



*Universidade Estadual Paulista*  
**“Julio de Mesquita Filho”**

*Faculdade de Ciências e Tecnologia*

*Campus de Presidente Prudente*

*Departamento de Física, Química e Biologia*

**MARCIO CONSTANCIO JUNIOR**

**MÉTODO DOS TRAÇOS DE FISSÃO EM APATITA E ZIRCÃO:  
GEOCRONOLOGIA DO GRUPO BAURU**

*Presidente Prudente*

2010

**MARCIO CONSTANCIO JUNIOR**

**MÉTODO DOS TRAÇOS DE FISSÃO EM APATITA E ZIRCÃO:  
GEOCRONOLOGIA DO GRUPO BAURU**

Monografia apresentada ao curso de Licenciatura em Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista como requisito parcial a obtenção do título de Licenciado em Física.

**Orientador:** Prof. Dr. Carlos Alberto Tello Sáenz

*Presidente Prudente*

2010

**MARCIO CONSTANCIO JUNIOR**

**MÉTODO DOS TRAÇOS DE FISSÃO EM APATITA E ZIRCÃO:  
GEOCROLOGIA DO GRUPO BAURU**

MONOGRAFIA REFERENTE À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE LICENCIADO EM  
FÍSICA

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Tello Sáenz

---

Prof. Dr. Silvio Rainho Teixeira

---

Prof. Dr. João Osvaldo Rodrigues Nunes

**Presidente Prudente, Novembro de 2010**

**Aos meus Pais,  
Marcio e Juceline**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais que me apoiaram em todos os momentos de minha vida. Sempre estiveram ao meu lado nos momentos felizes, tristes e até mesmo nos momentos em que tudo não passava de “loucura”. Pois é, a “loucura” agora é realidade e, olhando para trás, nem parece tão louco assim...

Agradeço aos meus avós, Carmen (in memoriam) e João que compreenderam essa minha escolha difícil com bons olhos e, sempre que precisei, me apoiaram. Agradeço principalmente aos meus avós Natália e João que, queiram ou não, eram os que mais estiveram presentes neste meu momento fora de casa. Pessoas trabalhadoras, fortes e de caráter irrefutável. Me espelho em vocês.

Agradeço aos meus tios João Carlos, Silvia, Rosana, Marcos, Reginaldo, Geni e Rogério pelas palavras de apoio.

Agradeço em especial aos tios Edson e Natalina que me ajudaram com custos em Presidente Prudente. Sei pelo que passaram por momentos difíceis neste período, mas nunca desistiram de mim. Por isso sou muito grato.

Agradeço ao professor Carlos Tello pela orientação durante estes dois anos e meio de bolsa. Agradeço também à professora Ana Maria, pois, sem ela, provavelmente jamais teria chagado até aqui.

Agradeço ao Airton que, em vários momentos foi um irmão pra mim. Sempre me ajudou com meu trabalho de pesquisa, mesmo eu sabendo que não estava fazendo por merecer ajuda. Obrigado por acreditar...

Agradeço aos meus grandiosos amigos, Jaum, Paulo Eduardo e Paulão. Poder contar com a companhia de vocês por todo este tempo foi de um prazer inestimável. Sempre aprendi muito com todos, cada um à sua maneira...

Aos meus companheiros de casa, Luiz, Jimmy, Alex, Filipe e a todos que em algum momento conviveram comigo. Parabéns por terem me suportado...

Às pessoas que fazem(ou fizeram ) parte deste grupo, Luiz, Rosana, Mariana, Wagner, Gabriel, Eduardo, Beatriz. Saibam que todos vocês tem participação especial em tudo que conquistei durante todo este tempo...

Por fim, agradeço a todos àqueles que fizeram parte da minha vida, àqueles que participaram de momentos felizes e tristes ao meu lado, à professores e funcionários da UNESP com os quais fiz amizade e àqueles que provavelmente estou esquecendo aqui... Um abraço a todos...

# **Quis custodiet ipsos custodes?**

Juvenal, em As Satiras

## RESUMO

A proposta deste trabalho foi contribuir na continuação e no aprimoramento da rotina do Método de Traços de Fissão, MTF, em zircão e apatita no Grupo de Pesquisa de Detectores de traços nucleares em estados sólidos, DETRANES, DFQB/FCT- UNESP, campus Presidente Prudente. Para isto foram datadas, analisadas e determinadas as idades via o Método de Traços de Fissão, MTF, de amostras de zircão e apatita coletadas na Formação Presidente Prudente pertencente ao Grupo Bauru, Bacia do Paraná. Além de estudos na aplicação geológica, também foram realizados estudos na parte metodológica tais como experimentos para determinar a razão das eficiências de detecção dos traços fósseis e induzidos no zircão e experimentos de annealing (encurtamento do traço em função da temperatura e do tempo) para determinar um valor de  $L_0$  com amostras pertencentes ao Grupo Bauru, e compará-lo com a literatura. Quanto às idades obtidas para a formação Presidente temos como intervalo principal 100 e 600 Ma no zircão que pode indicar relação da fonte com três eventos orogênicos específicos: Orogenia Gondwânica (230 – 290 Ma), Orogenia Devoniana (330 – 390 Ma) e Orogenia Brasileira (400 – 600 Ma). Na apatita temos uma distribuição de idades entre 10 e 70 Ma que, juntamente com os dados de annealing no zircão, nos permite relacionar o local de coleta da amostra com o processo de hidrotermalismo e/ou existência de falha geológica. Quanto aos experimentos metodológicos, temos como resultados do fator de geometria  $g = 0,64 \pm 0,17$  enquanto os valores de  $L_0$  (traço confinado sem annealing) obtidos são de  $10,25 \pm 1,34$ ,  $11,10 \pm 0,65$ ,  $10,43 \pm 0,40$ , para as amostras ZPPI<sub>0</sub>, ZJPI<sub>0</sub> e ZMDA<sub>0</sub>, respectivamente.

Palavras Chave: Método de Traços de Fissão, Zircão e apatita, Fator de Geometria, Formação Presidente Prudente.

## ABSTRACT

This work's proposal is to contribute for the Apatite and Zircon fission track Method development at Grupo de Pesquisa de Detectores de traços nucleares em estados sólidos, DETRANES, DFQB/FCT- UNESP, campus Presidente Prudente. For that, some samples from Presidente Prudente Formation (Bauru Group, Parana Basin) were dated by the fission track method (FTM). Besides the geological application, some methodological experiments were done to determine the geometry factor (efficiency ratio between induced and spontaneous fission track) at zircon and annealing experiments (track shortening as a function of time and temperature) to determine an  $L_0$  value with samples from Bauru Group to compare them to the literature. The zircon FTM ages from Presidente Prudente formation are between 100 and 600 Ma which indicates relation to three morfotectonic events: Brazilian Orogeny (400 – 600 Ma), Famatian Orogeny (330 –390 Ma) and Gondwanides (230 – 290 Ma). At apatite, the ages distribution is between 10 and 70 Ma which allows us to relate this results to an hidrotermalismo event that occurs at the interest region and/or to the existence of geological fault. At the methodological experiments we obtained as results the geometry factor ( $g = 0,64 \pm 0,17$ ) while the  $L_0$  obtained values are  $10,25 \pm 1,34$ ,  $11,10 \pm 0,65$ ,  $10,43 \pm 0,40$  to ZPP1<sub>0</sub>, ZJPl<sub>0</sub> and ZMDAl<sub>0</sub> samples, respectively.

Keywords: Fission Track Method, zircon and apatite, geometry factor, Presidente Prudente Formation.

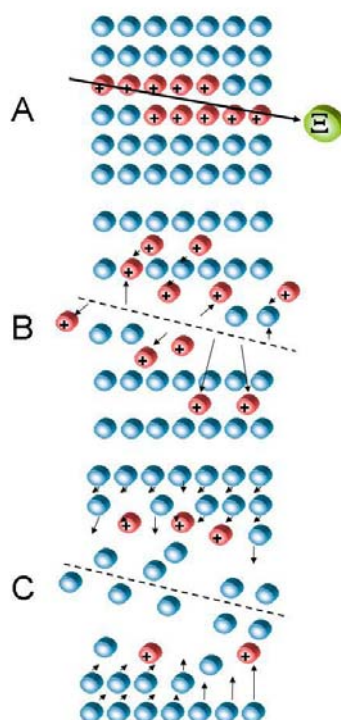


# SUMÁRIO

<b>I – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>II – OBJETIVOS.....</b>	<b>12</b>
<b>III – DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>12</b>
3.1 - Método das Populações (MP) e o Método do Detector Externo (MDE).....	12
3.2 – Irradiação .....	14
3.3 – Equação da idade .....	15
<b>IV – MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>16</b>
4.1 – Área de estudo .....	16
4.2 – Coleta de amostras .....	16
4.3 – Separação de minerais .....	19
4.4 – Montagem, ataque químico e análise.....	20
4.4.1 - Apatita.....	20
4.4.2 - Zircão .....	21
4.5 – Microscopia óptica .....	22
4.6 – Medidas de Eficiência (Fator de Geometria) .....	22
4.7 – Obtenção do traço sem annealing, $L_0$ .....	23
<b>V – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>23</b>
5.1 – Idades do grupo Bauru .....	23
5.1.1 – Idades obtidas em zircão.....	23
5.1.2 – Idades obtidas em apatita .....	39
5.2. Medidas de traços confinados e obtenção do $L_0$ (Traço sem Annealing) .....	41
5.3. Determinação do fator de geometria .....	44
<b>VI – CONCLUSÕES.....</b>	<b>45</b>
<b>VI– REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

## I – INTRODUÇÃO

O Método de Traços de Fissão, MTF, permite obter a idade de minerais que possuem dezenas de ppm de urânio natural. O isótopo  $^{238}\text{U}$  tem a probabilidade de fissionar espontaneamente criando um traço latente (desarranjo da estrutura cristalina devido à grande carga, massa e energia liberada durante a fissão – figura 1) que pode ser observado ao microscópio óptico após um ataque químico conveniente.



**Figura 1.** Formação do traço latente (Wagner and Van Den Haute, 1992 – modificado)

A idade pode ser obtida fazendo uma medida, ao microscópio óptico, da densidade de traços de fissão espontânea e de fissão induzida. Os traços de fissão induzida são obtidos através da irradiação da amostra com um fluxo de nêutrons térmicos, no reator nuclear, ocasionando a fissão do isótopo  $^{235}\text{U}$  e sua medida é feita em um detector externo chamado mica muscovita. Esta irradiação é utilizada para evitar a medida de forma direta do número de átomos do isótopo  $^{238}\text{U}$  na amostra. A análise de traços de fissão espontânea em apatita e zircão, por exemplo, permite determinar a história térmica da região onde a amostra foi coletada através do fenômeno de *annealing* (encurtamento dos traços através da temperatura em tempos geológicos).

Cada mineral possui suas próprias características frente ao fenômeno de annealing. No caso da apatita, por exemplo, a temperatura de annealing total ou temperatura de fechamento é de  $\sim 120$  °C enquanto no zircão é de  $\sim 220$  °C (Tagami et al., 1990) ambos em tempos geológicos. Ou seja, a datação destes minerais nos fornece a idade do último evento térmico que causou o apagamento total dos traços. Quando o annealing é parcial (o que pode acontecer mesmo à temperatura ambiente em tempos geológicos) a idade pode ser obtida via os métodos de correção que levam em conta o quanto os traços foram apagados, método de correção pelo Plateau ou pelo Tamanho dos Traços.

Particularmente no caso da apatita, o annealing parcial ocorre na faixa de temperatura de 60°C –120°C, que coincide com a janela de maturação de hidrocarbonetos, em milhões de anos. Tal característica torna este método uma importante ferramenta na avaliação dos riscos e incertezas na exploração do petróleo. Outra aplicação importante é no estudo de eventos tectônicos. Nestes eventos há liberação de energia em forma de calor que fica registrada no encurtamento parcial dos traços de fissão. Estas aplicações fizeram com que o método dos traços de fissão, em apatita especialmente, alcançasse grande desenvolvimento nas últimas duas décadas (Por exemplo, Laslett et al., 1987; Hadler et al., 1995; Tello et al., 2003; Hackspacher et al., 2004; Tello et al., 2005; Tello et al., 2006; Hadler et al., 2008).

O desenvolvimento do MTF em zircão, MTFZ, é importante devido a temperatura de fechamento, como comentado acima, ser de  $\sim 220$  °C (Tagami et al., 1990). Isto possibilita a detecção de eventos geotérmicos mais intensos assim como encontrar idades próximas da idade de cristalização de alguns minerais. Desta forma o zircão se torna um excelente complemento da apatita para estudar a tectônica de regiões de interesse geológico. Outra aplicação do MTFZ é em prospecção de hidrocarbonetos, isto porque em profundidades onde a apatita sofreu annealing total o zircão ainda pode dar informação da evolução térmica da bacia onde se fez a perfuração (Tagami *et al.*, 1990; Yamada *et al.*, 1995; Tagami *et al.*, 1996 a, b, c; Yamada *et al.*, 1998; Yamada *et al.*, 2003).

Foram analisadas 14 amostras de zircão e 2 de apatita. Todas elas são da Formação Presidente Prudente, pertencente ao Grupo Bauru, Bacia do Paraná. A partir destas análises foi possível inferir sobre a idade de formação, bem como, sobre a história térmica da região de Presidente Prudente-SP.

Com a finalidade de atuar também no desenvolvimento metodológico foram realizados os seguintes estudos teórico-experimental: *i*) obtenção da razão de eficiência de detecção dos traços fósseis e induzidos (conhecido como fator de geometria) e *ii*) experimentos de aquecimento para obter annealing total e depois de irradiar a amostra com nêutrons térmicos

determinar o valor de  $L_0$  (traço sem annealing) em amostras do Grupo Bauru. Ambos os resultados são muito importantes para continuidade do trabalho que vem sendo desenvolvido no grupo de pesquisa **DETRANES**. O resultado obtido no fator de geometria infere diretamente sobre a acurácia das idades obtidas para cada amostra e o  $L_0$  será utilizado na posterior identificação da história térmica das amostras, e, conseqüentemente, da área de estudo onde se fez a coleta.

## II – OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Datação de 14 amostras de zircão e 2 de apatita pertencentes à Formação Presidente Prudente na região do Grupo Bauru;
- Obter a história térmica destas amostras e, portanto da região onde elas foram coletadas;
- Determinar a razão de eficiência de detecção dos traços fósseis e induzidos no zircão através do uso do Método do Detector Externo, MDE .
- Fazer experimentos de aquecimento para realizar medidas de tamanho de traços sem annealing com a finalidade de obter um valor de  $L_0$ .

## III – DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

### 3.1 - Método das Populações (MP) e o Método do Detector Externo (MDE)

Dentro do MTF há duas metodologias que podem ser usadas para determinar a idade da apatita ou do zircão: o Método das Populações (MP) e o Método do Detector Externo (MDE). No MP a idade de uma amostra de apatita ou zircão é obtida determinando o valor médio da densidade de traços em uma população de grãos (aproximadamente 100 grãos), enquanto que no MDE a idade é obtida em cada grão.

