mtx			0.3X0.2	no	
		Rt5	Mtx			0.4X0.2	yes	
MG-101-4	MG-101-4	Rt1	Mtx			0.35X0.2	yes	
		Rt2	Inc	Grt	Rim	0.35X0.3	yes	
MG-101-5	MG-101-5	Rt1	Inc	Grt	Core	0.1X0.15	yes	
		Rt2	Inc	Grt	Core	0.1X0.2	yes	
		Rt3	Inc	Grt	Core	0.1X0.25	yes	
MG-101-7	MG-101-7	Rt1	Inc	Grt	Core	0.4X0.3	yes	
		Rt2	Inc	Grt	Core	0.15X0.15	no	
		Rt3	Inc	Grt	Core	0.3X0.2	no	
		Rt4	Inc	Grt	Core	0.15X0.2	yes	
MG-101-8	MG-101-8	Rt	Inc	Grt	Core	0.5X0.2	yes	
MG-101-9	MG-101-9	Rt	Inc	Grt	Rim	0.1X0.35	no	
MG-101-11	MG-101-11	Rt	Inc	Grt	Core	0.1X0.35	no	
MG-101-12	MG-101-12	Rt1	Inc	Grt	Core	0.175X0.1	yes	
		Rt2	Inc	Grt	Core	0.1X0.15	yes	

	Rt3	Inc	Grt	Core	0.08X0.15	no
MG-101-12B	Rt1	Inc	Grt	Core	200X100 (um)	no
	Rt2	Inc	Grt	Core	200X100 (um)	no
	Rt2	Inc	Grt	Core	100X150(um)	no
MG-101-13	Rt	Inc	Grt	Rim	150X180(um)	yes
MG-101-14	Rt	Inc	Grt	Core	220X50(um)	no

---

Sample	BSE/ FILE/name/	Rutile	mtx/incl	Host mineral	Location (rim or core)	aprox size (um)	Cracks ( When included)	obs
<b>Olaria 2</b>	Olaria 2.1pe	Rt1	Inc	Grt	Core	150X70	no	
		Rt2	Inc	Grt	Core	50X80	no	Small rutile
Olaria 2.3pe		Rt1	Inc	Grt	Core	100X100	yes	
		Rt2	Inc	Grt	Core	70X100	no	
		Rt3	Inc	Grt	Core	50X100	no	
		Rt4	Inc	Grt	Core	60X50	no	Small rutile
Olaria 2.4pe		Rt	Inc	Grt	Core	100X150	yes	
Olaria 2.5pe		Rt	Inc	Grt	Core	150X250	yes	
Olaria 2.6gr		Rt1	Inc	Grt	Core	200X50	yes	
		Rt2	Inc	Grt	Core	200X80	no	
		Rt3	Inc	Grt	Core	170X50	no	
		Rt4	Inc	Grt	Core	200X300	yes	
		Rt5	Inc	Grt	Core	200X300	no	
Olaria 2.6pe		Rt1	Inc	Grt	Core	250X200	yes	
		Rte	Mtx			150X100	yes	

