



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

GEOCRONOLOGIA E SIGNIFICADO
TECTÔNICO DE ROCHAS MÁFICAS DE ALTO
GRAU METAMÓRFICO DA FAIXA BRASÍLIA

Maria Emilia Schutesky Della Giustina

Tese de Doutorado Nº 101

Brasília, DF

2010



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

GEOCRONOLOGIA E SIGNIFICADO TECTÔNICO
DE ROCHAS MÁFICAS DE ALTO GRAU
METAMÓRFICO DA FAIXA BRASÍLIA

Maria Emilia Schutesky Della Giustina

Tese de Doutorado Nº 101

Orientador: Prof. Márcio Martins Pimentel

Co-orientador: Prof. Cesar Fonseca Ferreira Filho

Banca Examinadora: Prof. Reinhardt A. Fuck (UnB)

Prof. Nilson F. Botelho (UnB)

Prof.^a Renata Schmitt (UFRJ)

Prof. Claudio Valeriano (UERJ)

Suplente: Prof. Elton L. Dantas (UnB)

Brasília, DF, julho de 2010

Agradecimentos

A Deus, por me indicar o caminho.

Ao Christian e à minha mãe Georgete, em especial, e a toda a minha família, pelo incentivo e paciência.

Aos meus orientadores, pela confiança.

Ao meu “guru” Claudinei, por todos os palpites.

À Joseneusa e ao Sérgio, pelas longas conversas, e a todos os meus amigos, pela força.

À equipe do Laboratório de Geocronologia, minha segunda casa nos últimos anos, e a todos que por lá passaram e marcaram nossa vida.

À equipe da Geo Lógica Consultoria Ambiental, pelo carinho.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro relativo ao projeto 477347/2007-0 (Edital MCT/CNPq Universal).

À International Nickel Ventures Ltd. e à Amazônia Mineração, por fornecer os testemunhos de sondagens das intrusões de Damolândia e Taquaral, bem como pelo suporte nos trabalhos de campo.

Ao Prof. Claudio Lamarão (UFPA), pelas imagens de catodoluminescência de zircão.

À Prof.^a Sandra Andrade (USP), pelas análises de elementos-traço em zircão.

Finalmente, a todos que contribuíram de alguma forma para a realização desta tese.

“Se vi mais longe foi porque estava sobre o ombro de gigantes.”

Isaac Newton

Resumo

Maria Emilia Schutesky Della Giustina. 2010. *Geocronologia e significado tectônico de rochas máficas de alto grau metamórfico da Faixa Brasília*. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 121 p.

A interpretação das idades fornecidas por zircão de terrenos de alto grau tem se revelado complexa, visto que há processos que promovem a alteração do cristal ígneo em diferentes escalas durante o evento metamórfico, fornecendo, por vezes, informações geocronológicas ambíguas e pouco acuradas. Nesse sentido, o objetivo deste estudo é investigar a influência do metamorfismo de alto grau no sistema U-Pb de cristais de zircão dos complexos Anápolis-Itaçu e Serra da Malacacheta-Barro Alto, por meio da utilização de imageamento por catodoluminescência e de análises pontuais suplementares de isótopos de Hf e química de zircão. Com isso, pretende-se definir a *real-idade* geológica dos resultados obtidos e, assim, promover uma melhor compreensão do contexto geotectônico dos terrenos granulíticos mais expressivos da Faixa Brasília.

Os complexos acamadados de Damolândia e Taquaral, Goiás, encontram-se inseridos no Complexo Anápolis-Itaçu. Apesar do metamorfismo de fácies granulito superimposto, ainda se observam texturas e mineralogia primária nas duas intrusões e, portanto, os cristais de zircão devem revelar informações primárias e secundárias. Análises U-Pb revelam espalhamento de idades concordantes em intervalo de cerca de 80 Ma, com “interceptos” superiores de ~ 670 Ma. Entretanto, as razões iniciais de $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ são homogêneas, tanto em escala cristalina quanto na população de zircão e não apresentam correlação com as idades U-Pb. Isso sugere que os cristais formaram-se em um único evento e, portanto, a dispersão observada nas idades reflete a perda parcial de informação do sistema U-Pb. Assim, conclui-se que as idades mais antigas, próximas a 670 Ma, são representativas do evento de cristalização ígnea dos complexos de Damolândia e Taquaral e, portanto, estas intrusões constituem episódio anterior de magmatismo máfico na Faixa Brasília. Este evento magmático mostra-se coevo ao metamorfismo de alto grau e, destarte, pode caracterizar a fonte adicional de calor necessária para o desenvolvimento das assembléias de temperatura ultra-alta dos granulitos do Complexo Anápolis-Itaçu.

O complexo Serra da Malcacheta-Barro Alto revela-se, ainda, um alvo adicional para a avaliação das alterações metamórficas em zircão, visto que também reúne rochas máfico-ultramáficas com metamorfismo de alto grau superimposto. Idades U-Pb revelam que o corpo acamadado constitui-se por duas intrusões distintas, caracterizadas pelos complexos Serra da Malcacheta (1,3 Ga) e Barro Alto (0,8 Ga). O metamorfismo de alto grau é datado por titanita e zircão recristalizado das duas unidades em c. 750 Ma, o que implica que ambas já se encontravam unidas neste episódio. Portanto, os novos dados confirmam a similaridade com os complexos Serra dos Borges e Niquelândia, expostos ao norte. Entretanto, os dados U-Pb em zircão são inconclusivos para o metanortosito e para o anfibolito Cafelândia. Em ambos os casos, a assinatura isotópica de Hf é homogênea e, conseqüentemente, implica em um único episódio de cristalização. Tal fato permite a reclassificação geocronológica das unidades, de modo que o metanortosito relaciona-se ao primeiro episódio magmático, enquanto que o anfibolito Cafelândia insere-se no segundo evento de magmatismo máfico.

Assim, o volumoso magmatismo máfico revela-se coevo ao metamorfismo de alto grau e sugere, portanto, que a Faixa Brasília represente um orógeno quente.

Palavras-chave: Faixa Brasília, zircão metamórfico, intrusões máficas-ultramáficas acamadadas, metamorfismo de alto grau, Complexo Anápolis-Itaçu, Complexo Serra da Malcacheta - Barro Alto.

Abstract

Maria Emilia Schutesky Della Giustina. 2010. *Geocronologia e significado tectônico de rochas máficas de alto grau metamórfico da Faixa Brasília*. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 121 p.

The interpretation of U-Pb ages obtained in zircon grains from high-grade rocks have shown to be very complex, given that metamorphism might promote the alteration of igneous crystals in different scales, resulting in ambiguous and imprecise geochronological data. Therefore, the purpose of this study is to investigate the influence of the high-grade metamorphic imprint on the U-Pb isotopic system of zircon from the Anápolis-Itaçu and Serra da Malacacheta-Barro Alto complex, using additional information from cathodoluminescence imaging and *in-situ* isotopic and chemical analyses in order to define the geological meaning of U-Pb ages. Consequently, the new data provides a better comprehension of the geotectonic evolution of the most noteworthy granulite terranes in the Brasília Belt.

The Damolândia and Taquaral layered complexes, Goiás, are part of the Anápolis-Itaçu Complex. Besides of the superimposition of granulite-facies metamorphism, these intrusions still partially preserve igneous texture and mineralogy and, hence, zircon grains might enclose both primary and secondary geochronological information. U-Pb analyses reveal a spread of concordant ages spanning within an age interval of ~80 Ma, which suggests an “upper” intercept age of ~670 Ma. Nevertheless, Hf isotopic ratios are homogeneous within populations and also in crystal-scale domains in all samples and show correlation neither with U-Pb ages nor with Th/U ratios, suggesting that zircon grains crystallized during a single growth event. Therefore, it is suggested that the observed spread of concordant ages in reality reflects the partial reset of the U-Pb system and, thus, the older obtained ages, around 670 Ma, shall be representative of the igneous crystallization of the Damolândia and Taquaral intrusions. Consequently, the new data advocate for a previous episode of mafic magmatism in the Brasília Belt, which is coeval with the high-grade metamorphism in the Anápolis-Itaçu Complexes and, hence, characterizes the additional heat source to the development of ultra-high temperature assemblages.

The Serra da Malacacheta-Barro Alto constitutes an additional target to the investigation of metamorphic alteration processes on zircon, since it enclosures mafic-ultramafic rocks

metamorphosed under amphibolites to granulite facies conditions. U-Pb ages reveal that this composite intrusion is composed of two distinct intrusions, namely the Serra da Malacacheta (1.3 Ga) and Barro Alto complexes (0.8 Ga). The metamorphism is defined at ~750 Ma by titanite and recrystallized domains of zircon from both units, which implies that they were already combined by the time of the metamorphic imprint. Therefore, the new data confirms the similarity among the Serra da Malacacheta-Barro Alto Complex and the Serra dos Borges-Niquelândia complex, exposed to the north. However, U-Pb ages are themselves inconclusive in dating the metanorthosite and the Cafelândia amphibolite. Nevertheless, Hf isotopic signature of both samples is homogeneous and implies that zircon population has crystallized in a single episode, which allows the geochronological reclassification of these units. Thus, the metanorthosite characterizes the first event of mafic magmatism, while the Cafelândia amphibolite is attributed to the second magmatic episode.