O Método das Populações (MP) é adequado para datar amostras de embasamento (rochas ígneas), isto porque se supõe que todos os grãos de apatita ou zircão foram gerados na mesma época. Para este método a amostra deve ser dividida em duas parcelas: uma para a contagem dos traços de fissão espontânea ( $\rho_s$ ) enquanto a outra é aquecida até que todos os

traços fósseis sejam apagados (*annealing* total). Posteriormente esta segunda parcela é irradiada a fim de que seja utilizada para a contagem dos traços de fissão induzida ( $\rho_I$ ) (Wagner e Van Den Haute, 1992).

No caso da apatita o aquecimento para que todos os traços fósseis sejam apagados é realizado à 400 °C durante 10 horas e no caso do zircão à 1000 °C durante 2 horas. Após o tratamento térmico em laboratório, a parcela aquecida é submetida a uma irradiação em um reator nuclear, para que ocorram as fissões induzidas do  $^{235}\text{U}$ . As duas parcelas, uma contendo traços fósseis e a outra contendo traços induzidos, são montadas e após o lixamento e polimento, são submetidas a um ataque químico característico para cada mineral.

A fração contendo traços fósseis é utilizada também para determinar a medida da distribuição de comprimentos dos traços confinados. Após a obtenção das densidades de traços de fissão espontânea e traços de fissão induzida, é possível determinar a idade da amostra e, portanto, da região onde esta foi coletada.

Por outro lado, o MDE é adequado para datar amostras de bacias sedimentares onde os minerais podem ter vindo de várias fontes. Ou seja, cada grão pode ter idades diferentes. Neste método utiliza-se a mica muscovita como detector externo acoplado à amostra, para obter a densidade de traços induzidos. Isto pode acarretar flutuações estatísticas ou erros sistemáticos inerentes a esta metodologia.

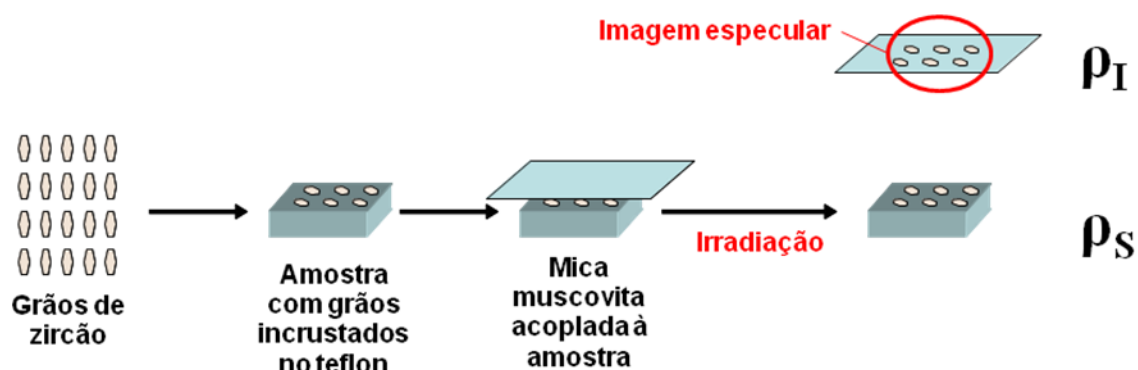
Para a datação utilizando o Método do Detector Externo (MDE), os grãos de zircão e apatita são escolhidos e montados de forma ordenada (matriz) com aproximadamente 100 grãos. A montagem é atacada quimicamente a fim de revelar os traços de fissão espontânea e, posteriormente, ela é acoplada a uma mica muscovita (que faz o papel de detector externo) para ser irradiada com nêutrons térmicos.

Os fragmentos de fissão do isótopo  $^{235}\text{U}$ , contido no mineral, são detectados pela mica muscovita, deixando na mesma uma imagem especular dos grãos. Após um ataque químico feito com HF a 48% a 15 °C durante 90 minutos pode ser feita a análise dos traços de fissão induzida revelados na mica muscovita.

O MDE é bastante apropriado para amostras retiradas de bacias sedimentares ou locais onde se podem ter grãos de diferentes populações, mesmo que estes grãos tenham sido retirados de uma mesma rocha-anfítrã. Nos dois casos, a quantidade de urânio pode variar de grão para grão. Como cada grão é datado separadamente, a quantidade de traços observados na mica pode trazer informações sobre a diferença no conteúdo de  $^{235}\text{U}$  existentes em cada grão.

A figura 2 ilustra a forma com que os traços de fissão induzida são gravados no detector externo. À exemplo, utilizou-se na ilustração grãos de zircão. Os grãos são montados em teflon e após lixamento, polimento e ataque químico, acopla-se uma mica muscovita (detector externo) a quais são submetidos a uma irradiação.

O MDE foi o método utilizado na datação das amostras deste trabalho.



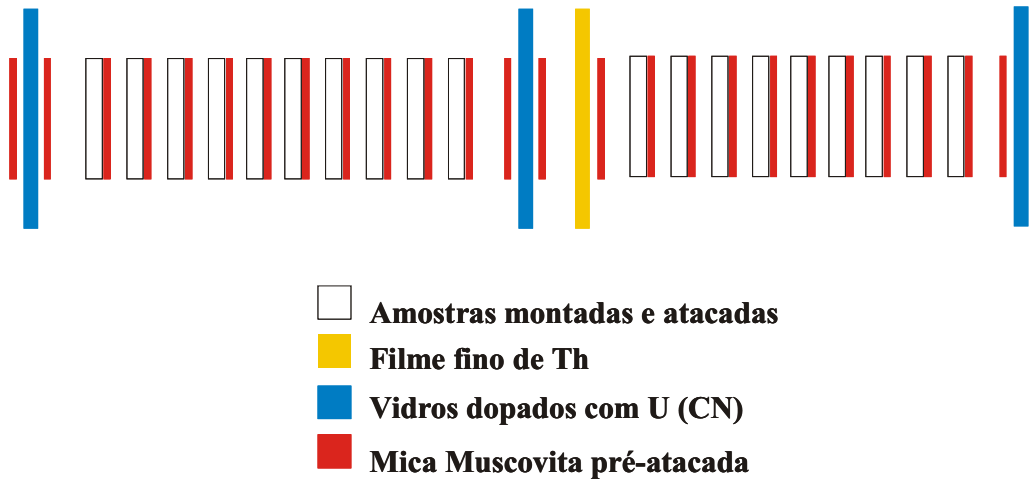
**Figura 2.** Esquema do Método do Detector Externo

### 3.2 – Irradiação

No Método de Traços de Fissão, MTF, independentemente de utilizar-se o Método das Populações (MP) ou o Método do detector externo (MDE) é necessário irradiar a amostra para evitar a medida de forma direta do número de átomos do isótopo  $^{238}\text{U}$ .

Para realizar a irradiação utilizando o MDE (principal método utilizado para amostras de bacias), as amostras são colocadas em um arranjo (como mostrado na figura 3), para serem irradiadas no reator nuclear do IPEN/CNEN. No caso do zircão a fluência nominal utilizada é de  $5 \times 10^{14}$  nêutrons/cm<sup>2</sup> e na apatita é de  $1 \times 10^{15}$  nêutrons/cm<sup>2</sup>. Para o caso da montagem utilizando o MP tem-se o mesmo esquema da figura 3 com exceção das micas pré-atacadas como detector externo (em vermelho).

Os vidros dopados com urânio são utilizados para determinar a dosimetria de neutrons ( $R_M$ ) e o filme fino de Tório para monitorar uma eventual grande quantidade de tório nas nossas amostras. É importante ressaltar que os traços, depois de serem revelados não são afetados pela irradiação de nêutrons no reator nuclear.



**Figura 3.** Montagem para irradiação das amostras

### 3.3 – Equação da idade

Através da equação 1 pode-se determinar a idade das amostras de zircão ou apatita (Iunes, 1999; Iunes et al., 2002a):

$$T = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left[ 1 + \left( \frac{\epsilon_{235}}{\epsilon_{238}} \right) \left( \frac{\rho_S}{\rho_I} \right) \left( \frac{\lambda}{\lambda_F} \right) \frac{R_M}{C_{238}} g \right] \quad (1)$$

Onde  $\lambda$  é a constante de decaimento alfa do  $^{238}\text{U}$  cujo valor é  $1,55125 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ ;  $\lambda_F$  é a constante de decaimento por fissão espontânea do  $^{238}\text{U}$  cujo valor é  $8,35 \times 10^{-17} \text{ a}^{-1}$ ;  $\rho_S$  (ou  $\rho_I$ ) é a densidade superficial de traços de fissão espontânea (ou induzida) de cada amostra;  $\epsilon^{238}$  ( $\epsilon^{235}$ ) é um fator de detecção, que representa a razão entre o número de traços de fissão do  $^{238}\text{U}$  ( $^{235}\text{U}$ ), observados por unidade de superfície e o número de fissões espontâneas (induzidas) ocorridas no mineral, por unidade de volume;  $C_{238}$  é a concentração isotópica do  $^{238}\text{U}$  no Urânio natural cujo valor é 0,99275;  $g$  é o fator de geometria. Para a apatita  $g$  é 0,56 (Iwano e Danhara, 1998) e do zircão é 0,684;  $R_M$  é determinado através da dosimetria de nêutrons (Iunes et al., 2002a).

A idade de um mineral que tenha sofrido annealing parcial durante a sua história térmica, pode em princípio, ser corrigida através da técnica de correção pelo tamanho. No caso da apatita, além de encontrar a idade pode-se também determinar a história térmica analisando a distribuição dos traços de cada amostra. A história térmica será aquela comum a todas as amostras que pertencem a um mesmo grupo (Tello et al., 2003; Tello et al., 2005).

## IV – MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 – Área de estudo

O Grupo Bauru formou-se no Neocretáceo (~ 100 Ma), no centro-sul da Plataforma Sul-Americana, em evento de compensação isostática posterior ao acúmulo de quase 2000 m de lavas basálticas, ocorrido no Cretáceo Inferior (~ 140 Ma). Desenvolveu-se como bacia continental interior, pós-ruptura do continente gondwânico, acumulando uma seqüência sedimentar essencialmente arenosa, hoje com espessura máxima de cerca de 300 m e área de 370.000 Km<sup>2</sup>. A seqüência tem por substrato basaltos da Formação Serra Geral, dos quais é separada por não-conformidade, e limite superior erosivo, demarcado pela Superfície Sul-Americana ou sua posterior dissecação. No Brasil, ocorre na parte ocidental do estado de São Paulo, no noroeste do Paraná, no leste e Mato Grosso do Sul, no Triângulo Mineiro e no sul de Goiás. O preenchimento do Grupo Bauru se deu em clima semi-árido a árido, entre o Coniaciano (~ 90 Ma) e o Maestrichtiano (~ 60 Ma), intervalo definido com base na idade de fósseis de dinossauros (Huene 1939), idade absoluta de intercalações de rochas vulcânicas (Coutinho *et al.* 1982), e na correlação com a deposição da Formação Santos (Pereira e Feijó 1994), na Bacia de Santos.

Dentre as diversas formações que formam o Grupo Bauru, este trabalho focou seus estudos à Formação Presidente Prudente.

Esta, conforme Fernandes (1998) e Fernandes e Coimbra (1998) caracteriza-se como sendo arenitos muito finos a finos, de seleção moderada a má, matriz lamítica, de cores marrom-avermelhado claro a bege, e lamitos argilosos marrom-escuro (chocolate); feições de preenchimento de canais rasos, com estratificação cruzada acanalada; corpos tabulares com estratificação sigmoidal interna, e com estratificação plano-paralela; e estruturas de fluxo aquoso, de regime inferior dominante e maciço. O ambiente de sedimentação deu-se sob um sistema fluvial meandrante arenoso fino de canais rasos.

### 4.2 – Coleta de amostras

Na Tabela 1 apresentamos as coordenadas onde foram coletadas 15 amostras na Formação Presidente Prudente. Depois da coleta de aproximadamente 20 Kg de cada amostra, estas foram britadas, peneiradas, passaram por uma separação de minerais leves (bateia), por um processo de separação magnética (através do Frantz) e, por fim, separação através de



líquidos pesados (bromofórmio). Após estes processos, em geral realizado no laboratório de geologia do campus UNESP de Rio Claro, obtém-se o concentrado do qual serão retirados apatita e zircão para montagem.

Como podemos observar na Tabela 1 apenas em duas amostras obtivemos apatita. Estas amostras foram obtidas através de um minucioso reconhecimento deste mineral usando um microscópio estereoscópico (lupa) com aumento nominal de 4x10.

**Tabela 1 .** Amostras coletadas na região da Formação Presidente Prudente

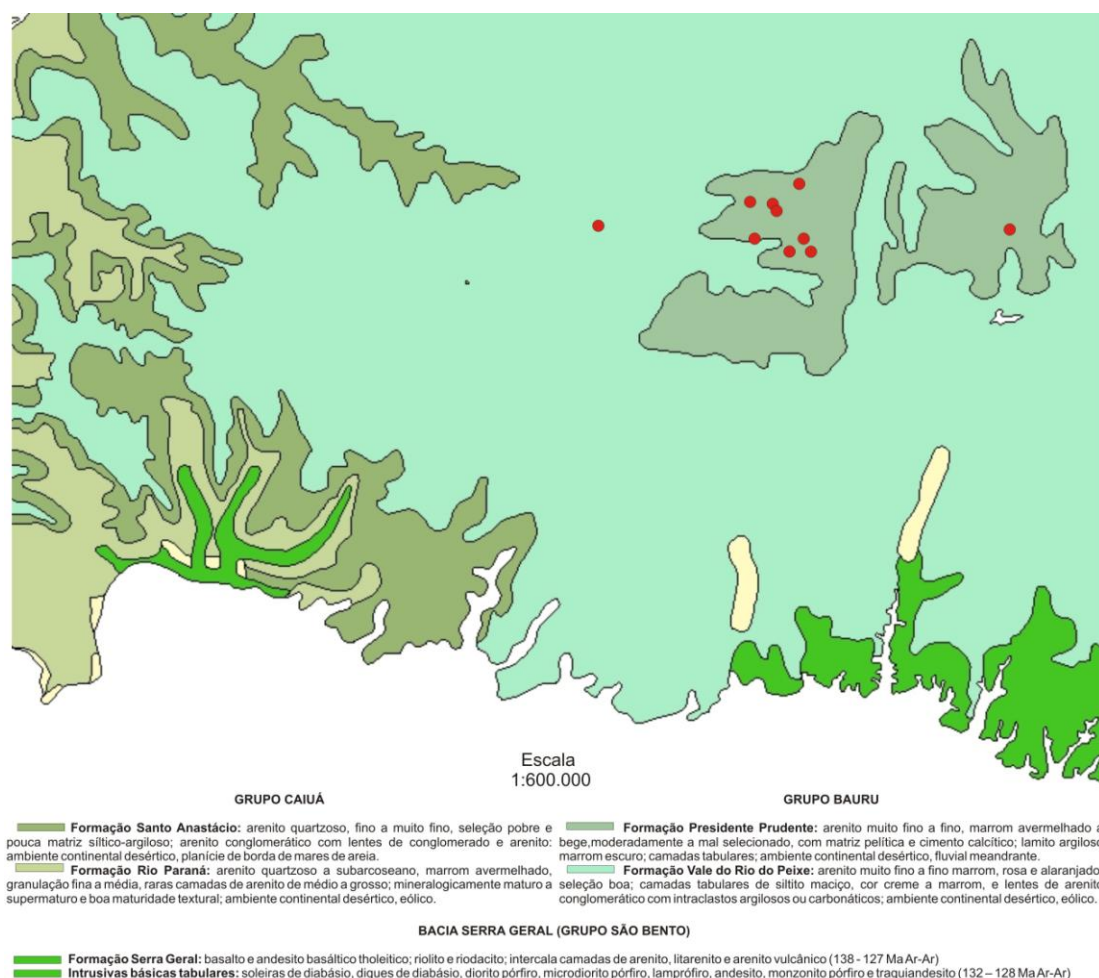
Mineral	Nome da amostra**	Local de Coleta	Formação	Coordenadas UTM		Profundidade (m)
				E	N	
Apatita	B- 03	Pirapozinho	Presidente Prudente	459877	7548335	--
Apatita	B- 04	Pirapozinho	Presidente Prudente	459906	7548335	--
Zircão	ZB-03	Pirapozinho	Presidente Prudente	459877	7548335	--
Zircão	ZB-04	Pirapozinho	Presidente Prudente	459906	7548335	--
Zircão	ZBN 5	Brasil Novo	Presidente Prudente	460247	7556979	
Zircão	ZCOB 31	Centro Olímpico (PP)	Presidente Prudente	458263	7553198	140 m
Zircão	ZMAC 27	Martinópolis	Presidente Prudente	484500	7551100	135 m
Zircão	ZUB 29	Unesp	Presidente Prudente	457930	7553700	--
Zircão	ZPP 04*	Presidente Prudente	Presidente Prudente	454675	7549617	--
Zircão	ZP-01	Estádio Prudentão	Presidente Prudente	465030	755575	100 m
Zircão	ZP-04	Estádio Prudentão	Presidente Prudente	465030	755575	4 m
Zircão	ZP-05	Estádio Prudentão	Presidente Prudente	465030	755575	20 m
Zircão	ZPB-215	Presidente Bernardes	Presidente Prudente	439300	7551750	--
Zircão	ZPB-3A	Presidente Bernardes	Presidente Prudente	439300	7551750	--