Sample	BSE/ FILE/name/	Rutile	mtx/incl	Host mineral	Location (rim or cor	aprox size (um)	acks ( When inclu	obs
SSP-DH-9A1	SSP-DH-9A1.3pe	Rt	Inc	Grt	Core	50X400	yes	
	SSP-DH-9A1.4pe	Rt	Inc	Grt	Core	50X50	yes	
	SSP-DH-9A1.5pe	Rt	Mtx			200X250	yes	
	SSP-DH-9A1.6pe	Rt1	Inc	Grt	Rim	120X200	no	
		Rt2	Inc	Grt	Rim	100X200	yes	
	SSP-DH-9A1.8pe	Rt	Inc	Grt	Rim	100X300	yes	
	SSP-DH-9A1.9pe	Rt1	Inc	Grt	Core	50X300	no	
		Rt2	Inc	Grt	Core	50X100	no	
	SSP-DH-9A1.10Ape	Rt	Inc	Grt	Core	130X300	yes	
	SSP-DH-9A1.11Ape	Rt	Inc	Grt	Core	20X80	yes	
	SSP-DH-9A1.13Ape	Rt1	Inc	Grt	Core	70X100	yes	
		Rt2	Inc	Grt	Core	70X80	yes	
		Rt3	Inc	Grt	Core	80X100	yes	
		Rt4	Inc	Grt	Core	70x90	no	
		Rt5	Inc	Grt	Core	100X150	yes	
	SSP-DH-9A1.15pe	Rt	Mtx			80X250	yes	
	SSP-DH-9A1.16pe	Rt	Inc	Grt	Core	100X250	yes	
	SSP-DH-9A1.20pe	Rt	Inc	Grt	Core	50X400	yes	
	SSP-DH-9A1.27pe	Rt	Inc	Grt	Core	80X70	yes	
	SSP-DH-9A1.30pe	Rt1	Inc	Grt	Rim	250X400	yes	
		Rt2	Inc	Grt	Rim	100X150	yes	
	SSP-DH-9A1.32pe	Rt	Inc	Grt	Rim	150X350	yes	
	SSP-DH-9A1.39pe	Rt	Inc	Grt	Rim	70X100	yes	

Sample	BSE/ FILE/name/	Rutile	mtx/incl	Host mineral	Location (rim or core)	aprox size (um)	Cracks ( When included)	obs
SSP-DH-10A2	SSP-DH-10A2.1A	Rt1	Inc	Grt	Core	150x300	yes	no visible alteration along the cracks
		Rt2	Inc	Grt	Rim	50x40	no	
		Rt3	Mtx			100x200		small grain without cracks
	SSP-DH-10A2.1B	Rt1	Inc	Grt	Rim	400x200	yes	in Contact with Grt and Qtz,Zr right at the Garnet Rim
		Rt2	Inc	Grt			yes	
	SSP-DH-10A2.1C	Rt1	Inc	Grt	Rim	200x150	yes	
		Rt2	Inc	Grt	Core	150x200	yes	
		Rt3	Inc	Grt	Core	100x200	yes	
	SSP-DH-10A2.2	Rt1	Inc	Grt	Core	50x100	no	small grain without cracks
		Rt2	Inc	Grt	Core	100x150	yes	
		Rt3	Inc	Grt	Core	120X50		
	SSP-DH-10A2.3	Rt	Inc	Grt	Core	150X200	yes	
	SSP-DH-10A2.8pe	Rt	Inc	Grt	Core	50X100	no	
	SSP-DH-10A2.12pe	Rt1	?	?	Rim	250X300	no	
		Rt2			Rim	100X200	yes	
	SSP-DH-10A2.13pe	Rt1	Inc	Grt	Core	50X10	no	
		Rt2	Inc	Grt	Core	70X50	no	
		Rt3	Inc	Grt	Core	40X100	yes	
		Rt4	Inc	Grt	Core	30X100	yes	
	SSP-DH-10A2.17A	Rt1	Inc	Grt	Core	100X250	yes	
		Rt2	Inc	Grt	Core	40X350	yes	
	SSP-DH-10A2.17B	Rt1	Inc	Grt	Core	150X600	yes	probaly an alteration along the crack
		Rt2	Inc	Grt	Core	150x200	yes	
		Rt3	Inc	Grt	Core	120X200	no	
		Rt4	Inc	Grt	Core	200X400	no	
		Rt5	Inc	Grt	Core	120X120	yes	
		Rt6	Inc	Grt	Core	100X200	yes	
	SSP-DH-10A2.20	Rt1	Inc	Grt	Core	10X100	no	
		Rt2	Inc	Grt	Core	50X150	no	
	SSP-DH-10A2.24.pe	Rt	Inc	Grt	Core	100X150	yes	