Therefore, the voluminous mafic magmatism is coeval to high-grade metamorphism in both studied areas and thus, it suggests that the Brasília Belt typify a hot orogen.

Key-words: Brasília Belt, metamorphic zircon, layered mafic-ultramafic intrusions, high-grade metamorphism, Anápolis-Itaçu Complex, Serra da Malcacheta - Barro Alto Complex.

Lista de Figuras

- Figura 1.1 – Mapa geológico esquemático da Faixa Brasília (modificado de Pimentel *et al.*, 2006). 3
- Figura 1.2 – Ilustração do problema geocronológico no Complexo Anápolis-Itauçu. Dados U-Pb em zircão (TIMS, SHRIMP). a) Complexo Anápolis-Itauçu; para- e ortogranulitos félsicos (Piuzana, *et al.*, 2003; Baldwin & Brown, 2008; Moraes *et al.*, 2007). b) Complexos máficos-ultramáficos no domínio do Arco de Arenópolis (Hollanda *et al.*, 2003; Laux, *et al.* 2003). 4
- Figura 1.3 – Ilustração do problema geocronológico para o Complexo Serra da Malacacheta-Barro Alto. A) SHRIMP U-Pb em zircão de metanortosito (modificado de Correia *et al.*, 2007). Os dados revelam idades entre 800 e 730 Ma e, portanto, não permitem a distinção entre a cristalização ígnea e o metamorfismo de alto-grau. B) Cristal de zircão de amostra do Complexo de Niquelândia, interpretado como equivalente ao norte do Complexo de Barro Alto (modificado de Pimentel *et al.*, 2004). Bordas metamórficas são nítidas e ocorrem como superfícies curvas quee obliteram a zonação primária. Verifica-se, ainda, que o núcleo apresenta idades mais novas que as bordas, o que sugere distúrbio da assinatura isotópica U-Pb. 5
- Figura 2.1 - Aplicações do zircão (baseado em Belousova *et al.*, 2006, Valley, 2003; Watson *et al.*, 2006; Harley & Kelly, 2007; Gerdes & Zeh, 2009). 9
- Figura 2.2 – Possíveis etapas de cristalização de zircão durante o metamorfismo em um orógeno quente, durante um período de tempo (Δt) da ordem de milhões de anos (modificado de Harley *et al.*, 2007). Vide texto para explicação. 11
- Figura 2.3 - Morfologias externas e texturas internas típicas de zircão metamórfico. A) Morfologia ovóide, com faces e arestas arredondadas, resultantes da interação com fluidos insaturados em Zr (Hoskin & Schaltegger, 2003). B) Zircão euédrico, denominado “soccer-ball”, descrito em leucossoma de fácies granulito (Schaltegger *et al.*, 1999). C) Sequência de estruturas geralmente observadas em zircão cristalizado no episódio metamórfico de alto-grau. O núcleo herdado (1) é envolto por uma zona de baixa luminescência (2), a qual é subsequentemente envolta por uma zona de alta catodoluminescência (Hoskin & Schaltegger, 2003). D) Zircão recristalizado no metamorfismo de alto-grau; nota-se um domínio externo com zonação caótica e não planar, bem como reentrâncias que migram da borda para o núcleo do grão (dimensão em torno de 200 μ m; Corfu *et al.*, 2003). 13
- Figura 2.4 – Mobilidade de elementos traço em zircão durante o metamorfismo de alto-grau (modificado de Martin *et al.*, 2008). Em A, ilustra-se a situação na qual há uma nova cristalização, representada por bordas neoformadas ao redor de núcleos antigos, e em B observa-se um episódio de recristalização do zircão. Ressalta-se a presença de uma fase fluida em ambos os casos, a qual facilita a troca de elementos com o meio. 14

Figura 2.5 – Padrão de elementos terras raras de zircão metamórfico normalizados pelo condrito (Hoskin & Schaltegger 2003; Fraser <i>et al.</i> 1997). Ambas as curvas representam a cristalização de novos indivíduos ou o sobrecrescimento de bordas ao redor de núcleos herdados.	15
Figure 3.1 - A) Regional sketch map of the Brasília Belt, in the eastern part of the Tocantins Province (modified from Giustina <i>et al.</i> , 2009). B) Geological map of the central part of the Anápolis-Itaçu Complex (modified from Piuzana <i>et al.</i> , 2003). The star represents the location of sample INHO-01.	22
Figure 3.2 - Geology of the Damolândia Complex (from unpublished report of International Nickel Venture Ltd.).	25
Figure 3.3 - A) View of the area close to the drill hole FSDM-07. Rare outcrops and abundant dark brownish termite mounts developed on soil from ultramafic rocks (close to drill hole FSDM-07). B) Orthopyroxenite with interstitial white plagioclase (close to drill hole FSDM-07). C) Harzburgite from drill hole FSDM-07. D) Photomicrograph of harzburgite consisting of cumulus olivine (Ol) enclosed in large orthopyroxene oikocryst (opx). E) Photomicrograph of norite consisting of cumulus orthopyroxene (opx) and plagioclase (Pl). F) Zircon-bearing hornblende gabbro-norite. Sample DM-16 from drill hole FSDM-07. G) and H) Photomicrograph of partially recrystallized plagioclase-bearing orthopyroxenite. Large igneous orthopyroxene crystals are recrystallized into fine-grained granoblastic aggregates.	26
Figure 3.4 - Log, MgO content and $\epsilon\text{Nd}(\text{T})$ for drill hole FSDM-07.	27
Figure 3.5 - Plot of MgO versus CaO, TiO ₂ , Cr and K ₂ O for the drill hole FSDM07.	28
Figure 3.6 - Geology of the northern area of the Taquaral Complex (from unpublished report of International Nickel Venture Ltd.).	30
Figure 3.7 - A) Boulder of highly foliated mafic granulite. The mineral assemblage consists of orthopyroxene, clinopyroxene, plagioclase, hornblende and magnetite. Abundant reddish termite mounts are developed on soil from mafic rocks (locality of sample TQ-22). B) Outcrop of highly foliated subvertical peridotite. Elongated pyroxene crystals and pyroxene aggregates become evident in the weathered surface. C) Sharp contact between peridotite (left side) and pyroxenite (right side) from drill core FSTQ-01. Large pyroxene crystals in the peridotite show up in lighter colors. D) Photomicrograph of peridotite consisting of partially serpentinized olivine crystals (Ol) associated with large orthopyroxene (opx) and chromite (Cr). E) Orthopyroxenite with interstitial sulfides from drill core FSTQ-01.	31
Figure 3.8 - Log, MgO content and $\epsilon\text{Nd}(\text{T})$ for drill hole FSTQ-01 (see Fig. 6 for location).	32
Figure 3.9 - Plot of MgO versus CaO, TiO ₂ , Cr and K ₂ O for the drill hole FSTQ-01.	33
Figure 3.10 – CL images of zircon from sample DM-16 (A, B), sample DM-20 (C, D) and sample TQ-14 (E, F). Smaller spots (30 μm) represent the location of U-Pb analyses, whereas larger spots (40 μm) correspond to Hf isotopic investigation.	38
Figure 3.11 - LA-ICPMS (A-C), SHRIMP (D) and ID-TIMS (E-F) U-Pb plots for Damolândia (DM), Taquaral (TQ, TAQ) and Goianira-Trindade complexes (INHO).	39
Figure 3.12 - Zircon <i>in situ</i> Hf isotopic data (A, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$; B, ϵ_{Hf}) versus U-Pb age plots.	51

- Figure 4.1 - Regional geotectonic setting of the Brasília Belt, in the eastern part of the Tocantins Province (modified after Pimentel *et al.*, 2006; Giustina *et al.*, 2009). 60
- Figure 4.2 – A) Geological sketch map of the Barro Alto and Serra da Malacacheta complexes showing sample locations. Geological sketch map (B) and geological section (A-A’; C) of the NNE-section of the Barro Alto and Serra da Malacacheta complexes in the Laguna-Barro Alto region (modified after Ferreira Filho *et al.*, 2010). 63
- Figure 4.3 - CL images of zircon from the SMC and BAC. A, B) Sample BAL-09. (C-F) Sample CAFEL. G, H) Sample BAL-05. Smaller spots (30 µm) represent the location of U-Pb analyses, whereas larger spots (40 µm) correspond to Hf isotopic investigation. 69
- Figure 4.4 - LA-ICPMS U-Pb diagrams for sample BAL-09 (A); sample BAL-04 (zircon, B; titanite, C); sample CAFEL (D); sample BAL-05 (E). 70
- Figure 4.5 – Zircon REE normalized plots from samples BAL-09 (A), BAL-04 (B) and CAFEL (C). 81
- Figure 4.6 - Zircon *in situ* Hf isotopic data plotted against U-Pb systematics. Hf signature is homogeneous within individual samples and do not correlate with neither Lu-Hf ratios nor U-Pb ages, regardless of the concordance level. Additionally, Hf isotopic data reveal two distinct zircon crystallization events, the first at ca. 1.3 Ga and the second near 0.8 Ga. See text for discussion 87
- Figure 4.7 - Ti-in-zircon temperatures plotted against U-Pb, Lu-Hf systematics and trace element contents. There is no correlation among Ti-in-zircon data and Th/U ratios, Hf isotopes or total REE contents. Additionally, the regular distribution of temperatures near 700°C is noteworthy. 91
- Figura 5.1 - Ilustração esquemática dos processos de difusão (A) e dissolução-reprecipitação concomitante (B). No caso de difusão, a troca de elementos químicos se dá em estado sólido (A), enquanto que na dissolução-reprecipitação o fluido ou o magma facilitam a troca (B). Neste último caso, desenvolve-se uma borda de recristalização em ambos os minerais envolvidos, na qual se mantém preservada a orientação cristalográfica. O desenho não está em escala. 99
- Figura 5.2 - Exemplos do processo de dissolução-reprecipitação concomitantes. A) Imagem de elétrons retro-espalhados em granada alterada pelo reequilíbrio com fluido hidrotermal (Pollock *et al.*, 2008). As porções escuras preservam a assinatura de fácies granulito, enquanto que as bordas claras apresentam composição de granada eclogítica. B) Monazita de granulito básico da Zona Ivrea, Itália (Förster & Harlov, 1999). C) Cristal de monazita, inicialmente homogêneo, submetido à alteração por fluidos alcalinos (Harlov, 2009). As setas indicam as frentes de recristalização desenvolvidas sob condições de 900°C e 1000 MPa, após 25 dias de experimento. 101
- Figura 5.3 - Processo de dissolução-reprecipitação concomitante (modificado de Geisler *et al.*, 2007). O processo envolve a dissolução de zircão rico em $MSiO_4$ e a concomitante precipitação de zircão puro e inclusões de $MSiO_4$. O zircão (amostra CAFEL) apresenta inclusões representadas por zonas com catodoluminescência mais elevada, feição característica deste tipo de recristalização. Ressalta-se que a recristalização se dá localmente (em escala de µm) e envolve transporte restrito. 103