Zircão	ZHF-01	Horto Florestal/PP	Presidente Prudente	455295	7554230	110 m
Zircão	ZHF-02	Horto Florestal/PP	Presidente Prudente	455295	7554230	35 m

\* esta amostra também foi utilizada em estudos metodológicos. Poderá ser identificada no trabalho como ZPPI<sub>0</sub>

\*\* Os nomes são dados simplesmente como forma de identificar as amostras. Em geral, segue um padrão para nomeação, contudo não há regra.

A figura 4 mostra o Mapa Geológico do Estado de São Paulo, bem como a localização das amostras coletadas e analisadas neste trabalho. Vale ressaltar que existem pontos indicados nos quais há a incidência de mais de uma amostra. Esses pontos representam amostras de poço, por isso existem poucos pontos.

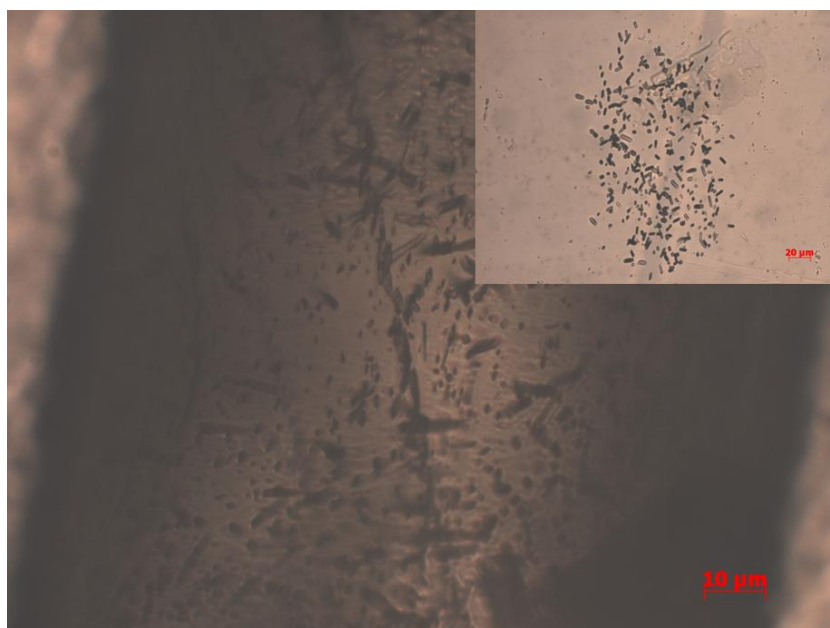


**Figura 4.** Área de estudo. Os pontos indicam o local de coleta das amostras<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Disponível em:

[http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.webmap.principal?p\\_brasil=N&p\\_cod\\_grupo=3&p\\_cod\\_mapa=68](http://geobank.sa.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.webmap.principal?p_brasil=N&p_cod_grupo=3&p_cod_mapa=68). Acesso em 01/12/2010

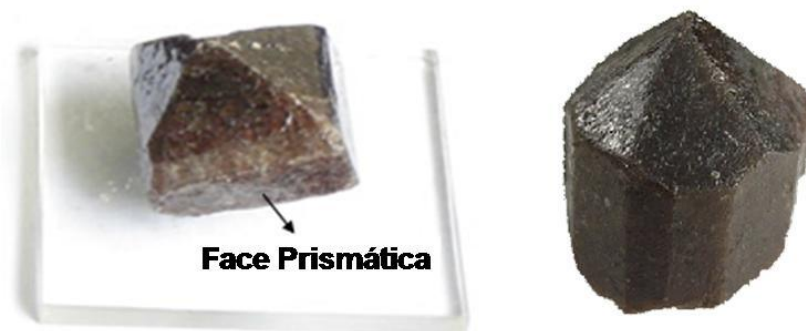
Para a realização de experimentos metodológicos tais como obtenção do fator de geometria e de  $L_0$  (medida do valor médio dos traços confinados sem annealing) foram utilizadas outras duas amostras. Uma delas pertence a Formação Rio Paraná (grupo Caiuá), também pertencente à Bacia Paraná ( $ZMDAl_0$ ) e outra denominada  $ZJPl_0$ , cuja coleta foi feita na região de João Pessoa, na Paraíba (cedida pela empresa Millennium Inorganic Chemicals). A opção por estas amostras para essas análises deve-se à grande concentração de grãos denominados “homogêneos” os quais são ideais para serem datados através do MTF no mineral zircão (Dias et al, 2009). Neste tipo de grão se observa que a densidade dos traços fósseis sobre a superfície, após a realização do ataque, é uniforme, conforme mostrado na figura 5.



**Figura 5.** Esquema mostrando a distribuição de traços no grão de zircão e na mica Muscovita

#### 4.3 – Separação de minerais

A *apatita* é um mineral com brilho vítreo, que varia do transparente ao opaco. Ocorre em rochas magmáticas e metamórficas. Seus cristais são hexagonais na forma de prismas alongados, com muitas faces e arestas arredondadas. O *zircão* é um cristal com brilho adamantinado, que varia do transparente ao opaco. Os grãos se apresentam na forma de cristais tetragonais ou arredondados, (Schuman, 1985). A figura 6 mostra imagens de apatita e zircão.



**Figura 6.** Grão de Zircão (à esquerda) e Apatita (à direita)

A separação de minerais da rocha foi realizada através dos processos de britagem manual, primeira e segunda britagem mecânica, peneirado, bateado, separação magnética (Frantz) e separação química. O processo de separação foi realizado no Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP de Rio Claro sob a supervisão do Prof. Dr. Peter Hackspacher.

O objetivo no processo de separação foi obter grãos de apatita e zircão em cada uma das amostras coletadas. O reconhecimento da apatita e do zircão é feito com uma lupa de aumento nominal de 4X10 e cada grão é coletado com uma ponta fina através do fenômeno físico de eletrostática.

#### **4.4 – Montagem, ataque químico e análise**

##### **4.4.1 - Apatita**

Os grãos de apatita foram coletados com uma ponta aguda, e com ajuda de uma lupa binocular, colocados, um a um, em um molde de silicone, mantendo a face que contém o eixo cristalográfico C (face prismática) paralelo ao molde. Os grãos escolhidos têm aproximadamente a mesma forma e tamanho. São escolhidos cerca de 100 grãos de apatita em cada montagem. Após a montagem as amostras foram lixadas, em três etapas: lixa 1200, com pressão manual; lixa 2400 por 3 minutos, com pressão manual e; lixa 4000 por 6 minutos à 80 rpm na politriz. Posteriormente a amostra foi polida com pasta de diamante de granulometria de 1 e  $\frac{1}{4}$   $\mu\text{m}$  durante 5 e 10 minutos, respectivamente, à 60 rpm na politriz. O ataque químico padrão é realizado com  $\text{HNO}_3$  ao 5%, a 20 °C, durante 55 segundos (Tello et al, 2003). A contagem dos traços, para obter a densidade dos traços de fissão espontânea e dos traços de fissão induzida, é realizada em uma área específica denominada campo, escolhido

aleatoriamente na parte central de cada grão. Por outro lado, o comprimento dos traços, no caso da apatita e do zircão, é medido em traços confinados (contidos inteiramente dentro do mineral) paralelos à superfície de observação.

Para se conseguir medir 100 traços confinados, se analisa entre 100 e 500 grãos. Em geral, os traços confinados são atacados quimicamente porque estes cruzam algum traço que chega até a superfície do grão (track-in-track, TINTs) ou cruzam alguma fratura natural da estrutura cristalina da apatita que também atinge a superfície do grão (track-in-cleavage, TINCLES). Com a medida do comprimento dos traços espontâneos confinados na apatita obtemos a distribuição que contém informação sobre a história térmica da região onde a apatita foi coletada. Isto porque os traços que foram submetidos a temperaturas mais intensas, em milhões de anos (os mais velhos), são mais curtos que os traços que foram submetidos a temperaturas menos intensas (os mais novos), e, como os traços são gerados continuamente durante a idade geológica, teremos desta forma uma distribuição de comprimentos dos traços.

#### **4.4.2 - Zircão**

Os grãos de zircão foram coletados com uma ponta aguda e com ajuda de uma lupa binocular, colocados um a um em uma lâmina de alumínio, untada com graxa transparente, mantendo a face que contém o eixo cristalográfico C (face prismática) paralelo à lâmina de alumínio. Os grãos escolhidos têm aproximadamente a mesma forma e tamanho.

A lâmina contendo os grãos é colocada sobre uma chapa até atingir a temperatura de ~ 320 °C. Essa temperatura é necessária para que os grãos sejam incrustados no Teflon® PFA.

Após a montagem no teflon® PFA cada amostra foi lixada, em três etapas: lixa 1200 com pressão manual; lixa 2400 por 4 minutos à 80 rpm na politriz e lixa 4000 por 6 minutos à 80 rpm na politriz. Posteriormente a amostra foi polida com pasta de diamante de granulometria de  $\frac{1}{4}$   $\mu\text{m}$  durante 10 minutos à 60 rpm na politriz.

O passo seguinte foi realizar o ataque químico das amostras que é feito com uma mistura de NaOH:KOH (1:1), denominada na literatura como eutectic à  $225 \pm 2$  °C (Tagami et al, 1996a), em períodos que variam de 4h à 72 horas (Garver, 2005), pois o tempo de ataque depende das características de cada grão. No caso das amostras nossas amostras os períodos variaram de 4h à 18h.

#### 4.5 – Microscopia óptica

O sistema de microscopia óptica é constituído de um microscópio Zeiss AXIO IMAGER M1m, aumentos de 5X, 10X, 40X, 100X, 150X na objetiva e 10X na ocular, ligado a um computador e uma câmara digitalizadora (;Zeiss, Modelo: AxioCam MRc 5). Este sistema dispõe do programa Axio Vision, *versão 4.7.1*. O DFQB, FCT-UNESP possui este equipamento e está sob a responsabilidade da Prof. Dr. Carlos Alberto Tello Sáenz.

#### 4.6 – Medidas de Eficiência (Fator de Geometria)

As medidas de eficiência de detecção dos traços induzidos no zircão e na mica fornecem (fator de geometria) um importante dado ao MTF, principalmente ao que envolve o Método do Detector Externo. Neste método, a densidade de traços fósseis é obtida no mineral enquanto que a densidade de traços induzidos (após a irradiação) é obtida no detector externo (mica muscovita, no caso). Por tratar-se de detectores diferentes, a medida de densidade feita ao microscópio óptico poderia acarretar erros sistemáticos inerentes à metodologia, portanto, é necessária uma correção que leva em consideração a estrutura cristalina ou molecular do detector vinculada a eficiência do detector de fragmentos de fissão onde é realizada esta medida.

No caso do mineral, os traços se formam em todo seu volume e, após um ataque químico conveniente, esses traços podem ser revelados, o que caracterizaria uma geometria  $4\pi$ . Por outro lado, os traços induzidos na mica são gerados por núcleos de  $^{235}\text{U}$  que fissionaram no mineral e atingiram a superfície da mica justaposta ao mineral durante a irradiação. Isto caracteriza uma geometria  $2\pi$ . Como temos dois detectores diferentes de traços (a mica e o mineral) deve-se considerar a eficiência de detecção de cada um deles. A razão de eficiência de detecção é denominada fator de geometria  $g$ . O valor atualmente aceito para este fator de geometria no zircão é 0,684 de Iwano e Danhara, 1998.

Para obter o fator de geometria, uma amostra de João Pessoa, Paraíba, denominada JPA foi aquecida a  $750^{\circ}\text{C}$  durante 6 horas de modo que todos os traços fósseis fossem apagados do mineral. Depois das amostras serem aquecidas, estas foram montadas, lixadas, polidas e atacadas quimicamente (como descrito nas seções anteriores). A montagem com aproximadamente 100 grãos foi analisada ao microscópio óptico, ou seja, observou-se que não havia traços em nenhum destes grãos. Desta forma foi corroborado que o annealing de traços fósseis foi total. Esta montagem, com grãos de zircão sem traços fósseis, foi enviada ao

reator nuclear do IPEN/CNEN para ser irradiado e obter os traços induzidos. Uma mica muscovita foi justaposta a esta montagem de tal forma que temos traços induzidos no zircão e na mica. Depois da irradiação esta montagem passou por um lixamento com lixa de granulometria  $\sim 2 \mu\text{m}$ , e por polimento com pasta de diamante e panos de granulometrias de  $1 \mu\text{m}$  e  $\frac{1}{4} \mu\text{m}$ . Após esse processo, a densidade de traços induzidos foi medida ao microscópio óptico tanto no mineral como na mica.

Finalmente, após as medidas de densidade de traços induzidos na mica e no mineral pudemos determinar o fator de geometria calculando a razão destas medidas.

#### **4.7 – Obtenção do traço sem annealing, $L_0$**

Para obter os comprimento dos traços sem annealing foram realizadas montagens de grãos de zircão de duas amostras pertencentes ao Bacia Paraná (ZMDAl<sub>0</sub> e ZPPl<sub>0</sub>) e uma amostra coletada na região de João Pessoa, na Paraíba, denominada de ZJPl<sub>0</sub>. Para realizar este experimento os grãos foram aquecidos a  $750 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 6 horas de modo que todos seus traços fósseis foram apagados. Em seguida, os grãos foram incrustados no Teflon® PFA para serem, posteriormente, lixadas (lixas de 1200#, 2400# e 4000#) e polidas (pasta de diamante e panos de granulometria de  $1 \mu\text{m}$  e  $\frac{1}{4} \mu\text{m}$ , respectivamente).