SSP-DH-10A2.25pe	Rt	Mtx			70X600	yes
SSP-DH-10A2.26A	Rt	Inc	Grt	Core	40X50	yes
SSP-DH-10A2.31pe	Rt	Inc	Grt	Core	70X150	yes
SSP-DH-10A2.33B	Rt1	Inc	Grt	Core	150X200	yes
	Rt2	Inc	Grt	Core	50X50	yes
SSP-DH-10A2.34A	Rt	Inc	Grt	Core	150X250	yes
SSP-DH-10A2.34B	Rt	Inc	Grt	Core	150X100	no
SSP-DH-10A2.34Cpe	Rt1	Inc	Grt	Core	150X50	yes
	Rt2	Mtx			250X150	yes
SSP-DH-10A2.35pe	Rt	Inc	Grt	Core	100X350	yes

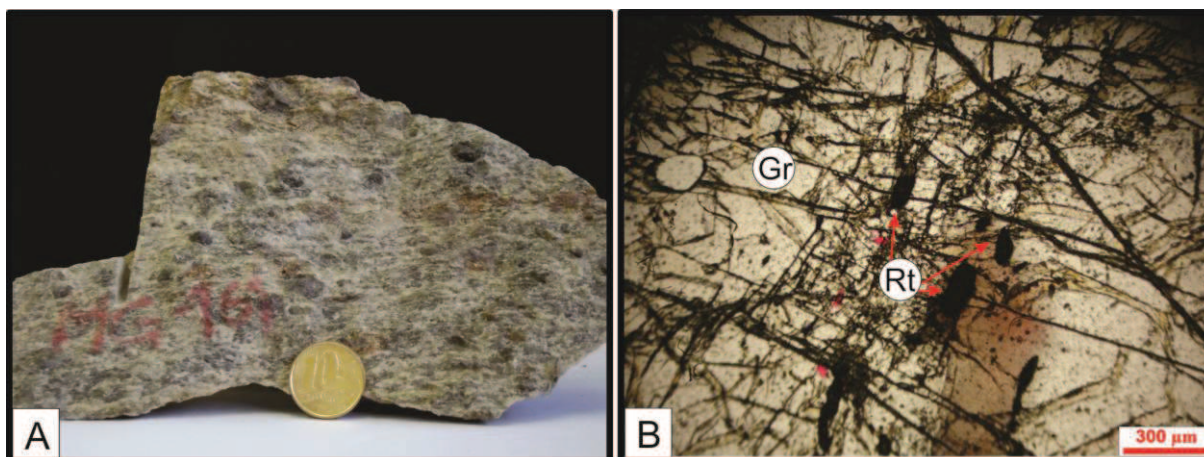
---

Sample	BSE/ FILE/name/	Rutile	mtx/incl	Host mineral	Location (rim or core)	aprox size (um)	Cracks ( When included)	obs
<b>SSP-DH-12A1</b>								
	SSP-DH-12A1.2	Rt1	Inc	Grt	Rim	40X80	no	
		Rt2	Inc	Grt	Rim	50X40	no	
		Rt3	Inc	Grt	Rim	60X100	no	
		Rt4	Inc	Grt	Rim	100X200	yes	
	SSP-DH-12A1.4	Rt1	Inc	Grt	Core	100X200	yes	rutile not so good
		Rt2	Inc	Grt	Core	30X30	no	
		Rt3	Inc	Grt	Rim	200X100	no	
	SSP-DH-12A1.5	Rt1	Inc	Grt	Rim	300X100	yes	
		Rt2	Inc	Grt	Rim	200X100	no	
		Rt3	Inc	Grt	Rim	200X300	no	
	SSP-DH-12A1.7	Rt1	Inc	Grt	Rim	220X50	no	
		Rt2	Mtx			100X50	no	
		Rt3	Mtx			130X50	no	
		Rt4	Inc	Grt	Core	100X50	no	
	SSP-DH-12A1.8	Rt1	Inc	Grt	Core	200X40	no	
	SSP-DH-12A1.9	Rt	Inc	Grt	Core	100X100	no	
	SSP-DH-12A1.11	Rt	Inc	Grt	Core	100X50	no	
	SSP-DH-12A1.12	Rt	Inc	Grt	Core	50X150	no	
	SSP-DH-12A1.14	Rt	Inc	Grt	Core	150X100	no	
	SSP-DH-12A1.15	Rt	Mtx			300X300	no	
	SSP-DH-12A1.23	Rt1	Inc	Grt	Rim	250X100	no	
		Rt2	Mtx			250X150	yes	
		Rt3	Mtx			200X80	yes	
	SSP-DH-12A1.24	Rt	Inc	Grt	Core	40X80	no	nice, but to small
	SSP-DH-12A1.26	Rt	Inc	Grt	Core	400X200	yes	big rutile