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Principais substituições em zircão (Hoskin & Schaltegger, 2003).	16
Table 3.1 – U-Pb LA-ICPMS data for sample DM-16.	40
Table 3.2 - Summary of in situ Lu–Hf analyses for sample DM-16.	41
Table 3.3 - Sm-Nd data for the Damolândia Complex.	41
Table 3.4 - U-Pb LA-ICPMS data for sample DM-20.	42
Table 3.5 - Summary of in situ Lu–Hf analyses for sample DM-20.	42
Table 3.6 - U-Pb LA-ICPMS data for sample TQ-14.	43
Table 3.7 - Summary of in situ Lu–Hf analyses for sample TQ-14.	43
Table 3.8 - U-Pb SHRIMP data for sample TAQ-02.	44
Table 3.9 – U-Pb ID-TIMS data for sample TAQ-03.	44
Table 3.10 – Sm-Nd data for the Taquaral Complex.	45
Table 3.11 – U-Pb ID-TIMS data for sample INHO-01.	45
Table 3.12 - Sm-Nd data for the Goianira-Trindade Complex.	46
Table 4.1 - Instrumental and analytical parameters for LA-ICPMS trace-element analyses.	67
Table 4.2- Pb LA-ICPMS data for sample BAL-09.	71
Table 4.3 - Summary of in situ Lu–Hf analyses for sample BAL-09.	71
Table 4.4 - Trace element composition of zircon crystals from sample BAL-09.	72
Table 4.5 - U-Pb LA-ICPMS data for sample BAL-04.	74
Table 4.6 - Summary of in situ Lu–Hf analyses for sample BAL-04.	75
Table 4.7 - Trace element composition of zircon crystals from sample BAL-04.	75
Table 4.8 - U-Pb LA-ICPMS data for sample CAFEL.	77
Table 4.9 - Summary of in situ Lu–Hf analyses for sample CAFEL.	77
Table 4.10 - Trace element composition of zircon crystals from sample CAFEL.	78
Table 4.11 - U-Pb LA-ICPMS data for sample BAL-05.	80
Table 4.12 - Summary of in situ Lu–Hf analyses for sample BAL-05.	80

Sumário

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	X
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa do tema	1
1.2. Objetivos	5
1.3. Estrutura da Tese	6
2. ZIRCÃO METAMÓRFICO	8
2.1. Introdução	8
2.2. Condições de formação de zircão no metamorfismo de alto grau	9
2.3. Características físicas	12
2.4. Assinatura Geoquímica	14
Cristalização de novos grãos/ sobrecrecimento metamórfico	15
Recristalização metamórfica de zircão	16
2.5. Considerações finais	17

3. DATING COEVAL MAFIC MAGMATISM AND ULTRAHIGH-TEMPERATURE METAMORPHISM IN THE ANÁPOLIS-ITAUÇU COMPLEX, CENTRAL BRAZIL	18
3.1. Introduction	19
3.2. Geological setting	20
3.3. Damolândia and Taquaral Layered Complexes	23
Damolândia	24
Taquaral	29
3.4. Methods	34
<i>In situ</i> zircon analyses	34
ID-TIMS analyses	36
3.5. Samples and results	37
Damolândia region	37
Taquaral area	47
Goianira-Trindade Complex	48
3.6. Discussion	49
“Metamorphic” zircon and the meaning of the spread of concordant U-Pb ages	49
Comparison between dating methods	53
Tectonic implications for the evolution of the Brasília Belt	54
3.7. Conclusions	55
3.8. Acknowledgments	56
4. HIGH-GRADE METAMORPHIC ALTERATION OF ZIRCON: A COMBINED LA-ICPMS ISOTOPIC AND TRACE ELEMENT STUDY OF A COMPOSITE MAFIC-ULTRAMAFIC LAYERED COMPLEX IN CENTRAL BRAZIL	57
4.1. Introduction	58
4.2. Regional Geological Setting	59
4.3. The Serra da Malacacheta and Barro Alto complexes	62

4.4. Methods	65
4.5. Samples and Results	68
Leucogabbro BAL-09	68
Metanorthosite BAL-04	82
Garnet-amphibolite CAFEL	83
Basic granulite BAL-05	84
4.6. Discussion	85
High-grade metamorphic imprint and the interpretation of zircon U-Pb ages	85
Geological Implications	92
4.7. Conclusions	95
4.8. Acknowledgments	97
5. DISCUSSÃO	98
5.1. Processos de recristalização mineral no metamorfismo	98
5.2. Dissolução-reprecipitação concomitante em zircão	102
5.3. Evidências dos complexos Anápolis-Itaçu e Serra da Malacacheta-Barro Alto	104
6. CONCLUSÕES	107
6.1. Implicações analíticas	108
6.2. Implicações geotectônicas	109
Complexo Anápolis-Itaçu	109
Complexos Serra da Malacacheta e Barro Alto	110
7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	112

1. INTRODUÇÃO

A datação de granulitos sempre despertou grande interesse na comunidade geológica, pois estas rochas evidenciam as condições mais extremas de pressão e temperatura por que passa um orógeno. O zircão é mineral comum em rochas ígneas e metamórficas, félsicas ou máficas, e, devido à sua resiliência mesmo sob condições de 1000°C e 20 kbar, ele permite adicionar informações geocronológicas aos estudos petrológicos. Entretanto, a interpretação das idades fornecidas por zircão de terrenos de alto grau é complexa e deve ser realizada com considerável cuidado, visto que há processos que promovem a alteração do cristal ígneo, em diferentes escalas, durante o evento metamórfico. Destarte, as informações geocronológicas providas podem ser ambíguas e pouco acuradas.

Conforme postulado por Rubatto & Hermann (2007), “não há varinha mágica para a interpretação das idades U-Pb em zircão; os estudos mais bem-sucedidos de datação são aqueles que combinam vários métodos para interpretar as idades U-Pb e que consideram a complexidade do sistema”. Nesse contexto, o presente estudo abarca o problema geocronológico de datação de granulitos como prerrogativa para a interpretação da evolução geotectônica de um orógeno, exemplificado pela Faixa Brasília.

1.1. Justificativa do tema

Na Faixa Brasília, rochas metamórficas de alto grau são descritas essencialmente em duas áreas. O Complexo Anápolis-Itauçu, exposto em seu segmento meridional, constitui o núcleo metamórfico da Faixa Brasília (Pimentel *et al.*, 2000) e consiste de orto- e paragrulitos e granitos que compõem segmentos de orientação NW-SE, individualizados por zonas de cisalhamento de alto ângulo (Piuzana *et al.*, 2003).

Os complexos máfico-ultramáficos acamadados de Barro Alto, Niquelândia e Canabrava, por outro lado, encontram-se inseridos no Maciço de Goiás, o qual é interpretado como bloco alóctone incorporado à Província Tocantins durante a orogenia Brasiliana (Figura 1.1; Pimentel *et al.*, 2000). Os três complexos constituem uma faixa de aproximadamente 400 km na qual se exibem duas associações ígneas justapostas, metamorfasadas em fácies anfíbolito a granulito.