Após esse processo, as amostras foram justapostas a uma mica muscovita e enviadas ao reator nuclear para induzir fissões dos núcleos de  $^{235}\text{U}$  contidos como impureza no zircão. Essas fissões são responsáveis pela formação dos traços sem annealing, uma vez que após sua formação, essas amostras não passaram por nenhum tratamento térmico. Ao voltar da irradiação, as montagens passaram por um ataque químico padrão do zircão (NaOH:KOH a  $225 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) por 18 horas, de modo que tivessem seus traços induzidos revelados. Após a medição, ao microscópio óptico, dos traços confinados induzidos foram obtidos os valores médios.

## **V – RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **5.1 – Idades do grupo Bauru**

#### **5.1.1 – Idades obtidas em zircão**

Para obter estas idades através da equação 1, além dos valores de  $\lambda$ ,  $\lambda_F$ ,  $C_{238}$  que são mostrados na seção 3.3, foram utilizados os valores de  $\rho_S$  e  $\rho_I$  indicados na seção 3.3 e o valor do  $R_M$  (referente á dosimetria de nêutrons) cujo valor utilizado é de  $2,27 \times 10^{-9}$  para a amostra ZPP-04,  $1,95 \times 10^{-9}$  para as amostras ZUB-29, ZMAC-27, ZBN-05, ZCOB-31 ZB-03 e ZB-04 e  $2,06 \times 10^{-9}$  para as amostras ZPB 215, ZPB 3A, ZP-01, ZP-04, ZP-05, ZHF- 01 e ZHF-02. Na tabela 2 são mostrados os resultados das idades obtidas nas amostras.

Na tabela 2 pode-se observar que existe um número grande de idades entre 180 e 600 Ma. Isto é natural em amostras coletadas em bacias, pois as fontes que forneceram o material detrítico podem ser várias. Também pode-se observar nesta tabela que as razões de  $L/L_0$  estão todos próximos de um. Isto indica que estas amostras não sofreram annealing (aquecimentos) significativos quando faziam parte da fonte nem mesmo quando foram fazer parte da bacia. Entretanto, as amostras ZB-03 e ZB-04 sofreram um annealing de 7 e 16% respectivamente, ou seja, estas amostras teriam sofrido um aquecimento passaram a fazer parte da bacia. Uma hipótese para este aquecimento pode ser o hidrotermalismo que atualmente existe na região de Presidente Prudente. Estas medidas podem indicar que este evento térmico está acontecendo a milhões de anos.



**Tabela 2.** Dados analíticos e idades das amostras de zircão datadas via MTF

$\rho_s \times 10^7$ $\text{cm}^{-2}$	$N_s$	$\rho_l \times 10^6$ $\text{cm}^{-2}$	$N_l$	Idade (Ma) $\pm 2\sigma$	$L/L_0$ [Nc]
<b>ZBN-05</b>					
1,64	21	1,34	16	191 $\pm$ 64	
1,72	22	2,84	15	96 $\pm$ 33	
2,00	64	1,34	16	233 $\pm$ 66	
1,64	21	1,13	6	226 $\pm$ 106	
1,6	92	1,09	23	230 $\pm$ 55	
1,93	37	2,6	31	117 $\pm$ 29	
2,08	40	2,69	32	122 $\pm$ 30	0,97 $\pm$ 0,04 [7]
2,14	41	1,68	20	199 $\pm$ 56	
2,19	42	1,34	16	254 $\pm$ 76	
2,15	55	1,98	21	170 $\pm$ 45	
2,27	29	1,64	13	216 $\pm$ 73	
1,72	33	1,26	15	213 $\pm$ 68	
1,72	33	0,67	8	395 $\pm$ 157	
2,42	31	2,27	12	168 $\pm$ 58	
<b>ZPB 215</b>					
2.35	46	1.08	13	354 $\pm$ 113	
1.07	21	0.89	8	199 $\pm$ 84	
1.59	78	1.11	20	236 $\pm$ 61	
1.55	38	0.61	11	413 $\pm$ 143	--
1.63	24	1.00	9	269 $\pm$ 106	
1.84	18	0.89	8	338 $\pm$ 145	
1.75	60	0.89	8	322 $\pm$ 123	
<b>ZPB-3<sup>a</sup></b>					
1.88	12	1.51	8	205 $\pm$ 94	
2.27	29	0.76	4	485 $\pm$ 260	
1.56	20	2.27	12	115 $\pm$ 42	
1.77	34	0.85	9	341 $\pm$ 129	
1.41	18	0.95	5	245 $\pm$ 125	--
1.8	23	1.34	16	221 $\pm$ 73	
1.88	60	0.84	10	364 $\pm$ 126	
2.03	26	1.01	8	330 $\pm$ 135	
<b>ZUB-29</b>					
2,66	51	0,95	10	432 $\pm$ 152	
2,66	17	1,89	10	220 $\pm$ 89	--
2,19	28	1,61	17	213 $\pm$ 67	

Tabela 2. (cont) Dados analíticos e idades das amostras de zircão datadas via MTF

$\rho_s \times 10^7$ cm <sup>-2</sup>	N <sub>s</sub>	$\rho_l \times 10^6$ cm <sup>-2</sup>	N <sub>l</sub>	Idade (Ma) ± 2σ	L/L <sub>0</sub> [N <sub>c</sub> ]
2,81	72	3,53	42	126 ± 25	
2,76	53	1,85	22	233 ± 61	
3,02	58	1,76	21	267 ± 70	
2,79	125	1,28	27	339 ± 75	
2,62	67	2,02	24	203 ± 50	
2,59	83	1,51	32	267 ± 58	
2,89	74	2,86	34	159 ± 34	
2,6	50	2,18	26	187 ± 47	0,96 ± 0,04
3,2	41	1,68	20	296 ± 83	[7]
3,05	39	0,84	10	553 ± 199	
3,36	43	1,09	13	472 ± 152	
2,19	14	1,51	8	226 ± 101	
2,11	27	1,51	18	218 ± 68	
2,11	27	2,44	29	136 ± 37	
2,6	50	0,92	11	434 ± 147	
2,5	32	1,34	16	289 ± 90	
<b>ZP-04</b>					
2,45	47	1,01	12	395 ± 130	
1,95	25	0,95	5	338 ± 167	
2,19	98	0,67	8	525 ± 195	
1,88	24	1,32	7	234 ± 101	
2,03	39	1,32	7	253 ± 105	
2,19	14	0,76	4	468 ± 267	
1,56	20	0,92	11	278 ± 106	
2,5	32	0,95	5	430 ± 208	
2,55	49	0,57	3	715 ± 427	
1,95	25	1,13	6	283 ± 130	
2,07	53	0,59	7	566 ± 230	
1,25	24	0,84	10	245 ± 93	
1,93	74	0,59	7	528 ± 211	--
1,48	19	1,32	7	186 ± 83	
1,45	37	0,59	7	400 ± 167	
1,56	20	1,7	9	152 ± 62	
1,95	25	0,59	7	535 ± 231	
1,63	52	1,13	6	236 ± 103	
1,25	64	0,42	5	481 ± 225	
1,51	29	0,17	2	1357 ± 995	
1,64	21	0,57	3	468 ± 290	
1,2	23	0,57	3	345 ± 213	
2,66	34	1,09	13	396 ± 131	
2,08	40	0,59	7	569 ± 236	

Tabela 2. (cont) Dados analíticos e idades das amostras de zircão datadas via MTF

$\rho_s \times 10^7$ cm <sup>-2</sup>	N <sub>s</sub>	$\rho_l \times 10^6$ cm <sup>-2</sup>	N <sub>l</sub>	Idade (Ma) ± 2σ	L/L <sub>0</sub> [N <sub>c</sub> ]
1,77	34	0,25	3	1084 ± 656	
1,93	37	1,13	6	279 ± 124	--
<b>ZP-01</b>					
1,80	46	0,66	14	441 ± 137	
2,11	81	0,92	11	372 ± 122	
3,34	107	1,51	34	361 ± 74	
2,89	74	1,18	14	400 ± 119	
1,95	50	1,09	13	294 ± 93	
2,37	91	1,18	28	330 ± 74	
2,34	15	0,95	5	404 ± 210	
2,73	35	0,92	11	479 ± 168	
2,27	29	0,34	4	1043 ± 560	
1,66	53	0,71	17	378 ± 108	
2,66	85	1,18	28	369 ± 83	
1,22	47	1,26	15	161 ± 49	--
0,99	38	0,67	8	243 ± 95	
1,81	58	1,60	19	188 ± 51	
1,48	19	0,84	10	290 ± 115	
2,03	78	0,80	17	411 ± 113	
1,48	38	0,59	7	411 ± 171	
2,19	28	2,46	13	148 ± 50	
1,80	23	0,76	4	387 ± 211	
1,84	47	1,13	6	266 ± 117	
1,77	68	0,50	6	565 ± 243	
2,03	78	0,61	13	533 ± 163	
1,64	21	0,50	6	525 ± 245	
<b>ZP-05</b>					
2,4	46	0,67	8	573 ± 222	
2,23	114	0,82	13	441 ± 132	
1,17	45	0,71	15	272 ± 83	
1,75	56	0,76	9	377 ± 137	
2,15	55	1,68	20	211 ± 57	
1,82	35	1,34	16	224 ± 69	
2,39	107	1,01	12	386 ± 120	
1,79	80	0,34	4	836 ± 431	--
1,88	24	0,67	8	452 ± 187	
2,27	29	0,76	4	485 ± 260	
1,56	20	2,27	12	115 ± 42	
1,77	34	0,85	9	341 ± 129	
1,41	18	0,95	5	245 ± 125	
1,8	23	1,34	16	221 ± 73	

Tabela 2. (cont) Dados analíticos e idades das amostras de zircão datadas via MTF

$\rho_s \times 10^7$ cm <sup>-2</sup>	N <sub>s</sub>	$\rho_l \times 10^6$ cm <sup>-2</sup>	N <sub>l</sub>	Idade (Ma) ± 2σ	L/L <sub>0</sub> [N <sub>c</sub> ]
1,88	60	0,84	10	364 ± 126	
2,03	26	1,01	8	330 ± 135	--
<b>ZHF-01</b>					
2,19	56	0,76	9	468 ± 170	
1,94	62	0,59	7	531 ± 214	
2,66	51	1,18	14	369 ± 113	
1,72	66	1,01	12	280 ± 89	
2,03	26	1,85	22	182 ± 54	
2,11	27	0,34	4	976 ± 526	
2,08	40	1,01	12	338 ± 113	
1,93	37	0,92	11	341 ± 119	
1,93	37	0,59	7	528 ± 220	--
2,03	26	1,09	13	305 ± 105	
2,08	40	0,59	7	569 ± 236	
2,19	42	0,67	8	525 ± 205	
1,56	40	0,92	11	278 ± 96	
1,56	40	1,09	13	236 ± 77	
2,19	28	0,42	5	820 ± 401	
1,88	12	0,95	5	325 ± 174	
1,25	24	1,26	15	164 ± 55	
<b>ZHF-02</b>					
2,0	64	0,63	10	512 ± 177	
3,39	65	1,6	19	347 ± 93	
2,03	39	1,18	14	284 ± 90	
3,07	59	1,51	18	333 ± 92	
2,5	48	1,01	12	404 ± 132	
2,27	29	2,84	15	133 ± 43	
1,6	41	1,68	20	158 ± 44	--
1,54	59	0,59	7	425 ± 172	
2,89	37	1,26	15	374 ± 117	
1,95	25	1,13	6	283 ± 130	
1,72	55	0,42	5	653 ± 307	
1,6	41	0,84	10	312 ± 112	
1,98	38	1,51	18	216 ± 63	
<b>ZMAC-27</b>					
2,45	60	2,5	40	154 ± 33	
2,04	20	1	4	317 ± 174	
1,94	19	1,33	12	227 ± 85	
2,53	99	2,69	43	148 ± 28	-
2,91	57	0,89	8	500 ± 191	
2,24	11	1,75	7	201 ± 98	

**Tabela 2. (cont).** Dados analíticos e idades das amostras de zircão datadas via MTF

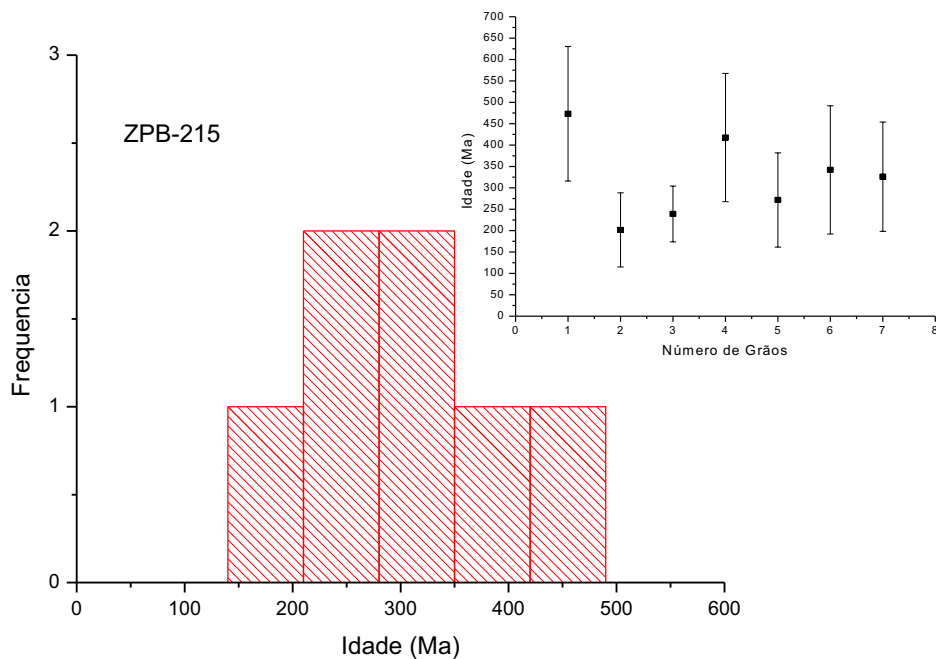
$\rho_s \times 10^7$ cm <sup>-2</sup>	N <sub>s</sub>	$\rho_l \times 10^6$ cm <sup>-2</sup>	N <sub>l</sub>	Idade (Ma) ± 2σ	L/L <sub>0</sub> [N <sub>c</sub> ]
2,18	32	1,44	13	235 ± 79	
2,3	45	2,11	19	171 ± 48	
2,4	47	1,67	15	225 ± 68	
2,35	23	0,78	7	463 ± 202	
2,45	24	1,44	13	264 ± 92	
2,11	31	1,22	11	269 ± 96	
1,63	16	0,89	8	286 ± 125	
3,06	45	1,89	17	253 ± 73	--
4,35	64	2	18	337 ± 92	
2,24	11	1,75	7	201 ± 98	
2,45	72	2,56	23	151 ± 37	
2,31	34	0,89	8	401 ± 159	
1,63	24	0,56	5	451 ± 223	
2,35	46	1,67	15	220 ± 67	
1,77	26	1,33	12	208 ± 73	
<b>ZPP-04</b>					
2,73	35	1,13	9	431 ± 163	
2,66	34	1,68	20	286 ± 82	
2,81	18	2,46	13	208 ± 77	
2,34	30	0,84	10	497 ± 184	
2,73	35	2,6	31	191 ± 49	
2,81	36	2,94	35	175 ± 43	
2,34	30	1,51	18	281 ± 85	0,91 ± 0,01 [2]
2,66	17	0,95	5	500 ± 256	
2,58	33	0,67	8	674 ± 268	
2,19	14	2,84	15	141 ± 53	
2,42	31	1,09	13	398 ± 134	
2,24	43	1,09	13	369 ± 119	
2,5	16	1,32	7	341 ± 156	
2,81	18	0,95	5	528 ± 269	
1,95	25	0,92	11	380 ± 139	
<b>ZCOB-31</b>					
2,5	16	1,32	7	294 ± 134	
2,24	43	1,43	17	245 ± 72	
2,53	81	1,24	41	317 ± 64	
2,5	16	1,51	8	258 ± 113	0,97 ± 0,04 [4]
2,38	76	1,01	24	364 ± 88	
2,42	31	1,18	14	320 ± 105	
2,27	29	1,34	16	263 ± 83	
2,54	65	1,6	19	248 ± 66	
2,34	30	1,7	9	216 ± 83	