## **ANEXO III**

Descrição petrográfica das amostras

## Amostra MG-161



### Descrição Macroscópica

**Cor:** cinza amarelada

**Estrutura:** gnáissica

**Textura:** Granoblástica

Rocha de granulação média a grossa, com orientação mineral fortemente marcada pelas porções quartzo-feldspáticas juntamente com as biotitas.

### Descrição Microscópica

**Mineralogia Principal:** 25% granada, 20% quartzo, 20% feldspato, 15% plagiocásio, 10% biotita, 5% rutilo, 3% cianita, 2% muscovita, opacos.

### **Minerais:**

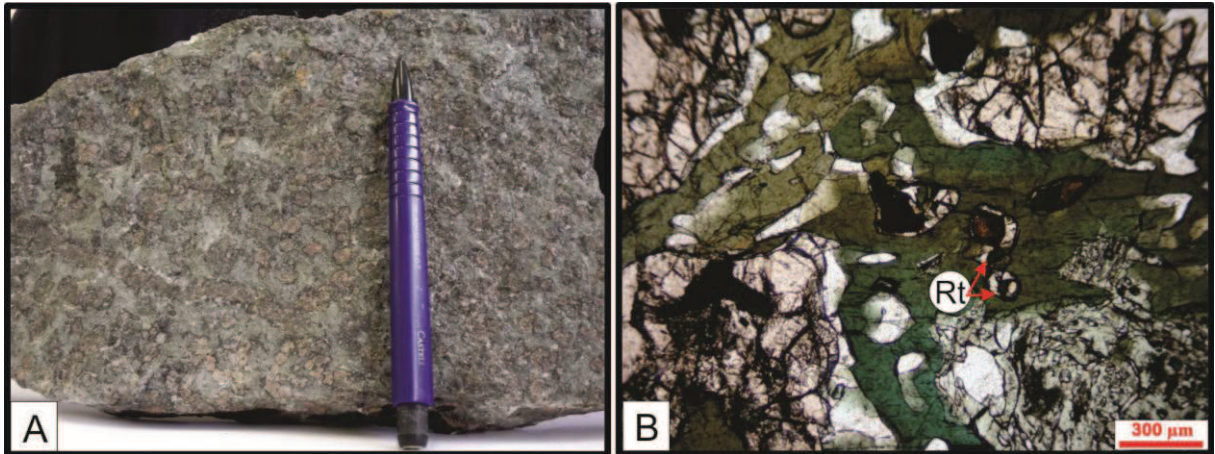
- Granada: porfiroblastos semi-arredondados de aproximadamente 1 cm, contornos idioblásticos, euhedrais granulares. Os cristais apresentam-se com relevo muito alto, os grãos encontram-se fortemente fraturados e possuem inúmeras inclusões de rutilo.
- Quartzo: com extinção ondulante, compoendo a matriz da rocha. Apresenta relevo baixo e é incolor. Ocorre alongado e orientado por toda a lâmina.
- Feldspato: o feldspato aparece associado aos cristais de quartzo na matriz do litotipo. Ocorre como cristais milimétricos, de baixa birrefringência, incolores e não pleocróicos a polarizadores descruzados.
- Plagioclásio: junto com o quartzo compõe a matriz da rocha, porém de forma disseminada com cristais de até 1,2mm com geminação evidente e cristais subhedrais a anhedrais. Os cristais são transparentes à nicóis descruzados e possui um relevo baixo.
- Biotita: cristais ripiformes, subhedrais a anhedrais com pleocroísmo verde amarronzado claro a verde escuro, relevo e cor de interferência moderados, hábito

acicular, dimensões inferiores a 0,5mm de comprimento e por vezes encontra-se ao entorno das granadas.