Em ambas as áreas, granulitos com assembléias minerais de temperatura ultra-alta (>900°C; Harley, 1998) são descritos (Moraes & Fuck, 2000; Moraes *et al.*, 2002). Tais

condições metamórficas requerem ambiente crustal extremamente aquecido, o qual não é explicado pelos modelos numéricos disponíveis para orógenos colisionais (Jamieson *et al.*, 1998, 2004; Beaumont *et al.*, 2001, 2006). Dessa forma, uma fonte suplementar de calor é fundamental para o desenvolvimento destas assembléias minerais. Recentes artigos de revisão sobre granulitos de temperatura ultra-alta (Brown, 2007; Harley, 2008; Kelsey, 2008) discutem possíveis cenários geotectônicos para a formação destas rochas especiais e, atualmente, a hipótese dos orógenos acrescionários quentes (“hot orogens”) é a mais aceita na comunidade científica como elucidativa de tais condições extremas (Collins, 2002; Hyndman *et al.*, 2005). Neste contexto, curtos episódios de extensão crustal durante o evento colisional resultam no afinamento da crosta e na ascensão da astenosfera, promovendo metamorfismo de alto-grau na base da crosta e a concomitante geração de grandes volumes de magma máfico, o qual poderia representar a fonte extra de calor (Pearce & Parkinson 1993; Jamieson *et al.*, 1998; Thompson *et al.*, 2001; Collins, 2002; Hyndman *et al.*, 2005).

Nos complexos Anápolis-Itaçu e Barro Alto observa-se a associação espacial entre granulitos de temperatura ultra-alta e rochas máficas e ultramáficas, porém dados disponíveis na literatura revelam um intervalo entre os episódios de metamorfismo e magmatismo que supera 20 Ma em ambos os casos. Conforme mencionado anteriormente, a superimposição do metamorfismo de alto-grau pode promover a alteração dos cristais de zircão, inclusive com perda da assinatura isotópica do sistema U-Pb (Ashwal *et al.*, 1999; Putins, 2002, 2009; Tomaschek *et al.*, 2003; Geisler *et al.*, 2007; Martin *et al.*, 2008). Logo, a diferença entre as idades de cristalização e de metamorfismo pode ser decorrente de um problema geocronológico e, portanto, uma investigação mais criteriosa se faz necessária a fim de determinar as reais idades dos episódios geológicos.

Nesse sentido, o Complexo Anápolis-Itaçu (CAI) constitui um objeto ideal para o estudo da atuação destas alterações em zircão, uma vez que inclui diversas intrusões máfico-ultramáficas nas quais ainda se observam texturas ígneas parcialmente preservadas, apesar do metamorfismo de alto-grau superimposto. Por conseguinte, o zircão dessas rochas deve preservar tanto informações primárias como secundárias. Adicionalmente, não há conhecimento geocronológico disponível para estas rochas e assume-se a idade de aproximadamente 630 Ma, obtida em intrusões acamadadas similares do domínio do Arco Magmático de Goiás, como

representativa do magmatismo máfico no Complexo Anápolis-Itauçu e, portanto, este episódio revela-se cerca de 20 Ma mais jovem que o pico do metamorfismo (Figura 1.2).

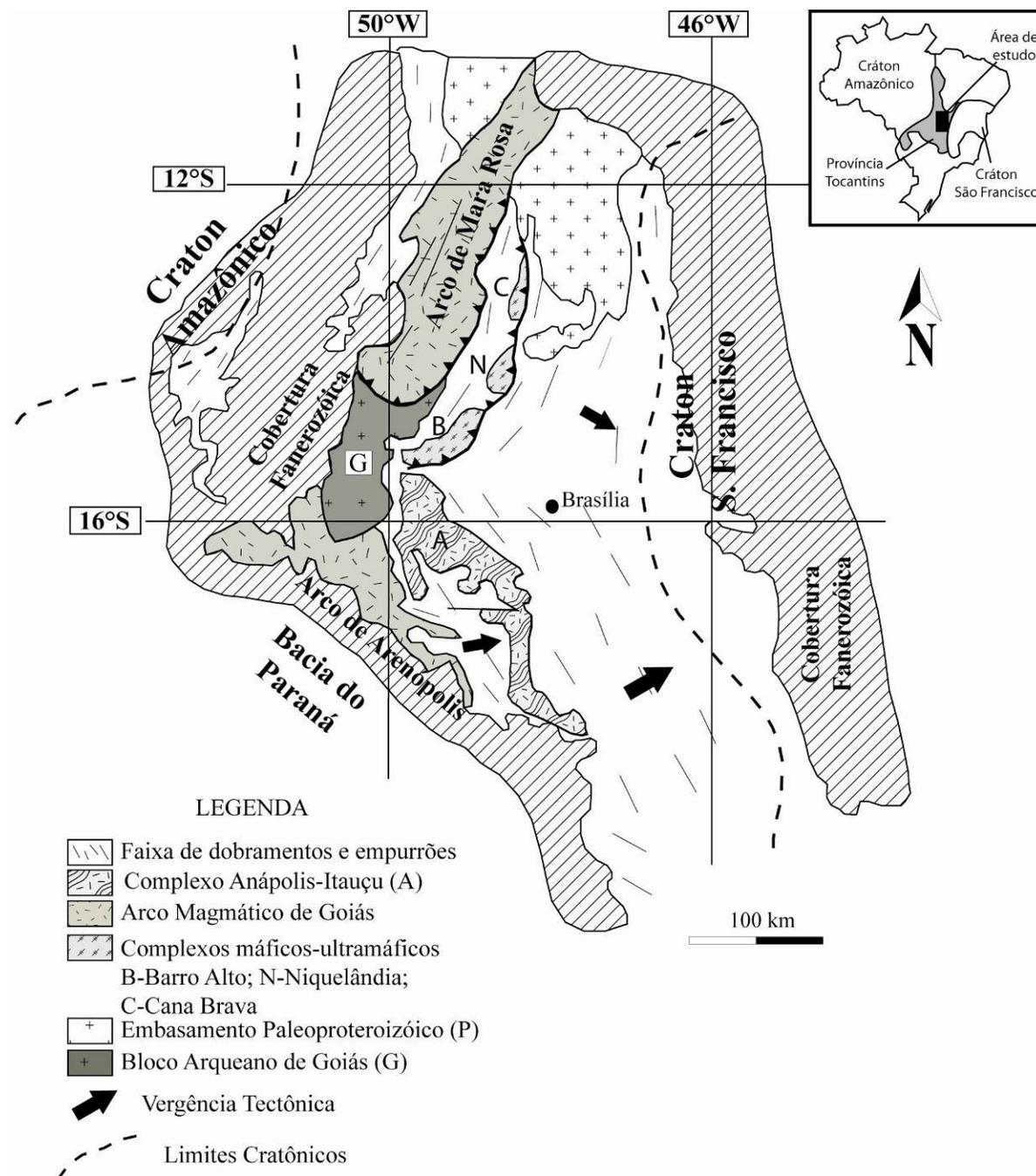


Figura 1.1 – Mapa geológico esquemático da Faixa Brasília (modificado de Pimentel *et al.*, 2006).

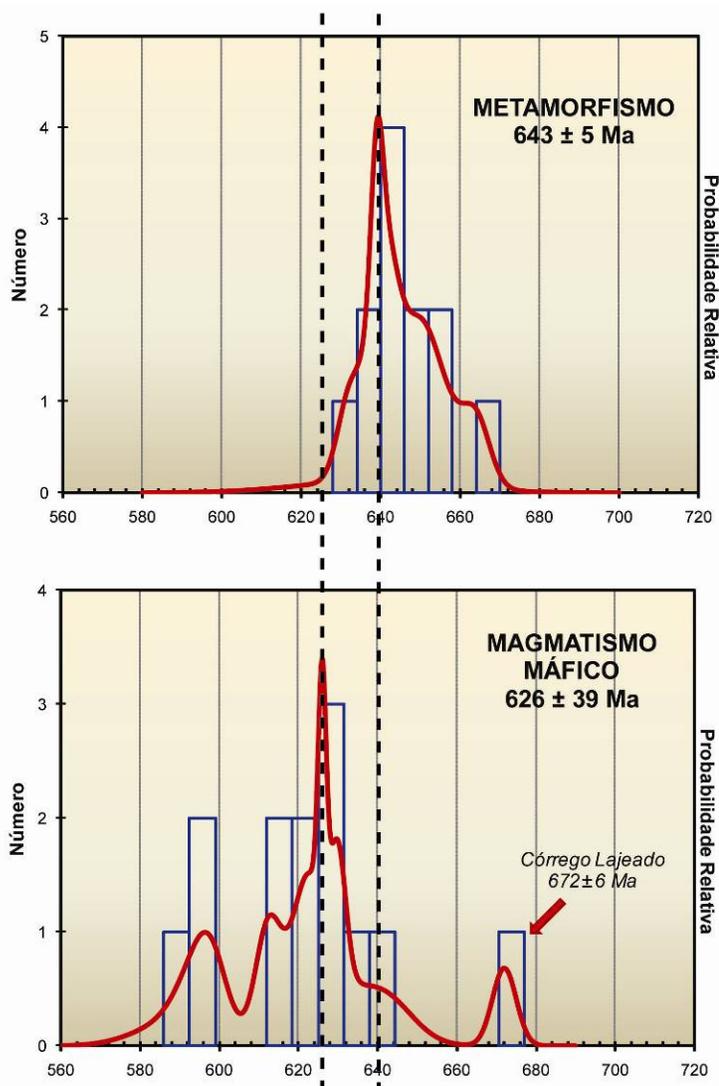


Figura 1.2 – Ilustração do problema geocronológico no Complexo Anápolis-Itaçu. Dados U-Pb em zircão (TIMS, SHRIMP). a) Complexo Anápolis-Itaçu; para- e ortogranulitos félsicos (Piuzana, *et al.*, 2003; Baldwin & Brown, 2008; Moraes *et al.*, 2007). b) Complexos máficos-ultramáficos no domínio do Arco de Arenópolis (Hollanda *et al.*, 2003; Laux, *et al.* 2003).