Tabela 2. (cont) Dados analíticos e idades das amostras de zircão datadas via MTF

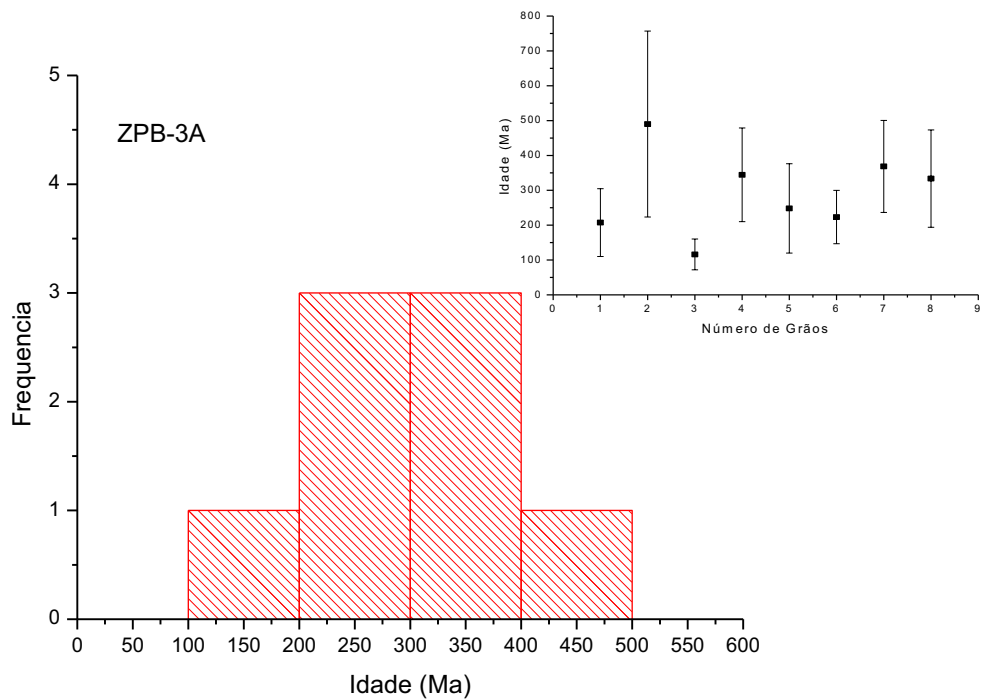
$\rho_s \times 10^7$ cm <sup>-2</sup>	N <sub>s</sub>	$\rho_t \times 10^6$ cm <sup>-2</sup>	N <sub>t</sub>	Idade (Ma) ± 2σ	L/L <sub>0</sub> [N <sub>c</sub> ]
1,95	25	1,89	10	162 ± 61	
2,27	29	2,27	12	157 ± 55	
2,46	63	1,26	15	304 ± 89	
2,11	27	1,32	7	249 ± 107	
2,27	29	0,95	5	371 ± 181	
2,34	15	0,76	4	475 ± 269	
2,55	49	1,6	19	250 ± 69	--
2,42	31	1,43	17	264 ± 81	
2,55	49	2,1	25	191 ± 48	
2,54	65	0,67	8	575 ± 218	
2,86	55	2,77	33	162 ± 37	
2,25	72	1,18	14	297 ± 89	
<b>ZB-03</b>					
3,18	61	1,09	13	447 ± 139	
2,81	54	3,19	38	139 ± 30	
2,81	18	1,51	8	289 ± 124	
3,59	23	2,08	11	269 ± 100	
2,42	31	2,18	26	174 ± 47	0,84 ± 0,05 [5]
3,2	41	0,92	11	529 ± 182	
2,81	18	2,08	11	212 ± 82	
2,34	15	1,7	9	216 ± 92	
2,58	33	1,85	22	218 ± 61	
<b>ZB-04</b>					
3,28	21	0,67	8	734 ± 308	
2,97	19	3,78	20	124 ± 40	
3,2	41	1,76	21	283 ± 78	
3,12	60	1,51	18	321 ± 88	
3,44	22	1,51	18	352 ± 114	
3,05	39	1,18	14	400 ± 127	
3,13	40	1,18	14	410 ± 129	
2,97	19	0,63	5	709 ± 359	0,93 ± 0,05 [5]
2,97	76	1,01	12	452 ± 143	
3,13	20	1,51	8	321 ± 135	
3,05	39	2,35	28	203 ± 52	
2,89	37	1,43	17	314 ± 94	
2,97	38	3,19	38	146 ± 35	
2,66	51	0,95	10	432 ± 152	
2,97	19	4,54	24	103 ± 32	

As idades pelo método de traços de fissão foi obtida através da equação 1;  $\rho_s$  ( $\rho_t$ ), densidade de traços espontânea (induzida) contados no grão (mica); N<sub>s</sub> (N<sub>t</sub>), número de traços usados para determinar  $\rho_s$  ( $\rho_t$ ); N<sub>c</sub> é o número de traços confinados medidos em cada amostra. L/L<sub>0</sub> é a razão do valor médio entre os traços confinados fósseis com o valor médio dos traços induzido. Esta razão mede o grau de annealing natural que sofreu a amostra. Utilizamos o valor de L<sub>0</sub> (=11.05 ± 0.08) de Yamada et al. 1995.

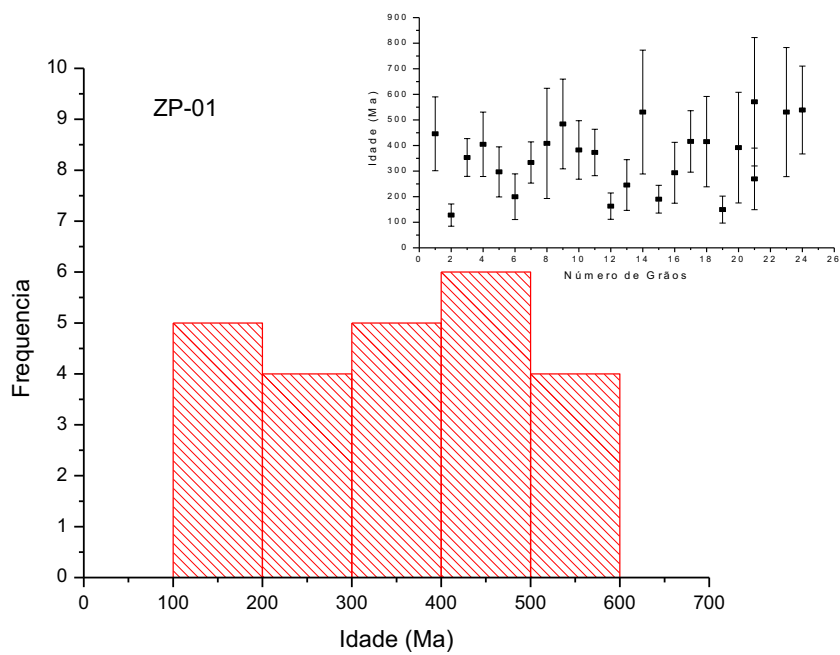
Das figuras 7 a 18 são mostradas as distribuições das idades e as idades obtidas em cada amostra na Formação de Presidente Prudente.



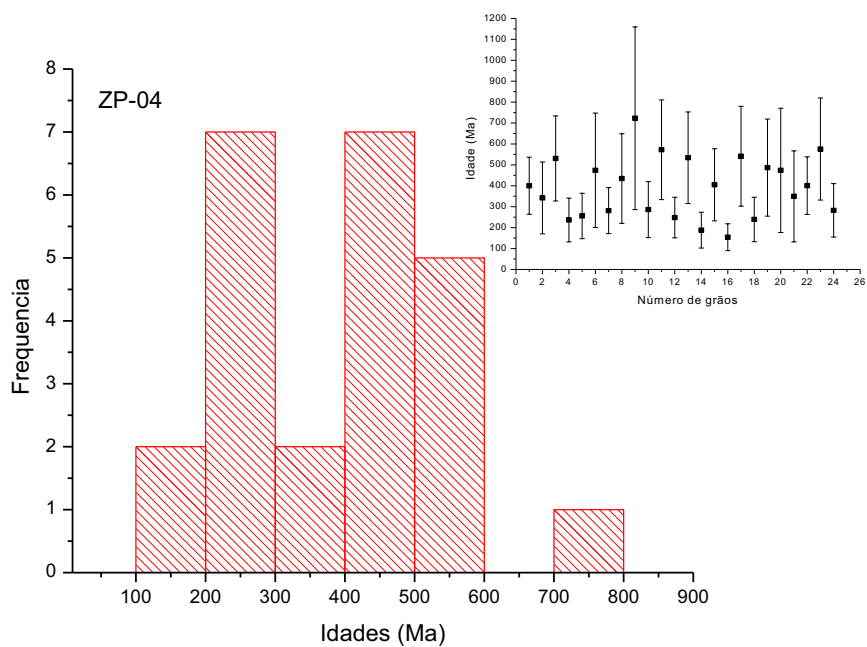
**Figura 7.** Distribuição de idades na amostra ZPB-215