- Rutilo: aparece como mineral acessório presente principalmente como inclusões nas granadas. Possuem cor marrom escuro a clara a polarizadores descruzados, relevo moderado e pleocroísmo.
- Cianita: cristais distribuídos por toda a lâmina, com tamanho de até 3,5mm, com duas direções de clivagem, incolores a nicóis despolarizados, com extinção paralela.
- Mucovita: ocorre sempre em contato com a biotita, possui uma birrefringência alta, são euhedrais ripiformes a tabulares e incolores a polarizadores cruzados.

**Rocha:** Biotita-granada gnaiss.

## Amostra Olaria-2



### Descrição Macroscópica

**Cor:** cinza esverdeada

**Estrutura:** granular

**Textura:** granoblástica a porfiroblástica.

Rocha com matriz de granulação fina a média, com cristais milimétricos a centimétricos de granada e apresenta uma coloração esverdeada devido aos anfibólios, além disso, possui ocorrências pontuais de pirita distribuídas por toda a amostra.

### Descrição Microscópica

**Mineralogia Principal:** 30% granada, 20% hornblenda, 13% feldspato, 12% quartzo, 10% plagioclásio, 10% clinopiroxênio, 5% rutilo e opacos.

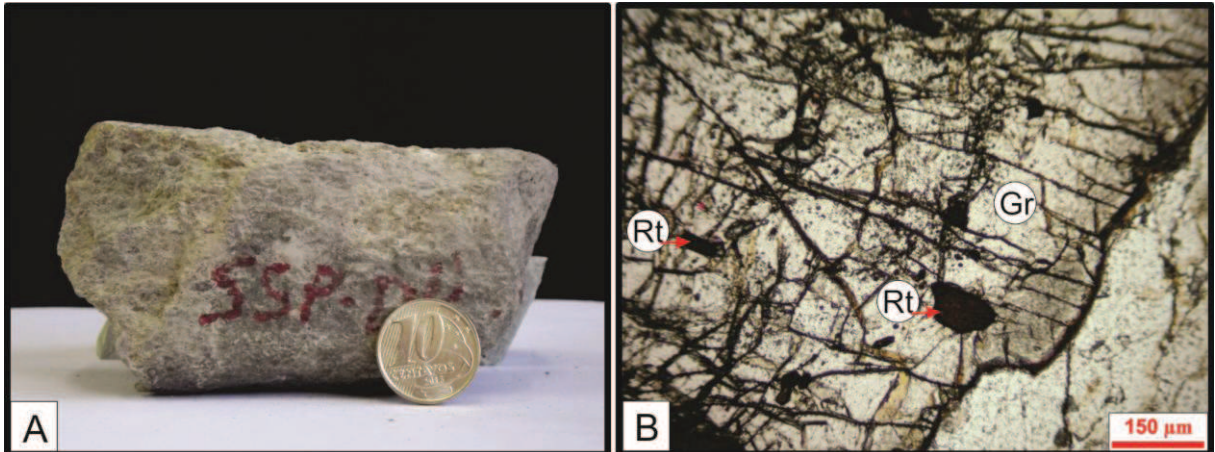
### **Minerais:**

- Granada: mineral de relevo forte, de coloração marrom e isotrópica e os maiores cristais chegam a 1 cm de diâmetro. Os grãos de granada são na maioria das vezes poiquiloblásticas, apresentando bordas corroídas que se transformam em coronas de plagioclásio e hornblenda. Os cristais de granada estão fortemente fraturados e apresentam inclusões de rutilo, quartzo e hornblenda.
- Hornblenda: possuem duas clivagens bem definidas, coloração verde amarronzada, birrefringência de segunda ordem, relevo alto e apresentam tamanho variado. Os cristais de hornblenda ocorrem associados à textura em corona e inclusos principalmente nos cristais de granada. Frequentemente é possível observar que a hornblenda forma-se a partir da alteração dos cristais de clinopiroxênio.