Adicionalmente, o Complexo de Barro Alto reúne condições geológicas similares aos corpos acamadados do Complexo Anápolis-Itaçu, nas quais as rochas máficas e ultramáficas apresentam metamorfismo de fácies granulito superimposto (Moraes *et al.*, 1994; Ferreira Filho, 1998). Dados de U-Pb em zircão para o Complexo de Barro Alto são escassos e indicam idades controversas, constituindo um comportamento análogo ao Complexo Anápolis-Itaçu (Figura 1.3a). Adicionalmente, o Complexo de Niquelândia, exposto ao norte, apresenta cristais de zircão nos quais a alteração é nítida e sugestiva de perda da informação isotópica (Figura 1.3b). Assim, feições similares devem estar presentes no Complexo de Barro Alto e, portanto, esta se

revela uma potencial área suplementar para a avaliação das alterações metamórficas de alto grau em cristais de zircão.

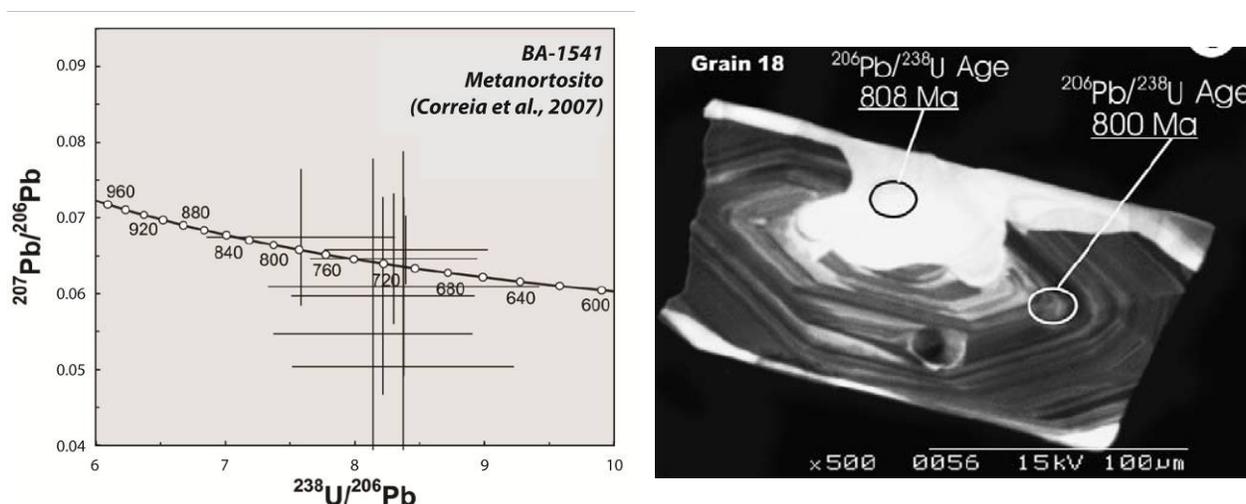


Figura 1.3 – Ilustração do problema geocronológico para o Complexo Serra da Malacacheta-Barro Alto. A) SHRIMP U-Pb em zircão de metanortosito (modificado de Correia *et al.*, 2007). Os dados revelam idades entre 800 e 730 Ma e, portanto, não permitem a distinção entre a cristalização ígnea e o metamorfismo de alto-grau. B) Cristal de zircão de amostra do Complexo de Niquelândia, interpretado como equivalente ao norte do Complexo de Barro Alto (modificado de Pimentel *et al.*, 2004). Bordas metamórficas são nítidas e ocorrem como superfícies curvas que obliteram a zonação primária. Verifica-se, ainda, que o núcleo apresenta idades mais novas que as bordas, o que sugere distúrbio da assinatura isotópica U-Pb.

Dessa forma, o estudo das condições de alojamento crustal desse volumoso magmatismo máfico e de sua relação com o metamorfismo de alto grau torna-se crucial, dado que os complexos acamados podem representar a fonte de calor para as paragêneses de temperatura ultra-alta observadas nos granulitos dos complexos Anápolis-Itaçu e Barro Alto.

1.2. Objetivos

O escopo desta tese é verificar qual a expressão do metamorfismo de alto grau nos cristais de zircão dos complexos Anápolis-Itaçu e Barro Alto e como esse processo influencia o sistema U-Pb. Com a resolução deste problema geocronológico, será possível definir a realidade geológica contida nas idades obtidas e, conseqüentemente, discorrer a respeito do contexto geotectônico dos terrenos granulíticos mais expressivos da Faixa Brasília.

Assim, no âmbito da Faixa Brasília, o estudo tem como objetivo específico responder às seguintes questões:

1. As idades U-Pb em zircão representam a cristalização ígnea, a superimposição do metamorfismo de alto grau, ou ainda um valor intermediário entre ambas?
2. Quantos eventos geológicos encontram-se registrados no zircão dessas rochas?
3. Quais as implicações dos resultados obtidos para o entendimento da evolução tectônica da Faixa Brasília?
4. E, por fim, qual é a relação entre o volumoso magmatismo máfico e o metamorfismo de temperatura ultra-alta?

Este estudo representa um avanço em termos de aplicação de diversas técnicas analíticas com vistas à resolução de problemas geológicos-geocronológicos na Faixa Brasília. Dessa forma, imagens de catodoluminescência revelarão a textura interna do grão, enquanto que análises *in-situ* de isótopos de Hf em zircão permitirão averiguar os episódios de cristalização aos quais o grão foi submetido. Por fim, a investigação da composição química de zircão contribuirá para a compreensão da relação entre este mineral e as demais fases metamórficas e, portanto, aliar-se-á informação petrológica às idades U-Pb.

Adicionalmente, este estudo promove um avanço para o entendimento da atuação do metamorfismo de alto grau sobre zircão e, assim, as informações aqui obtidas contribuem para a compreensão de feições similares, descritas em terrenos que apresentem cenário similar ao aqui exposto.

1.3. Estrutura da Tese

A tese encontra-se organizada em sete capítulos. Após este tópico introdutório, segue-se uma revisão teórica de questões relativas à formação de zircão metamórfico, com ênfase nas características físicas e químicas resultantes da superimposição do metamorfismo de alto-grau, a fim de acumular informações para posterior aplicação na interpretação do contexto geológico-geocronológico dos complexos Anápolis-Itaçu e Barro Alto.

Os resultados da tese são redigidos em formato próprio para divulgação em periódicos internacionais. Destarte, o Capítulo 3 discute os dados obtidos para o Complexo Anápolis-Itaçu, cujo artigo encontra-se aceito para publicação em volume especial do periódico *Lithos*, referente à conferência Granulites & Granulites 2009. O capítulo seguinte apresenta informações obtidas

para os complexos Serra da Malacacheta e Barro Alto, organizadas em trabalho submetido à *Precambrian Research*.

No Capítulo 5, discutem-se os processos físico-químicos de recristalização de minerais aplicados ao zircão, frente aos dados obtidos em ambas as áreas de estudo. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas neste estudo.

As referências consultadas estão listadas no Capítulo 7.

No CD-ROM em anexo, encontram-se imagens de catodoluminescência dos grãos analisados neste estudo referenciados aos dados U-Pb em zircão.

2. ZIRCÃO METAMÓRFICO

2.1. Introdução

Zircão é o principal silicato de Zr tanto em rochas ígneas quanto metamórficas e, atualmente, é o mineral mais utilizado para datação pelo método U-Pb em função das características físico-químicas que admitem a substituição de Zr por íons tetravalentes (p.ex. U e Th) e ainda decorrem em baixas taxas de difusão iônica, permitindo assim o acúmulo de Pb durante o tempo geológico.

Na última década, vários estudos revelaram a aplicação deste mineral não somente para geocronologia, mas também para estudos petrogenéticos. Visto que geralmente são assimilados diversos outros elementos traço à estrutura cristalina, como Hf, REE, Y e Ti, zircão mostrou-se apropriado para investigações da fonte magmática e de processos de assimilação crustal, além de eventos geológicos posteriores à cristalização, como é o caso do metamorfismo (Figura 2.1).

Contudo, tais análises só se tornaram possíveis devido ao aprimoramento das ferramentas microanalíticas que, atualmente, propiciam resultados mais acurados em função da elevada resolução espacial e permitem a obtenção de dados robustos dos sistemas isotópicos U-Pb e Lu-Hf em zircão, bem como de concentrações de elementos-traço, que podem ser inferiores a 10 ppm (Hoskin & Schaltegger, 2003). Devido a tal progresso, diversos terrenos metamórficos de significado geológico-geocronológico complexo foram revisitados, com o intuito de avaliar o comportamento de zircão durante o metamorfismo de alto grau.

Nesse sentido, este capítulo dedica-se a uma revisão teórica sobre zircão metamórfico, a fim de adquirir as informações disponíveis na literatura e aplicá-las para melhor entendimento da evolução tectono-metamórfica dos complexos Anápolis-Itaçu e Serra da Malacacheta-Barro Alto.