**Figura 8.** Distribuição de idades na amostra ZPB-3A

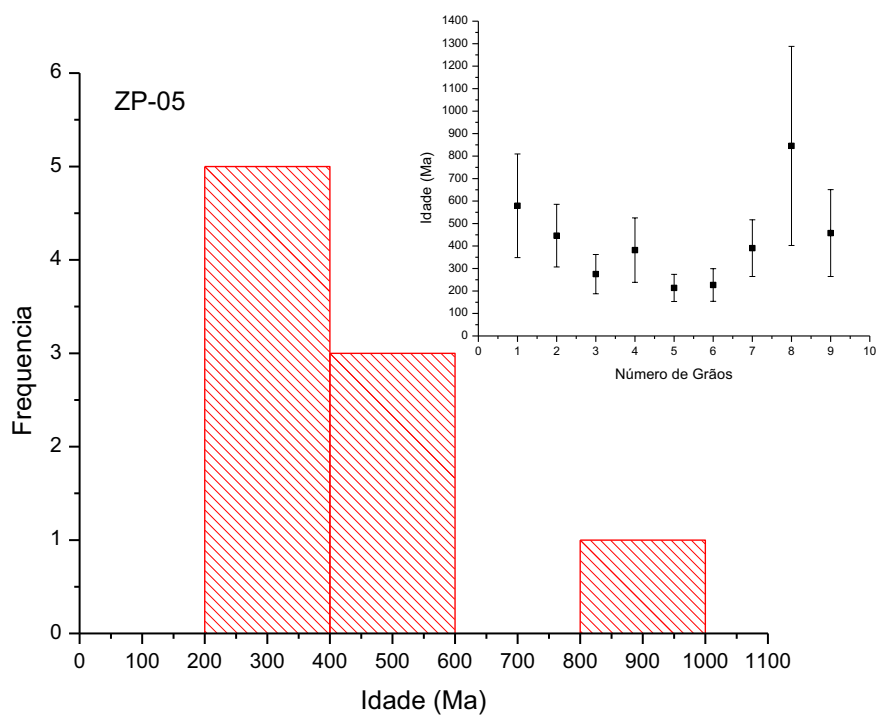


**Figura 9.** Distribuição de idades na amostra ZP-01

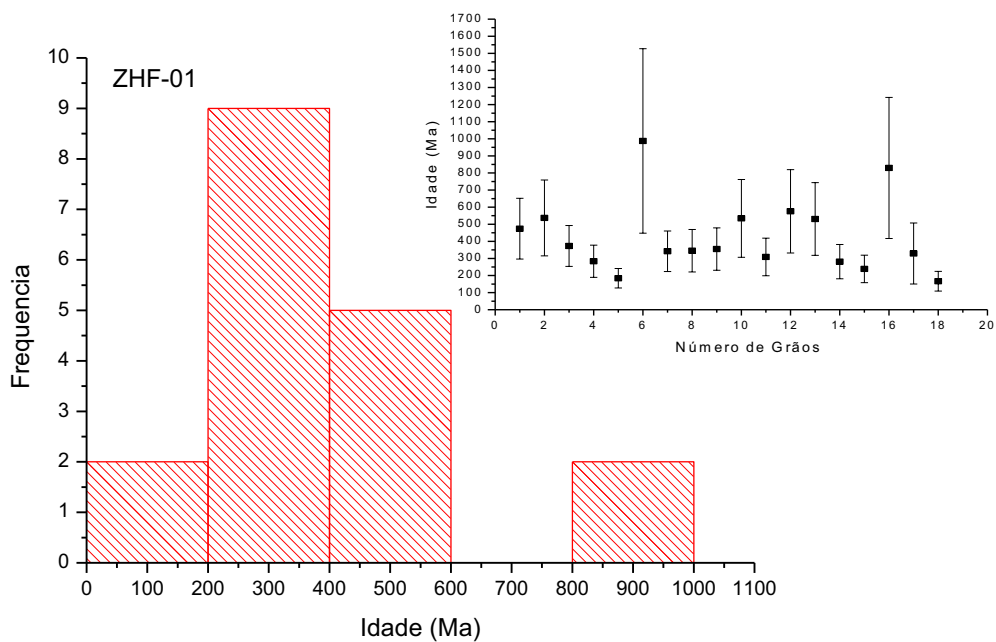


**Figura 10.** Distribuição de idades na amostra ZP-04

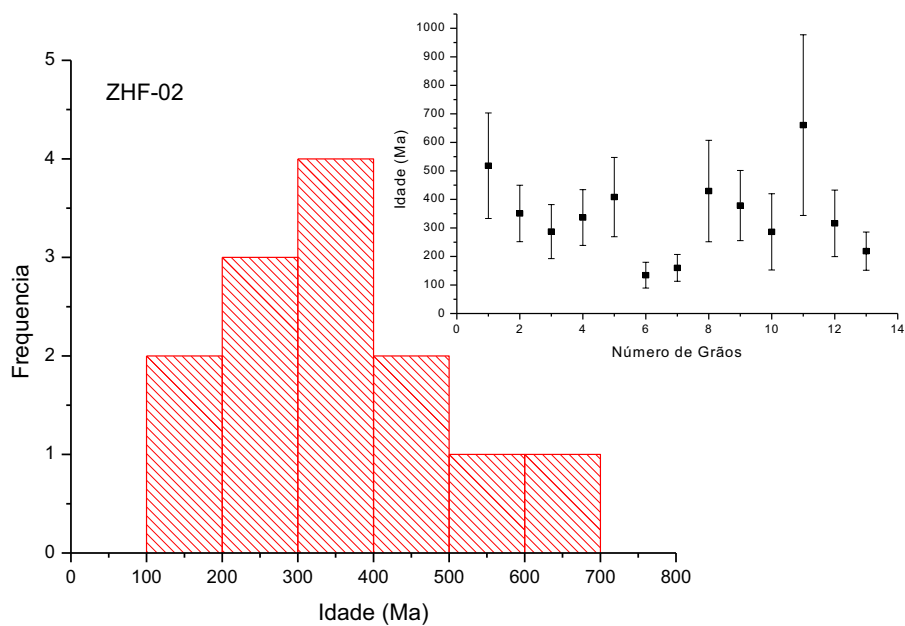




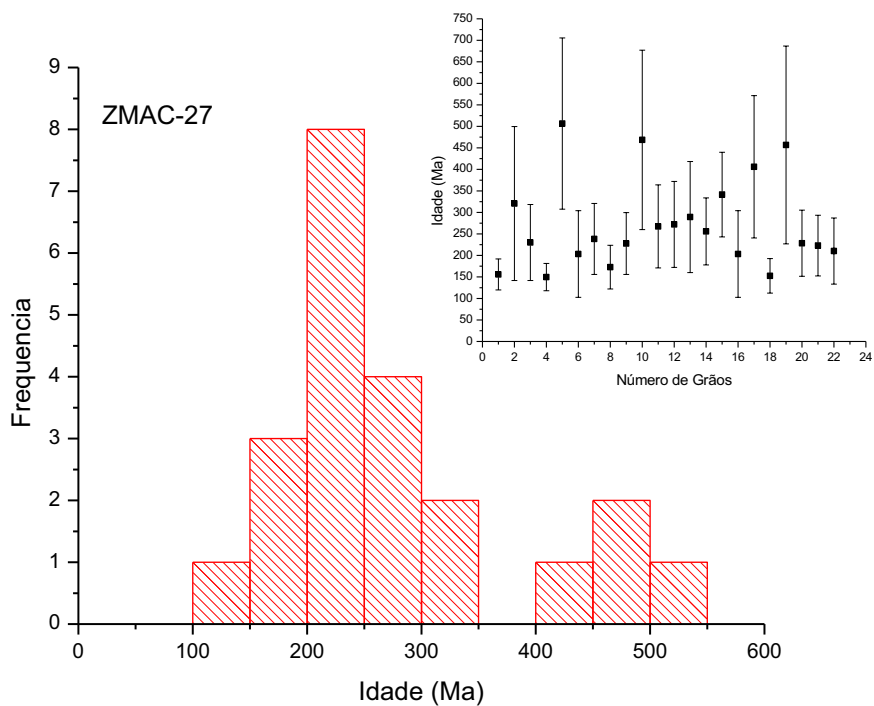
**Figura 11.** Distribuição de idades na amostra ZP-05



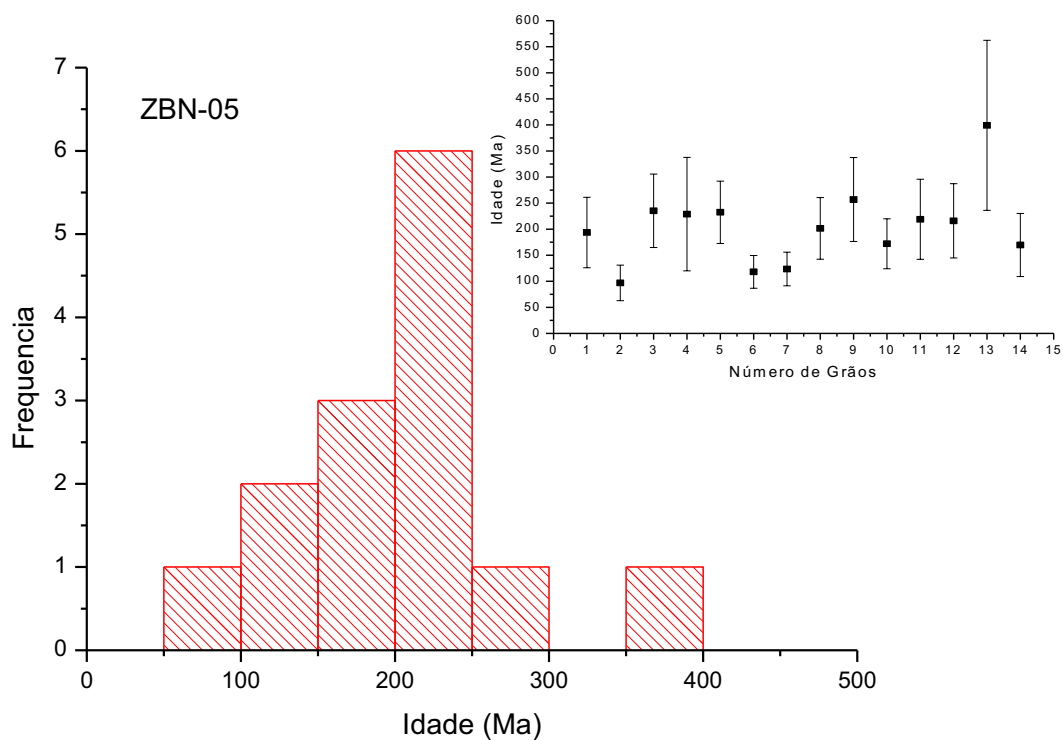
**Figura 12.** Distribuição de idades na amostra ZHF-01



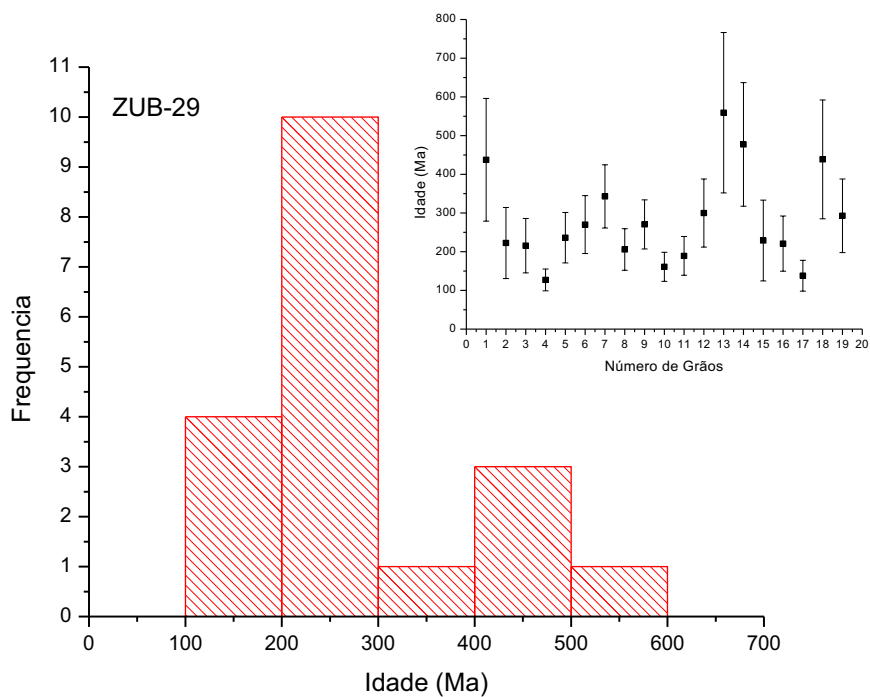
**Figura 13.** Distribuição de idades na amostra ZHF-02



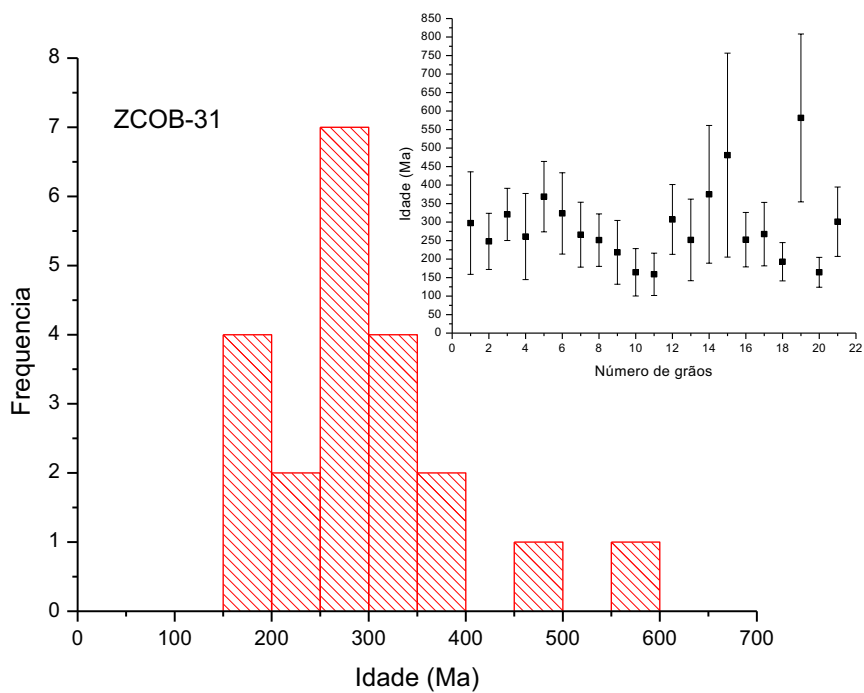
**Figura 14.** Distribuição de idades na amostra ZMAC-27



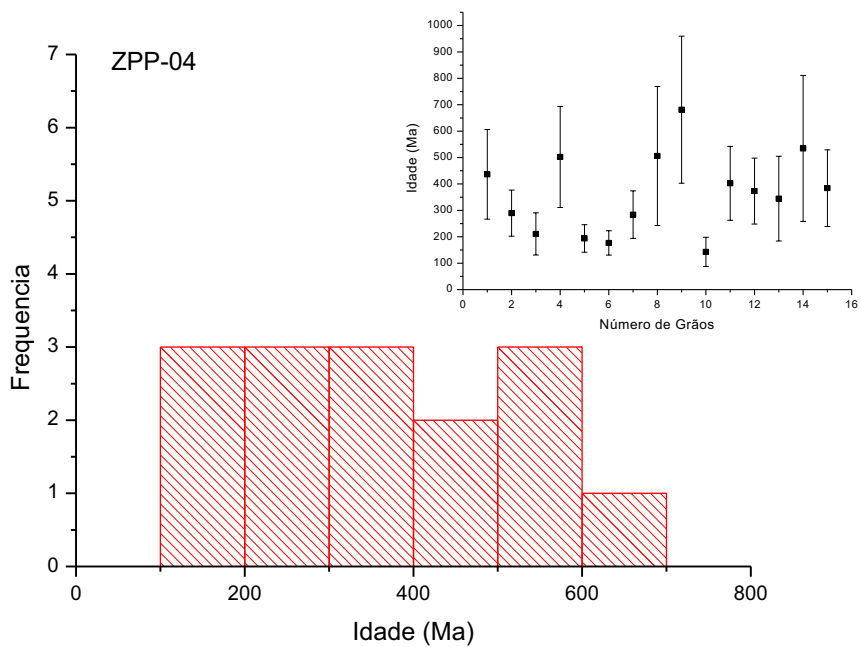
**Figura 15.** Distribuição de idades na amostra ZBN-05



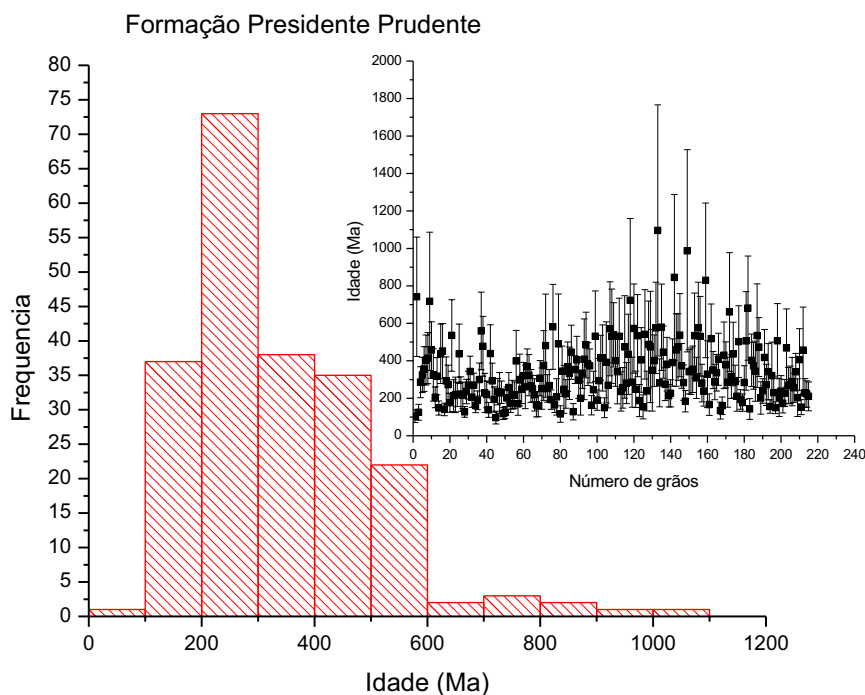
**Figura 16.** Distribuição de idades na amostra ZUB-29