- Feldspato: são cristais incolores a polarizadores descruzados, com extinção paralela e relevo baixo. Estão associados aos grãos de quartzo, formando a textura granoblástica do litotipo.
- Quartzo: os cristais de quartzo são incolores à nicóis despolarizados, e quando polarizados, apresentam coloração ocre acinzentada com extinção ondulante. Compõe a matriz da rocha exibindo uma textura granoblástica em cristais euhedrais a subhedrais, com tamanho variando entre 0,1-0,8mm.
- Plagioclásio: cristais anhedrais com tamanho variado possuem uma geminação evidente, são transparentes à nicóis descruzados e possuem um relevo baixo. Ocorre tanto nas texturas em corona, ao redor das granadas e aparecem entre as hornblendas também.
- Clinopiroxênio: ocorre como grãos relictos de coloração verde clara. Por apresentar textura simplectíticas é possível perceber a geração de piroxênios secundários (clinopiroxênio de 2º geração + plagioclásio). Apresentam-se corroídos tanto na borda quanto no interior dos grãos, e em cristais de hornblenda.
- Rutilo: possui um relevo moderado a alto, cor marrom escuro e um fraco pleocroísmo. Ocorrem espalhados na lâmina, principalmente próximo às granadas e próximos às hornblendas. Os cristais na maioria das vezes são alongados e possuem um tamanhos variados.

**Rocha:** Retroeclogito

## Amostra SSP-DH-9A1



### Descrição Macroscópica

**Cor:** ocre

**Estrutura:** gnáissica

**Textura:** granoblástica

Rocha bastante alterada de coloração ocre e granulometria média e possui pequenos cristais de granada distribuídos por a amostra. Possui uma foliação bem definida pelas bandas quartzo-feldspática.

### Descrição Microscópica

**Mineralogia Principal:** 30% granada, 20% quartzo, 17% feldspato, 15% biotita, 12% cianita, 5% rutilo, 1% opacos.

#### **Minerais:**

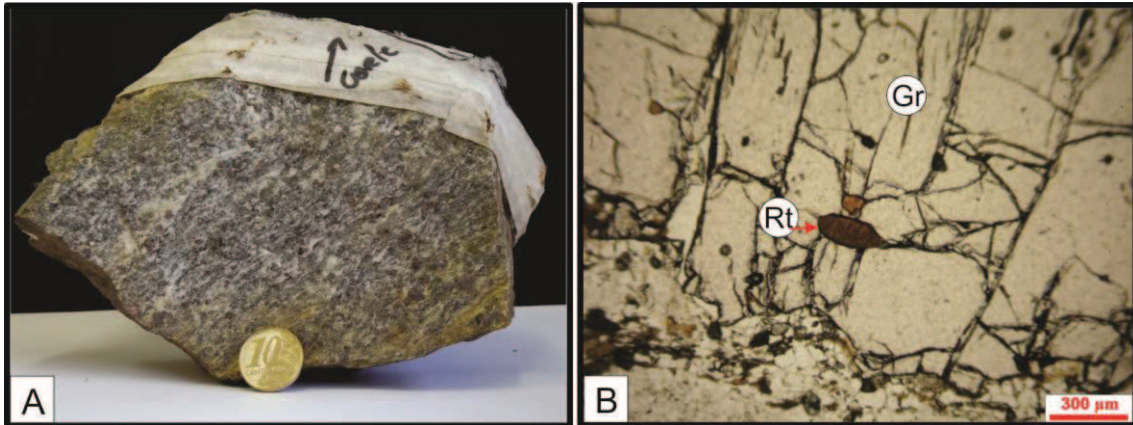
- Granada: mineral de relevo forte, de coloração amarronzada, fortemente fraturada e isotrópica. Pode-se interpretar como granadas sin-deformacional, pois possivelmente são responsáveis pelo alongamento dos cristais de quartzo. Possuem um tamanho de até 1mm.
- Quartzo: cristais incolores com nicóis despolarizados e quando polarizado apresenta coloração ora ocre, ora acinzentado. Possui extinção paralela e relevo baixo. Os cristais se encontram alongados e estirados perpendicularmente à orientação dos porfiroblastos de granada. Compõe quase toda a matriz da rocha que envolve as granadas.
- Feldspato: os cristais de feldspato ocorrem com tamanhos de até 2mm, incolores a polarizadores descruzados. Por vezes ocorrem com extinção paralela, além de aparecerem com birrefringência fraca com cores de primeira ordem, como cinza a esbranquiçado.