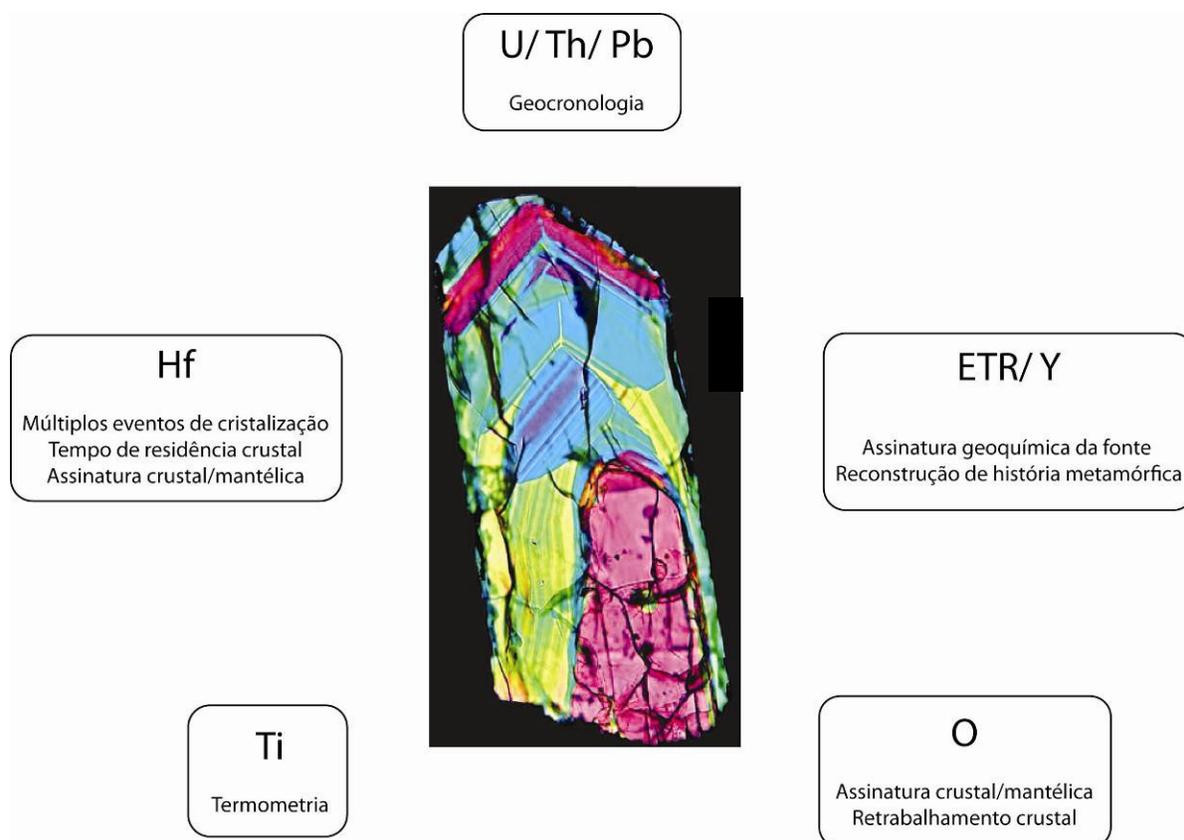


Figura 2.1 - Aplicações do zircão (baseado em Belousova *et al.*, 2006, Valley, 2003; Watson *et al.*, 2006; Harley & Kelly, 2007; Gerdes & Zeh, 2009).

2.2. Condições de formação de zircão no metamorfismo de alto grau

Durante o metamorfismo, zircão pode formar-se de dois modos distintos:

- Por **cristalização**, a partir de fluidos ou magmas (Roberts & Finger, 1997; Schaltegger *et al.*, 1999; Vavra *et al.*, 1999; Rubatto, 2002, Rubatto & Hermann, 2007; entre outros) ou ainda em decorrência de reações metamórficas que envolvam a quebra de minerais portadores de Zr (Vavra *et al.*, 1996; Fraser *et al.*, 1997; Bingen *et al.*, 2001; Degeling *et al.*, 2001; Bea *et al.*, 2006). Esse processo resulta em bordas neoformadas ao redor de grãos remanescentes ou mesmo em novos cristais individuais. Portanto, trata-se de eventos de dissolução e cristalização temporal e espacialmente desconectados (Vavra *et al.*, 1999; Ayers *et al.*, 2003).

- Por *recristalização*¹, induzida ou não por defeitos cristalinos oriundos de radiação, em um processo gradual que migra da borda para o núcleo do cristal e que promove o reequilíbrio físico-químico do zircão (Ashwal *et al.*, 1999; Hoskin & Black, 2000; Rubatto & Hermann, 2003; Tomaschek *et al.*, 2003; Geisler *et al.*, 2007; Martin *et al.*, 2008; Rubatto *et al.*, 2008; Gerdes & Zeh, 2009). Nesse caso fluidos metamórficos são responsáveis pela mobilidade dos elementos constituintes do zircão e, desta forma, esse tipo de alteração é capaz de induzir a perda parcial ou mesmo total de Pb. Por conseguinte, as idades obtidas podem não ter significado geológico.

Ambas as condições para formação de zircão metamórfico podem ser atribuídas tanto a etapas progressivas quanto retrometamórficas da evolução de um orógeno (Figura 2.2). Nas fases iniciais da trajetória P-T, predominam as reações de desidratação (Ms, Bt e/ou Hbl). Assim, os fluidos liberados promovem a fusão parcial da rocha (A), o que resulta na dissolução dos menores cristais de zircão e conseqüente sobrecrescimento nos grãos restantes (Figura 2.2B).

Com o aumento progressivo da temperatura, ao redor do pico do metamorfismo pode ocorrer o reequilíbrio do zircão primário ou previamente alterado. Nessa zona de recristalização os cristais que permanecerem em contato com o fluido ou magma podem gradualmente reordenar sua estrutura, que se encontra metaestável em função de defeitos induzidos por radiação ou devido à deformação do retículo cristalino derivada da incorporação de elementos traço. No primeiro caso, a recuperação se dá pela nucleação e recristalização à expensa dos domínios amorfos do grão e, dependendo da composição do fluido, elementos “non-formula”, como Ca, Al, Fe e Pb comum, são incorporados ao cristal (Geisler *et al.*, 2003; 2007). No segundo caso, a diferença de solubilidade entre os dois extremos da solução sólida facilita a dissolução e a reprecipitação concomitante do zircão. Assim, quando o fluido atinge o eutético desse sistema, gera-se um domínio prístino, empobrecido em elementos-traço, além de inclusões de fases minerais formadas a partir dos compostos eliminados durante esse processo (Geisler *et al.*, 2007).

¹ O termo ‘recristalização’ refere-se à modificação parcial ou mesmo total de alguma feição de um mineral ou rocha, especialmente a sua composição química (Harley *et al.*, 2007).

Todavia, ressalta-se que somente será possível acessar idades representativas dessa etapa caso o zircão seja envolto por outro mineral, o qual atuará como escudo contra as posteriores alterações do retrometamorfismo.