**Figura 17.** Distribuição de idades na amostra ZCOB-31



**Figura 18.** Distribuição de idades na amostra ZPP-04

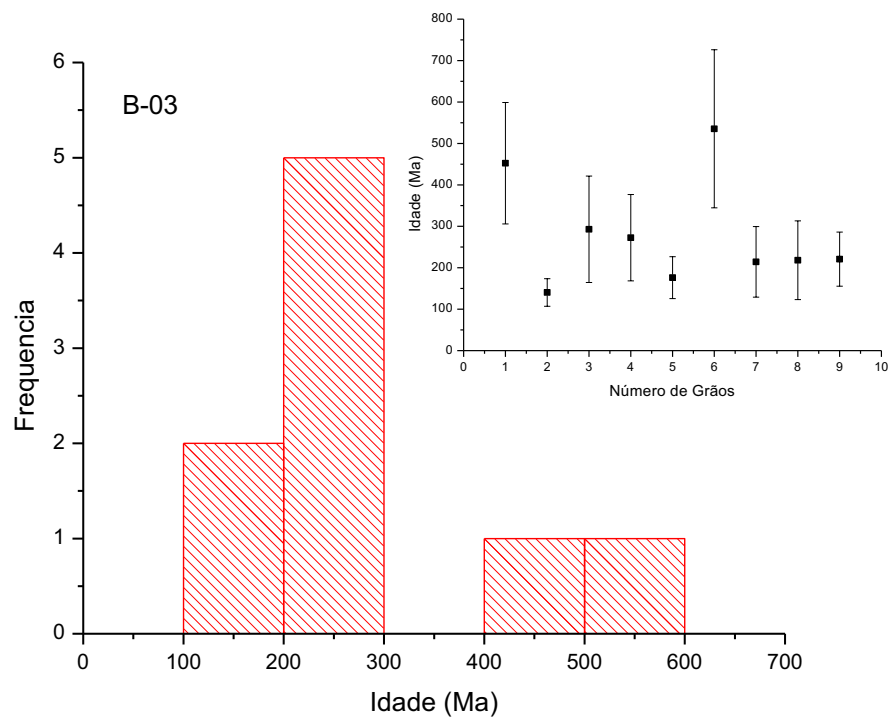


**Figura 19.** Distribuição de idades Formação Presidente Prudente

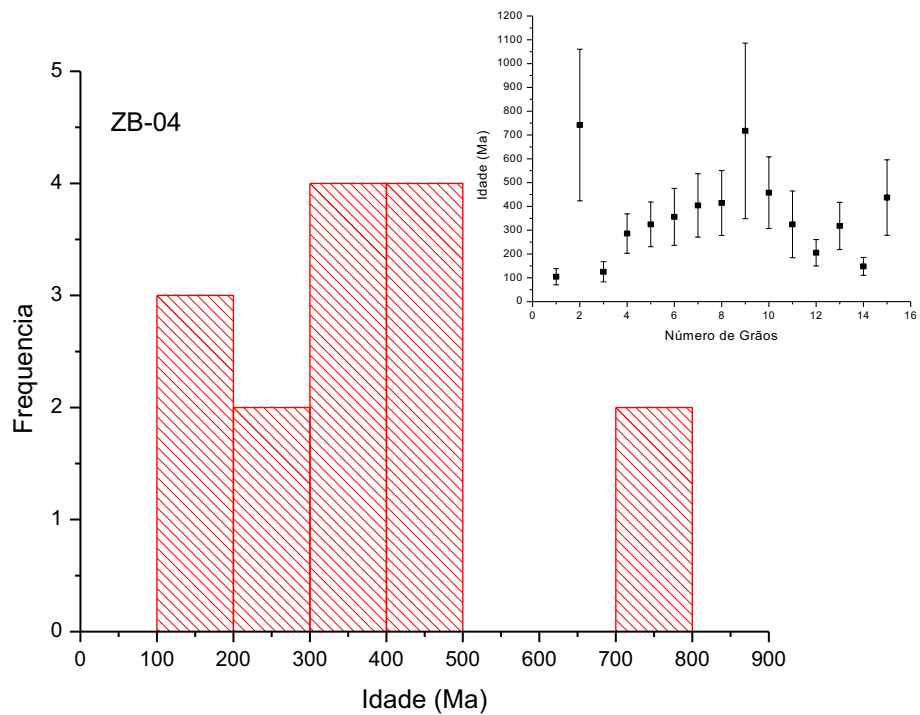
As distribuições de idades representado nas figuras 7 à 18 são de amostras da formação Presidente Prudente. A figura 19 representa uma junção de todas estas amostras onde a maioria dos grãos apresenta idades entre 100 e 600 Ma. Este intervalo de idades pode indicar que as amostras que fazem parte da bacia Bauru passaram por fenômenos tais como a orogenia Gondwana, ocorrida entre 230 e 290 Ma, a Devoniana, ocorrida entre 330 e 390 Ma e a Brasiliana, ocorrida entre 400 e 600 Ma. É importante salientar que estas orogenias não foram as responsáveis pela cristalização dos minerais, mas foram importantes no fornecimento de detritos sedimentares durante a composição da bacia Bauru.

As amostras ZB-03 e ZB-04, coletadas na região de Pirapozinho, possuem idades tanto em zircão quanto em apatita. Estas amostras apresentam uma peculiaridade em relação às outras pois são as amostras de zircão que apresentam maior grau de annealing.

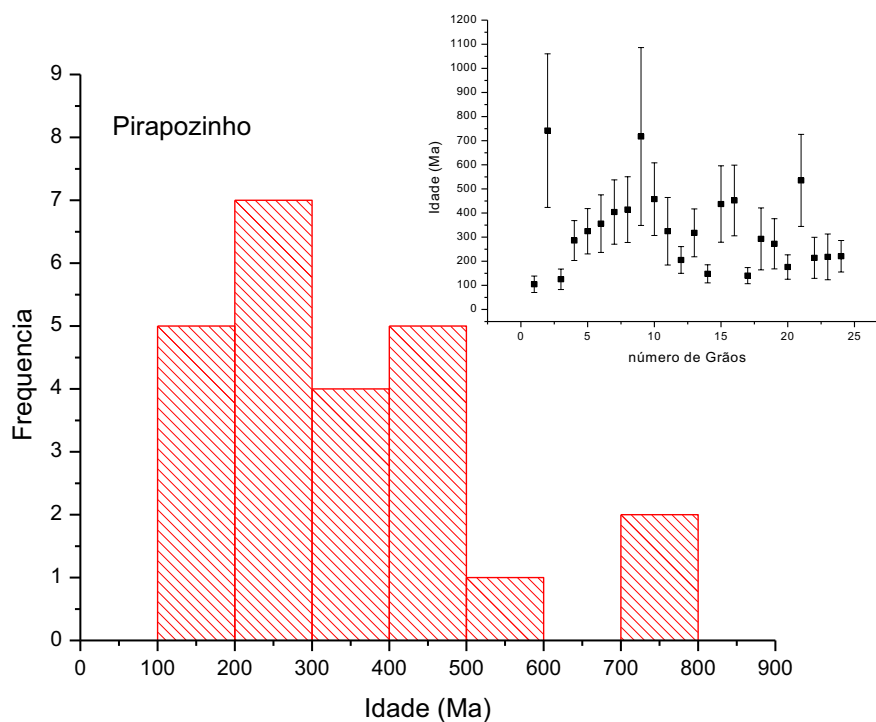
As figuras 20 e 21 mostram a distribuição de idades de ZB-03 e ZB-04, respectivamente. Na figura 22 é mostrada a distribuição de idades destas duas amostras, o que permite melhor visualização dos resultados. Nesta distribuição podemos observar que as idades variam de 100 a 800 Ma dando destaque às orogenias Gondwana e Devoniana, características desta formação (entre 200 – 400 Ma).



**Figura 20.** Distribuição de idades ZB-03



**Figura 21.** Distribuição de idades ZB-04



**Figura 22.** Distribuição de idades Pirapozinho

### 5.1.2 – Idades obtidas em apatita

Na Tabela 3 são apresentados os resultados das idades obtidas em cada uma das duas amostras de apatita obtidas na região de Pirapozinho na formação de Presidente Prudente. Para obter estas idades através da equação 1, além dos valores de  $\lambda$ ,  $\lambda_F$ ,  $C_{238}$  que são mostrados na seção 2.3, foram utilizados os valores de  $\rho_S$  e  $\rho_I$  indicados na tabela 3 e o valor do  $R_M$  (referente á dosimetria de nêutrons) cujo valor obtido para essas amostras foi de  $9,81 \times 10^{-9}$ .

**Tabela 3.** Idades obtidas nas amostras de apatita coletadas no Grupo Bauru

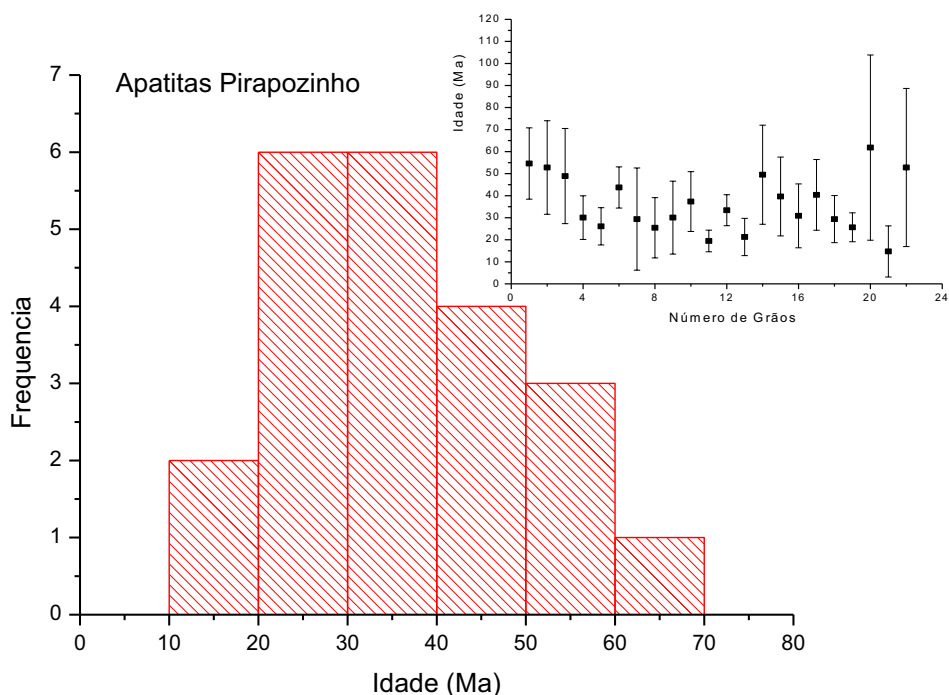
$\rho_S \times 10^6$ $cm^{-2}$	$N_S$	$\rho_I \times 10^6$ $cm^{-2}$	$N_I$	Idade (Ma) $\pm 2\sigma$
<b>B-03</b>				
1,092	26	2,815	67	$26 \pm 7$
0,158	5	0,168	4	$62 \pm 42$
0,095	2	0,425	9	$15 \pm 12$

0,336	4	0,420	5	53 ± 36
<b>B-04</b>				
1,008	24	1,218	29	55 ± 16
0,504	12	0,630	15	53 ± 21
0,420	10	0,567	12	49 ± 22
0,630	15	1,386	33	30 ± 10
0,630	15	1,596	38	26 ± 8
2,058	49	3,109	74	44 ± 9
0,168	2	0,378	9	29 ± 23
0,210	5	0,546	13	25 ± 14
0,210	5	0,462	11	30 ± 17
0,546	13	0,966	23	37 ± 14
1,050	25	3,571	85	19 ± 5
1,932	46	3,823	91	33 ± 7
0,756	9	2,352	28	21 ± 8
0,378	9	0,504	12	50 ± 22
0,378	8	0,630	15	40 ± 18
0,294	7	0,630	15	31 ± 15
0,462	11	0,756	18	40 ± 16
0,504	12	1,134	27	29 ± 11

As idades pelo método de traços de fissão foi obtida através da equação 1;  $\rho_S$  ( $\rho_I$ ), densidade de traços espontânea (induzida) contados no grão (mica);  $N_S$  ( $N_I$ ), numero de traços usados para determinar  $\rho_S$  ( $\rho_I$ )

Na figura 23 temos a distribuição de idade das apatitas B-03 e B-04 em um único histograma. Isto foi feito pois as amostras, além de terem sido coletadas na mesma formação, elas estão perto uma da outra (menos do que 2 Km) e as idades de ambas são estatisticamente compatíveis.





**Figura 23.** Distribuição de idades das amostras de Apatita de Pirapozinho

Na figura 23 podemos observar que a distribuição de idades possui um intervalo de 10 a 70 Ma, o que indica que as fontes destes grãos podem ser várias. Entre estas possíveis fontes temos a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira onde se registram idades neste intervalo. Contudo, a hipótese mais provável é a de que essas amostras com intervalo entre 10 e 70 Ma tenha vindo provenientes do soerguimento da Serra do Mar (80 Ma) e da Serra da Mantiqueira (120 Ma), mas tenha sofrido annealing, provavelmente ocasionado pelo efeito de hidrotermalismo observado na região, registrado pelo zircão.

Caso esta hipótese seja verdadeira pode-se constatar que este hidrotermalismo existe a alguns milhões de anos.

## 5.2. Medidas de traços confinados e obtenção do $L_0$ (Traço sem Annealing)

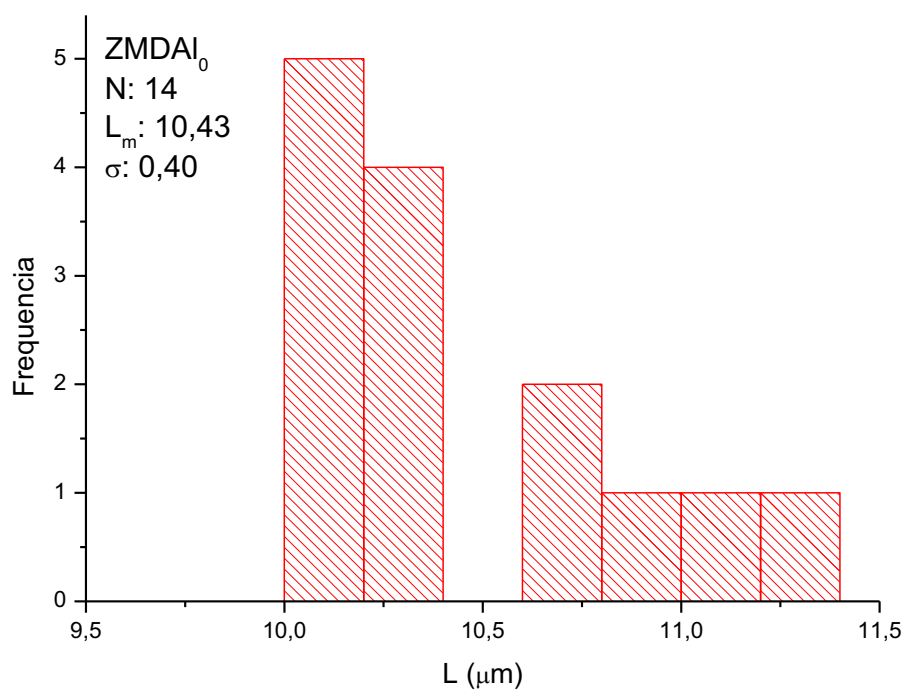
O resultado das medidas realizadas nas amostras ZPPl<sub>0</sub>, ZMDAl<sub>0</sub> e ZJPl<sub>0</sub> para a obtenção de um valor de  $l_0$  referente às amostras do região do Grupo Bauru estão mostrados na Tabela 4. Nesta tabela,  $N_t$  representa o número de traços confinados medidos em cada amostra e  $L_m$  representa a média dessas medidas. Pode-se observar nesta tabela que a

quantidade de traços confinados é relativamente baixa, isto é devido a que a maioria dos grãos depois do ataque sofre danificações devido à mistura de minerais e faces cristalográficas inerentes na cristalização do zircão. Podemos obter uma maior quantidade de traços confinados fazendo a irradiação com maior fluência de nêutrons ou irradiar a amostra com núcleos pesados.