Tratam-se de cristais anhedrais a subhedrais que, junto aos cristais de quartzo, compõem a matriz da rocha.

- Biotita: cristais ripiformes, subeudrais a anedrais com pleocroísmo verde amarronzado claro a verde escuro, relevo e cor de interferência moderados, hábito acicular e marcam a orientação dos minerais na amostra.
- Cianita: os cristais de cianitas apresentam hábito ripiforme, maiores que os cristais de biotita e possuem duas direções de clivagem bastante marcada.
- Rutilo: cristais inclusos predominantemente nas granadas. Possui cor marrom escuro a polarizadores descruzados, com hábito prismático, relevo forte e apresenta pleocroísmo.

**Rocha:** Cianita-biotita-granada gnaiss.

## Amostra SSP-DH-10A2



### Descrição Macroscópica

**Cor:** ocre e cinza

**Estrutura:** gnáissica

**Textura:** granoblástica e porfiroblástica

Rocha de granulação média, com estrutura gnáissica, apresentando orientação marcada principalmente pela biotita e pelas bandas quartzo-feldspáticas.

### Descrição Microscópica

**Mineralogia Principal:** 25% granada, 25% quartzo, 15% feldspato, 15% biotita, 10% cianita, 7% rutilo, 3% plagioclásio e opacos.

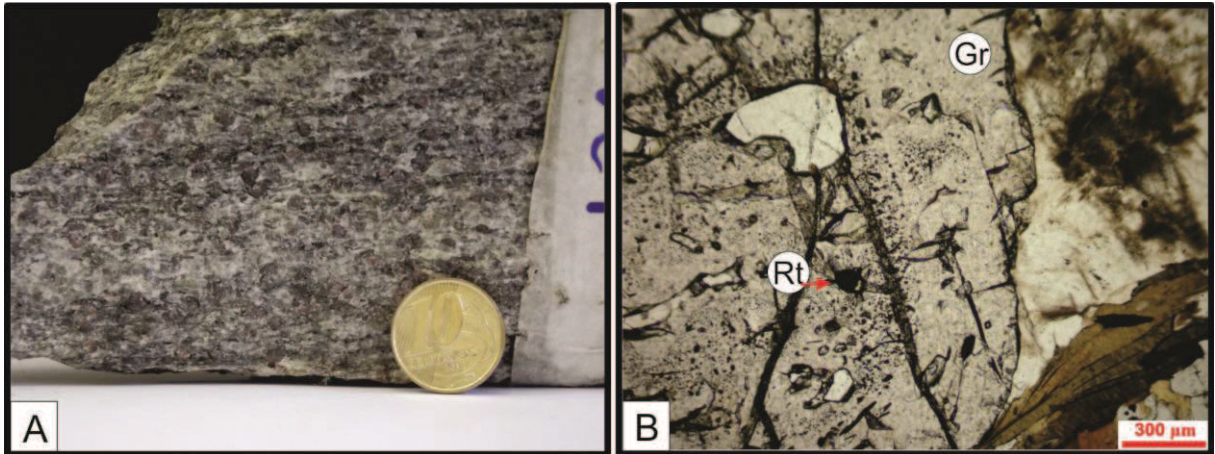
#### **Minerais:**

- Granada: Cristais de até 3,5 cm, com relevo alto, não pleocróico. Possuem fraca birrefringência se tornando opacos quando em nicóis polarizados. Além disso apresentam fraturas irregulares ao longo dos cristais.
- Quartzo: aparece na forma de cristais anhedral, de vários tamanhos, chegando até a 2,2 mm. Os grãos de quartzo possuem orientação preferencial bem marcada pelos cristais maiores.
- Feldspato: trata-se de um feldspato potássico e apresenta-se em cristais anhedrais, incolores, com fraca birrefringência. Também aparecem com baixo relevo e não pleocróicos e os cristais fazem parte da matriz de rocha, colaborando, junto aos grãos de quartzo, para a textura granoblástica que o litotipo apresenta.
- Biotita: ocorre na forma de ripas orientadas de até 0,7mm, com pleocroísmo e cor marrom e por vezes morrom claro levemente esverdeado. Os cristais encontram-se geralmente bordejando os grãos de granada.