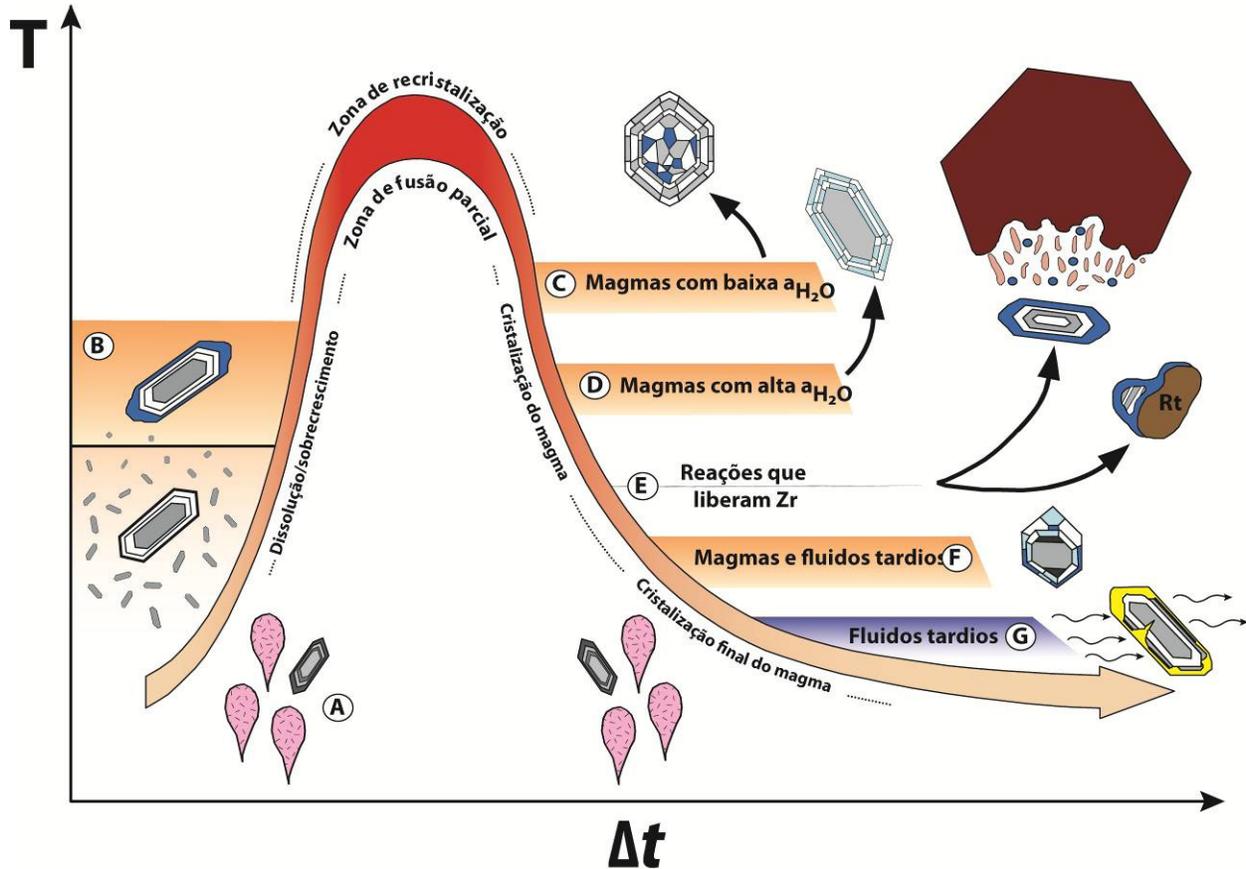


Figura 2.2 – Possíveis etapas de cristalização de zircão durante o metamorfismo em um orógeno quente, durante um período de tempo (Δt) da ordem de milhões de anos (modificado de Harley *et al.*, 2007). Vide texto para explicação.

Durante a trajetória de resfriamento, a composição do fluido/magma é, inicialmente, o principal fator que rege o momento de crescimento de novos grãos de zircão, visto que influencia diretamente a velocidade de cristalização (Figura 2.2C, D). Assim, fusões com baixa a_{H_2O} cristalizam sob temperaturas mais elevadas e, além disso, o reduzido conteúdo de água diminui a difusão dos elementos nesse meio. Deste modo, uma feição atribuída a esse tipo de cristalização é a formação de prismas curtos que comumente apresentam zonação por setores (Schaltegger *et al.*, 1999; Hoskin & Schaltegger, 2003; Corfu *et al.*, 2003). Por outro lado, minerais formados sob condições de elevada a_{H_2O} revelam estruturas típicas de crescimento a partir do magma, como

hábito acicular a prismático e zonação oscilatória (Figura 2.2D; Corfu *et al.*, 2003; Nyström & Kriegsman, 2003).

As reações retrometamórficas promovem ainda a quebra de minerais portadores de Zr, como granada, rutilo, hornblenda e ilmenita, o que resulta na cristalização de novos indivíduos ou de bordas ao redor dos grãos restantes (Fraser *et al.*, 1997; Degeling *et al.*, 2001; Bingen *et al.*, 2001; Bea *et al.*, 2006; Figura 2.2E). Além disso, fusões parciais tardias, resultantes da descompressão isotérmica do orógeno, podem constituir uma população adicional de zircão (Figura 2.2F). Por fim, fluidos oriundos de magmas félsicos relacionados às etapas finais da evolução metamórfica reagem com as fases minerais presentes e, com isso, promovem a alteração hidrotermal das mesmas (Figura 2.2G).

Portanto, vê-se que o zircão sin-metamórfico pode ser neoforado ou recristalizado, em qualquer etapa da trajetória P-T de um orógeno, seja progressiva ou retrometamórfica. Tal fato implica em diferenças físicas e químicas significativas para cada situação, cuja análise torna-se imprescindível para a correta interpretação das idades U-Pb obtidas em zircão metamórfico. Deste modo, tais características serão discutidas nos tópicos seguintes.

2.3. Características físicas

Para a investigação da natureza do zircão, a descrição da morfologia externa e da textura interna é fundamental, visto que tais feições refletem a adaptação física do cristal à trama metamórfica, bem como à interação com fluidos e fusões.

Em geral, os grãos metamórficos são incolores, límpidos e pequenos, com dimensões comumente inferiores a 100 μm . Os cristais apresentam grau de arredondamento variável o que, por vezes, decorre em morfologia ovóide, interpretada como resultado da reabsorção diferencial por fluidos insaturados em Zr (Figura 2.3A; Hoskin & Schaltegger, 2003). Ainda, cristais euédricos e aproximadamente equidimensionais, denominados “soccer-ball”, são também comuns em rochas de alto-grau (Figura 2.3B; Vavra *et al.*, 1999; Schaltegger *et al.*, 1999). O desenvolvimento desse hábito está relacionado à cristalização em arranjo granoblástico, em sistemas de elevada temperatura e ricos em fluidos, como é o caso de migmatitos (Oliver *et al.* 1999).

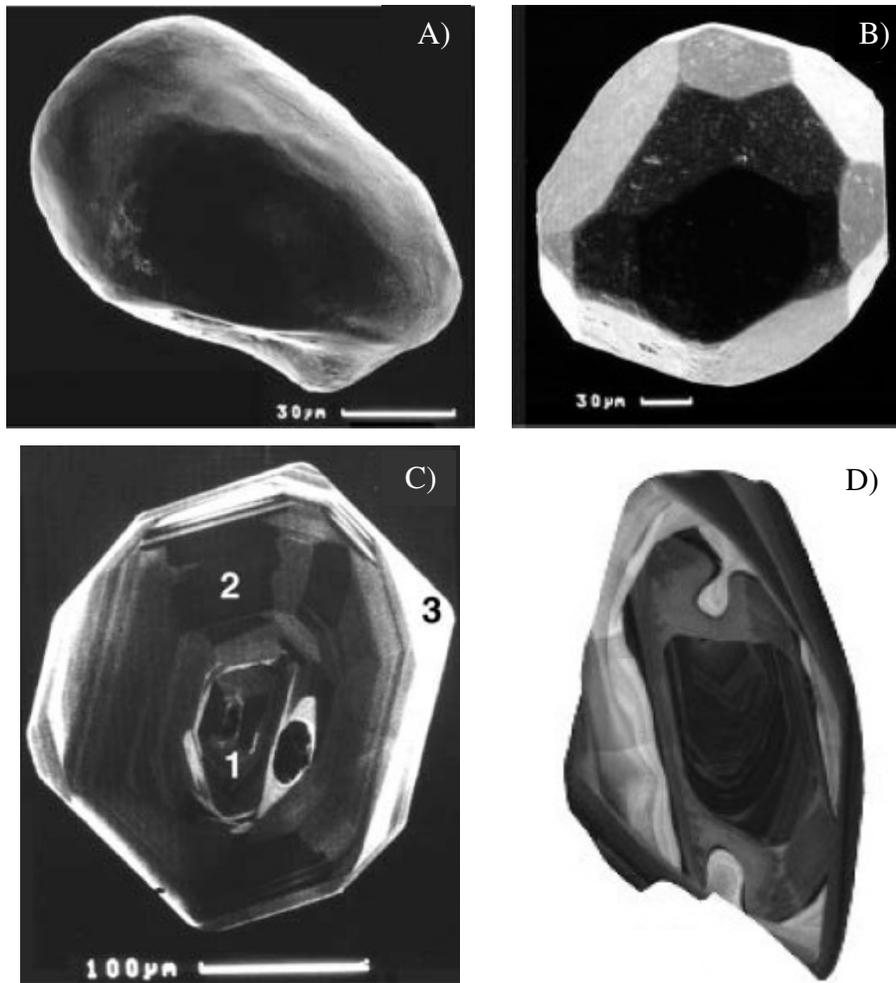


Figura 2.3 - Morfologias externas e texturas internas típicas de zircão metamórfico. A) Morfologia ovóide, com faces e arestas arredondadas, resultantes da interação com fluidos insaturados em Zr (Hoskin & Schaltegger, 2003). B) Zircão euédrico, denominado “soccer-ball”, descrito em leucossoma de fácies granulito (Schaltegger *et al.*, 1999). C) Sequência de estruturas geralmente observadas em zircão cristalizado no episódio metamórfico de alto-grau. O núcleo herdado (1) é envolto por uma zona de baixa luminescência (2), a qual é subsequentemente envolto por uma zona de alta catodoluminescência (Hoskin & Schaltegger, 2003). D) Zircão recristalizado no metamorfismo de alto-grau; nota-se um domínio externo com zonação caótica e não planar, bem como reentrâncias que migram da borda para o núcleo do grão (dimensão em torno de 200µm; Corfu *et al.*, 2003).

O metamorfismo também promove modificações importantes na estrutura interna do zircão, de acordo com o mecanismo envolvido na formação ou recristalização do mesmo. Destarte, bordas neoformadas que envolvem núcleos antigos são os principais representantes de novo crescimento de zircão durante o metamorfismo (Figura 2.3C). Estes domínios apresentam composição homogênea e, por vezes, observa-se zonação oscilatória, típica de cristalização a partir do magma (Schaltegger *et al.*, 1999; Corfu *et al.*, 2003).

Por outro lado, a recristalização de zircão origina feições peculiares, irregulares e descontínuas, como reentrâncias e limites sinuosos entre domínios alterados e preservados do

grão (Figura 2.3D). Tais frentes de alteração formam-se predominantemente a partir das terminações do cristal, mas também ocorrem em regiões internas, sobretudo ao redor de inclusões minerais (Hoskin & Black, 2000; Hoskin & Schaltegger, 2003). São comuns texturas internas caóticas e zonações não planares e, em alguns grãos, a recristalização pode promover a obliteração total de estruturação, resultando em grãos internamente homogêneos (Hoskin & Black, 2000).