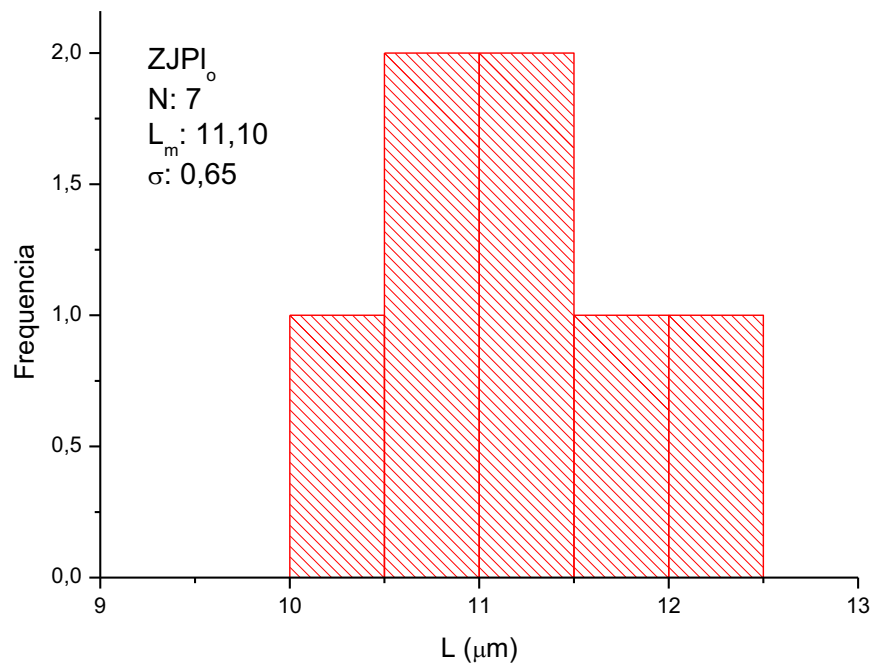
**Tabela 4.** Média das medidas de comprimento dos traços confinados sem annealing

Amostra	$N_t$	$L_{0m} \pm \sigma$
ZPPl <sub>0</sub>	8	$10,25 \pm 1,34$
ZJPl <sub>0</sub>	7	$11,10 \pm 0,65$
ZMDAl <sub>0</sub>	14	$10,43 \pm 0,40$

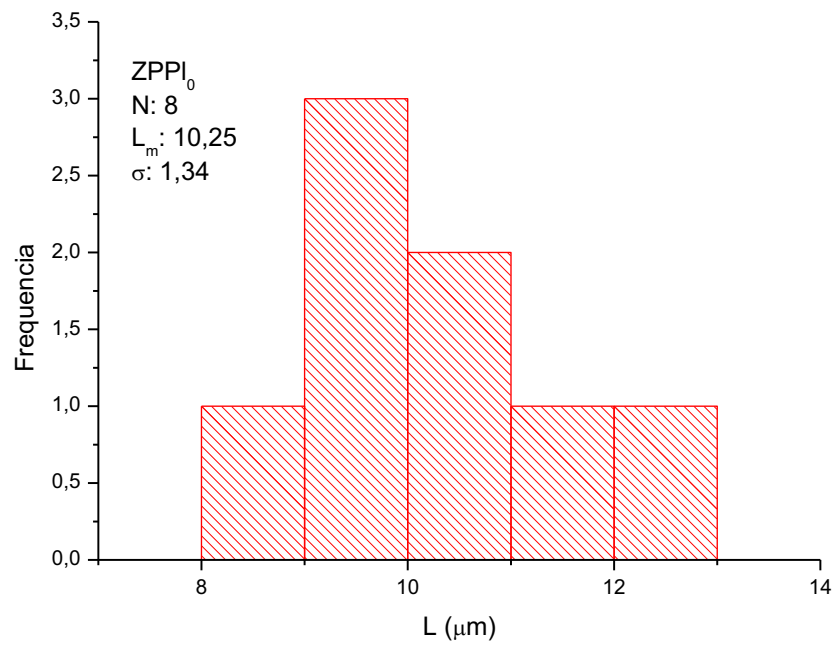
Nas figuras 24, 25 e 26 são mostradas as distribuições de comprimentos dos traços confinados sem annealing nas amostras ZMDAl<sub>0</sub>, ZJPl<sub>0</sub> e ZPPl<sub>0</sub>, respectivamente.



**Figura 24.** Distribuição de tamanho de traços ZMDAl<sub>0</sub>



**Figura 25.** Distribuição de tamanho de traços ZJPI<sub>0</sub>



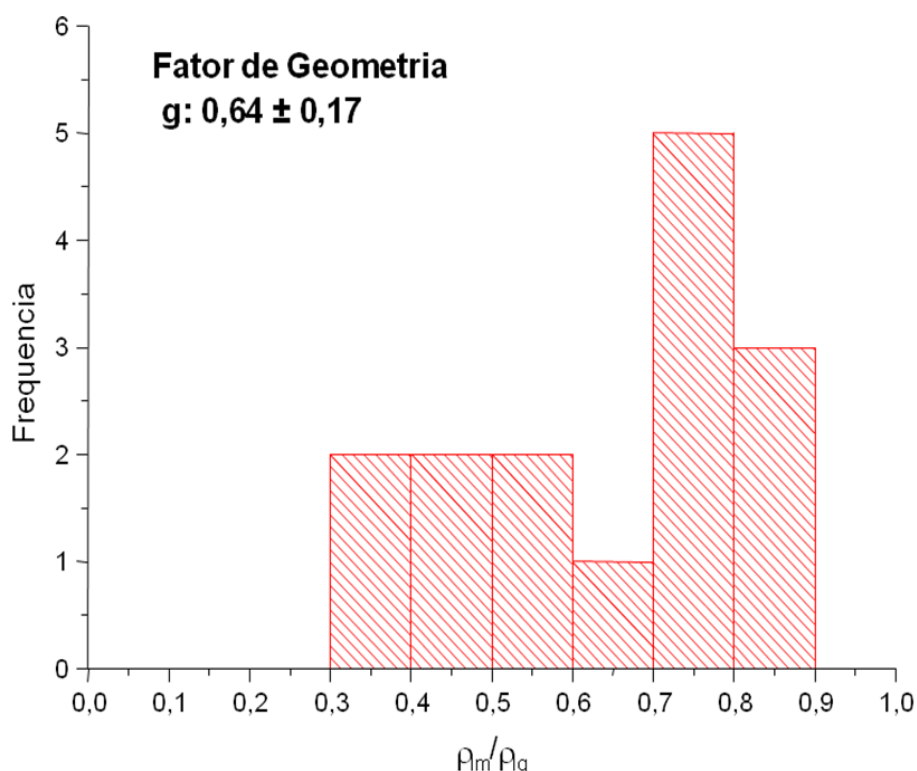
**Figura 26.** Distribuição de tamanho de traços ZPPI<sub>0</sub>

Se considerarmos o erro de cada medida vemos que elas se encontram em concordância com as medidas realizadas por Yamada et al. 1995, ao obter o valor de  $11,05 \pm 0,08$ .

A amostra ZJPl<sub>0</sub> cujo valor médio é de  $11,10 \pm 0,65$ , encontra-se dentro do erro da própria medida de Yamada, o que corrobora a coerência de nossas medidas.

### 5.3. Determinação do fator de geometria

Após fazer medidas de densidades de traços induzidos nos grãos e nas suas respectivas imagens especulares na mica que estava justaposta à montagem em teflon dos grãos da amostra JPA obtivemos a razão entre  $\rho_{Ig}$  e  $\rho_{Im}$ . Onde  $\rho_{Ig}$  indica a densidade de traços induzidos no grão e  $\rho_{Im}$  é a densidade de traços induzidos na mica. Na figura 27 mostramos a distribuição das razões destas grandezas cujo valor médio e o Fator de Geometria:  $0,645 \pm 0,166$ .



**Figura 27.** Valores da razão  $\rho_{Im}/\rho_{Ig}$  para a amostra ZJPA

## VI – CONCLUSÕES

Através das distribuições das idades, mostradas nos seus respectivos histogramas, é possível observar que as idades estão no intervalo de 50 a 700 Ma na região de Presidente Prudente. A predominância de idades entre 100 e 300 Ma indica que o principal evento morfotectônico ocorrido na fonte foi neste intervalo e pode estar relacionado à orogênese Gondwânica, ocorrida entre 230 e 290 Ma.

De modo geral, todos os histogramas indicam mais do que uma fonte ou proveniência de detritos através de paleo-drenagens. As possíveis fontes são a Serra Geral, A Serra do Mar e Serra da Mantiqueira, bem como minerais cristalizados durante eventos tectônicos relacionadas à abertura do Atlântico Sul.

A larga distribuição de idades, como já citado anteriormente, era esperada, pois todas as amostras utilizadas são das formações que integram o Grupo Bauru, que é uma bacia sedimentar. Este estudo avança no objetivo de descrever e identificar os eventos morfotectônicos através da datação via MTF.

Resultados de medidas de comprimento de traços sugerem que haveria acontecido um processo de annealing relativamente intenso em milhões de anos nas amostras de Pirapozinho que pertence a formação Presidente Prudente. Como destacado acima, os dados apontam que o processo de hidrotermalismo ocorrido na região foi, geologicamente, recente.

Temos como resultado uma quantidade de medidas de traços confinados relativamente baixa. Isto aconteceu devido a que a maioria dos grãos depois do ataque sofre danificações devido à mistura de minerais e faces cristalográficas inerentes na cristalização do zircão. Porém estas medidas de traços sem annealing são inéditas no Brasil e são importantes devido a que elas vão ser utilizadas pelo nosso Grupo de pesquisa e os diferentes grupos que trabalham na área de Geocronologia. É importante ressaltar que as nossas medidas são compatíveis estatisticamente com o resultado encontrado na literatura cujo valor é de  $11,05 \pm 0,08$  de Yamada (1995). Na amostra ZJPl<sub>0</sub>, obtivemos o valor médio  $11,10 \pm 0,65$ , que é compatível com apenas um desvio da medida de Yamada (1995), o que indica que nossas medidas são compatíveis com aquela feita em outro laboratório.

Na figura 27 foi mostrado a distribuição das razões de densidade de traços induzidos na mica e da densidade de traços induzidos no grão cujo valor médio é o Fator de Geometria:  $0,64 \pm 0,17$ . Esse resultado encontra-se estatisticamente compatível com os resultados encontrados na literatura, o que corrobora nossas medidas, apesar do baixo numero de grãos

contados. Esta medida também é inédita no Brasil e assim através deste projeto estamos contribuindo ao aprimoramento do MTF.

## VI- REFERÊNCIAS

Dias, A.N.C; Tello, C.A; Chemale, F.Jr; Iunes, P.J; Soares, C.J, Curvo, E.A; Guedes S; Barra, B.C; Constâncio, M Jr; Hadler, J.C. (2009). Zircon fission track and U-Th-Pb in situ dating of Rio Paran' a Formation, Parana Basin, Brazil. *Revista Mexicana de Física*, 56 (1), 16-21.

Fernandes L. A. 1998. *Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)*. Inst. de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 216p.

FERNANDES, L.A.; COIMBRA, M.A. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo), São Paulo, *Revista Brasileira de Geociências*, 30(4):717-728, dezembro/2000.

Garver J.I. Etching zircon age standards for fission-track analysis. *Radiation Measurements*, v. 37, p. 47-53, 2005.

Hackspacher P., L.F. Ribeiro B., M.C.S. Ribeiro, A.H. Fetter, J.C. Hadler N., C.A. Tello S., E.L. Dantas (2004). Consolidation and Break-up of the South American Plataform in Southeastern Brazil: Tectonothermal and Denudation Histories. *Gonswuana Reasearch*, V.7, N° 1, pp. 91-101.

Hadler N., J.C., P.J.Iunes., S.R.Paulo and C.A.Tello S. (1995). Obtainment of thermal histories for sets of geologically compatible localities by using apatite fission track analysis. *Revista de Física Aplicada e Instrumentação*, vol .10, no. 1: 1-10.

Hadler, J.C., Iunes, P.J., Tello S. C.A., Guedes, S. (2008). Themotectonic studies through fission track in apatite: Group analysis method for samples presenting similar geological features. *Radiation Measurements, In Press*.

Huene F.Von. Carta de F.von Huene ao Dr.Euzébio de Oliveira. *Mineração e Metalurgia*, 4(22): 190, 1939.

Iunes P.J. (1999). *Utilização da dosimetria de neutrons através de filmes finos de urânio e de tório naturais na datação de minerais com o método dos traços de fissão*. Instituto de física Gleb Wataghin – UNICAMP (Tese de Doutorado), 111p.

Iunes, P.J., J.C. Hadler N., G. Bigazzi, C.A. Tello S., S. Guedes O. and S.R. Paulo (2002a). Durango apatite fission-track dating using length-based age corrections and neutron fluence measurements by thorium thin films and natural U-doped glasses calibrated through natural uranium thin films. *Chemical Geology*, **187**, 201-211.

Iwano H., T. Danhara. (1998). A Re-Investigation of the geometry factors for fission-track dating of apatite, sphene and zircon. P. Van den Haute and F. De Corte (eds.), *Advences in*

fission-track geochronology, 47-66, 1998 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.

Laslett, G.M., P.F. Green, I.R. Duddy and A.J.W. Gleadow ( 1987). Thermal annealing of fission tracks in apatite 2. A quantitative analysis, *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, 65, 1-13.

Pereira, M.J. & Feijó F.J. Bacia de Santos. *Boletim Geociências Petrobrás*, 8(1 ):219-234, 1994.

Schumann, W. *Rochas e Minerais*, Editora Ao Livro Técnico S/A, p. 32 e 60, 1985. ISBN 3-405-12724-6

Tagami, T., Ito, H. and Nishimura, S., 1990. Thermal annealing characteristics of spontaneous fission tracks in zircon. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, 80, 159-169.

Tagami, T., Carter A., and Hurford J., (1996a). Natural long-term annealing of the zircon fission-track system in Vienna Basin deep borehole samples: Constrains upon the partial annealing zone and closure temperatures, *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)* 130, 147-157.

Tagami, T., and Shimada, C. (1996b). Natural long-term annealing of fission track system around a granitic pluton. *Journal of Geophysical Research*. 101, B4, 8245-8255.

Tagami, T. and Dumitru, T. (1996c). Provenance and thermal history of Franciscan accretinary complex: Constraints from zircon fission track thermochronology. *Journal of Geophysical Research*, 101, B5, 11,353-11,364.

Tello S., C.A., P. Hackspacher, J.C. Hadler N., P.J. Iunes, S. Guedes O., S.R. Paulo and L.F. Ribeiro B. (2003). Recognition of Cretaceous, Paleocene and Neogene Tectonic Reactivation, through Apatite Fission-Track Analysis, in Precambrian areas of the Southeast Brazil: Association with the South Atlantic Ocean Opening. *Journal of South American Earth Science*, 15, 765-774.

Tello S. C. A, J.C. Hadler N., P.J. Iunes, S.Guedes, P.C. Hackspacher, L.F. Ribeiro B., S.R. Paulo and A.M. Osorio A. (2005). Thermochronology of the South American platform in the state of São Paulo, Brazil, through apatite fission tracks *Radiation Measurements*, 39, 635-640.

Tello C.A., R. Palissari, J.C. Hadler N., P.J. Iunes, S. Guedes, E.A.C. Curvo and S.R. Paulo (2006). Annealing experiments on induced fission tracks in apatite: I. Measurements of horizontal-confined-track lengths and track densities in basal sections and randomly oriented grains. *American Mineralogist*, Vol 91 P 252-260

Wagner ,G.A. and P. Van Den Haute, Fission-track dating. *Kluwer Acad., Norwell, Mass.*, v. 6, 285p., 1992.

Yamada, R., Tagami, T., Nishimura, S., Hisatochi, I. (1995). Annealing kinetics of fission tracks in zircon: an experimental study. *Chemical Geology, Isotopic Geoscience Section*, 122, 249-258.

Yamada R., Yoshioka T., Watanabe K., Tagami T., Nakamura H., Hashimoto T., Nishimura S., (1998). Comparison of experimental techniques to increase the number of measurable confined fission tracks in zircon. *Chemical Geology, Isotopic Geoscience Section*, 149, 99-107.

Yamada K., Tagami T., Shimobayashi N. (2003). Experimental study on hydrothermal annealing of fission track in zircon. *Chemical Geology*, 201, 351-357.