- Cianita: a cianita aparece dispersa e bem distribuída pela lâmina. Ocorre com relevo alto, birrefringência moderada de cor vermelha a roda e não possui pleocroísmo, sendo transparente em polarizadores descruzados. Os grãos de cianita se apresentam de forma subhedral, podendo ser levemente alongados. Possuem também 2 direções de clivagem fortemente marcadas.
- Rutilo: o rutilo aparece de maneira geral incluso nas granadas ou disperso na lâmina de forma orientada junto com os cristais de biotita. Possui um relevo moderado a alto, cor marrom escuro e um fraco pleocroísmo. Os cristais na maioria das vezes são alongados e possuem um tamanho máximo de 0,3mm.
- Plagioclásio: Ocorre com geminação bem maracada, disperso pela matriz da rocha, associados aos grãos de quartzo, onde os cristais possuem um tamanho próximo a 0,2mm. Com nicóis despolarizados são transparentes e ainda apresentam relevo baixo à médio.
- Opacos: aparecem dispersos, anhedrais, com até 0,1mm de tamanho.

**Rocha:** Biotita-granada gnaiss.

## Amostra SSP-DH-12A1



### Descrição Macroscópica

**Cor:** ocre e cinza

**Estrutura:** gnáissica

**Textura:** granoblástica e porfiroblástica

Rocha de granulação média, com estrutura gnáissica, com porfiroclastos de granada apresentando orientação marcada principalmente pela biotita e pelo quartzo.

### Descrição Microscópica

**Mineralogia Principal:** 23% quartzo, 15% granada, 15% feldspato, 15% biotita, 10% cianita, 10% rutilo, 8% plagioclásio, 3% muscovita e 1% opacos.

### **Minerais:**

- **Quartzo:** os grãos de quartzo compõe a matriz da rocha e possuem tamanhos de até 2,4mm. Geralmente apresentam extinção ondulante, relevo baixo, birrefringência baixa e são transparentes a polarizadores descruzados.
- **Granada:** a granada ocorre como cristais opacos em nicóis polarizados, com fraturas irregulares em seu interior. Possui relevo moderado a alto, cor transparente em polarizadores descruzados e não apresenta pleocroísmo. Os cristais têm cerca de 2,2mm.
- **Feldspato:** Ocorre na forma de cristais milimétricos, com relevo baixo e fraca birrefringência. Além disso, os cristais são anhedrais a subhedrais, incolores a polarizadores descruzados e encontram-se bem distribuídos pela matriz da rocha.
- **Biotita:** os cristais de biotita aparecem como ripas alongadas e orientadas de até 0,3mm, pleocróica, de cor marrom a marrom claro com tons esverdeados. Possui um relevo baixo e extinção paralela.

- Cianita: na cianita ocorrem duas direções de clivagem bem marcadas, possui relevo alto, birrefringência moderada e incolor a polarizadores descruzados. Os cristais encontram-se dispersos na lâmina e chegam a 1,7mm.
- Rutilo: os cristais de rutilo normalmente possuem cor marrom escuro a clara a polarizadores descruzados, relevo moderado e pleocroísmo. Encontram-se na maior parte inclusos nas granadas, ou então próximos às biotitas. Geralmente possuem um hábito prismático com tamanhos até 0,7 mm.
- Plagioclásio: os cristais de plagioclásio aparecem com geminação característica, relevo baixo, sendo transparentes com nicóis despolarizados. Não apresentam pleocroísmo e chegam a 0,3mm.
- Muscovita: ocorre como cristais de até 0,5mm, com hábito em fibra, birrefringência alta e relevo baixo.

**Rocha:** Biotita-granada gnaisse.