2.4. Assinatura Geoquímica

O metamorfismo de alto grau incorre não somente em feições texturais típicas no zircão, conforme visto no tópico anterior, mas também resulta em assinatura geoquímica modificada em relação à composição original. A Figura 2.4 ilustra as duas possíveis condições de formação de zircão metamórfico e ressalta, em ambas, as principais características químicas.

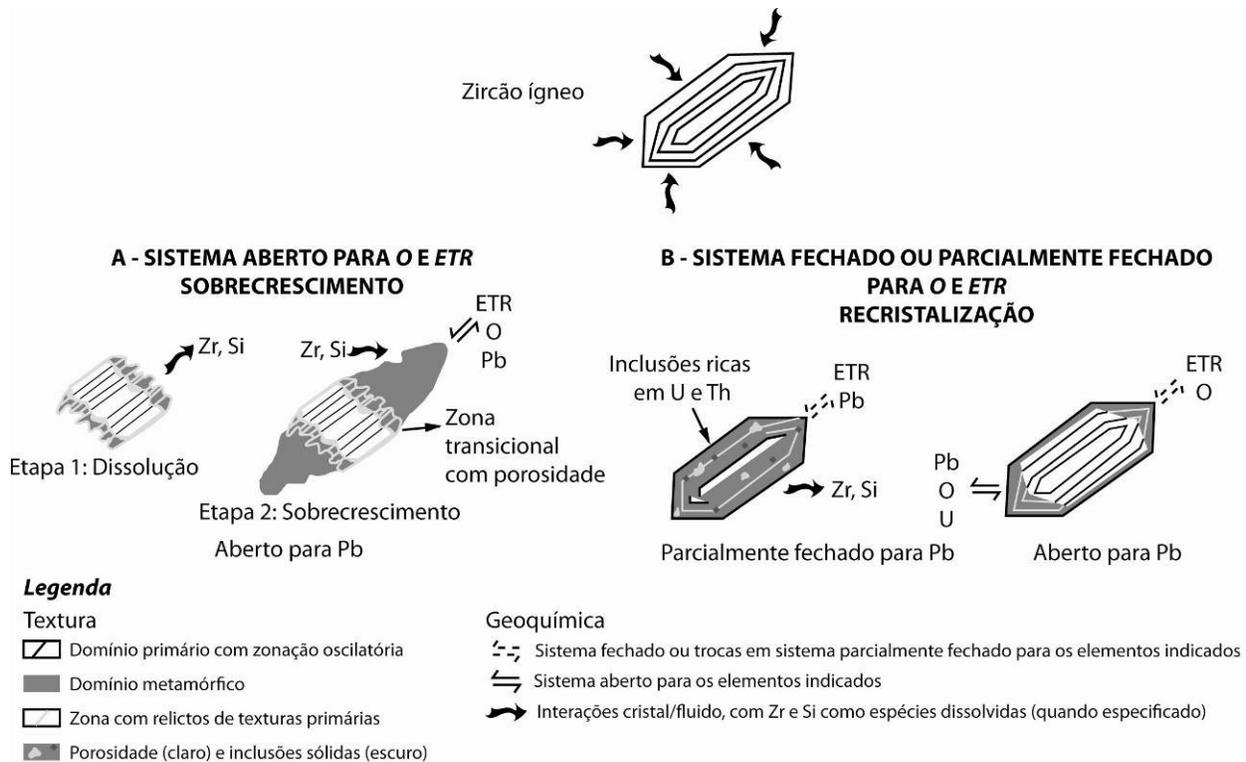


Figura 2.4 – Mobilidade de elementos traço em zircão durante o metamorfismo de alto-grau (modificado de Martin *et al.*, 2008). Em A, ilustra-se a situação na qual há uma nova cristalização, representada por bordas neoformadas ao redor de núcleos antigos, e em B observa-se um episódio de recristalização do zircão. Ressalta-se a presença de uma fase fluida em ambos os casos, a qual facilita a troca de elementos com o meio.

Cristalização de novos grãos/ sobrecrecimento metamórfico

No caso de cristalização de novos grãos ou bordas neoformadas, o sistema geoquímico do zircão é considerado aberto na escala do cristal, visto que a dissolução e o sobrecrecimento ocorrem em etapas díspares da trajetória P-T do orógeno (Figura 2.4A). Por conseguinte, este mineral desenvolve-se em equilíbrio com o magma ou fluido, bem como com as demais fases da assembléia metamórfica e, conseqüentemente, apresenta características isotópicas e composicionais distintas entre a borda neoformada e o núcleo do cristal.

Assim, o zircão formado a partir de fluidos ou fusões parciais (p. ex. migmatitos) apresenta a composição de elementos traço análoga ao magma e, portanto, o padrão de elementos terras raras assemelha-se a cristais ígneos. Observa-se uma distribuição enriquecida em ETR pesados em relação aos leves, resultando em razões Lu_N/La_N elevadas, além de anomalia positiva de Ce e negativa de Eu (Figura 2.5, curva A; Rubatto 2002; Hoskin & Schaltegger 2003).

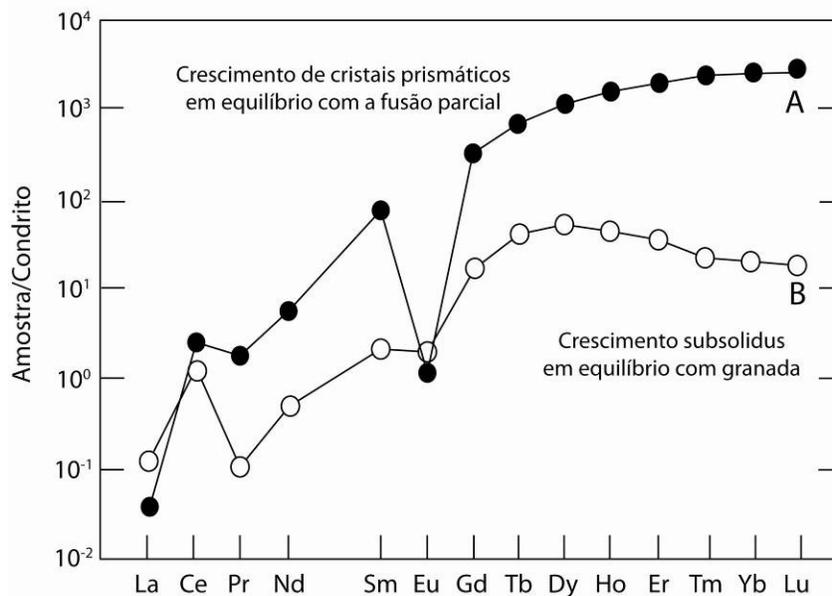


Figura 2.5 – Padrão de elementos terras raras de zircão metamórfico normalizados pelo condrito (Hoskin & Schaltegger 2003; Fraser *et al.* 1997). Ambas as curvas representam a cristalização de novos indivíduos ou o sobrecrecimento de bordas ao redor de núcleos herdados.

Todavia, os demais produtos metamórficos cristalizados em concomitância com zircão podem influenciar a partição dos elementos traço, modificando assim a assinatura geoquímica deste mineral (Fraser *et al.* 1997; Degeling *et al.* 2001; Bea *et al.* 2006). Granada é fase comum nas assembléias de alto-grau metamórfico e, devido aos elevados coeficientes de partição dos elementos terras raras pesados deste mineral, a cristalização em equilíbrio químico com o

fluido/magma resulta em padrões de distribuição horizontais ou mesmo negativos de ETR pesados no zircão, conforme ilustra a curva B da Figura 2.4 (Rubatto, 2002).

Recristalização metamórfica de zircão

Zircão incorpora uma série de elementos traço ao retículo cristalino durante a cristalização ígnea. O mecanismo de substituição pode envolver trocas simples, quando os cátions possuem a mesma valência que o Zr, ou acopladas, nas quais é necessário balanço de cargas para neutralizar a reação (Tabela 2.1). Entretanto, a diferença de raio iônico e de carga entre Zr e Si e os elementos traço incorporados em zircão cria uma tensão estrutural no cristal, tornando-o metaestável sob condições crustais.

Tabela 2.1- Principais substituições em zircão (Hoskin & Schaltegger, 2003).

Substituições simples	Substituições acopladas
$\left. \begin{array}{l} \text{Hf}^{4+} \\ \text{Th}^{4+} \\ \text{U}^{4+} \\ \text{Ti}^{4+} \\ \text{Sn}^{4+} \end{array} \right\} = \text{Zr}^{4+}$	Em um sítio estrutural $(\text{Y, REE})^{3+} + (\text{Nb, Ta})^{5+} = 2 \text{Zr}^{4+}$
	Em dois sítios estruturais $(\text{Y, REE})^{3+} + \text{P}^{5+} = \text{Zr}^{4+} + \text{Si}^{4+}$ $\text{Sc}^{3+} + \text{P}^{5+} = \text{Zr}^{4+} + \text{Si}^{4+}$

Devido às elevadas temperaturas atingidas no metamorfismo de alto-grau, o zircão torna-se instável e, conseqüentemente, os constituintes não-essenciais são expulsos do retículo cristalino, por meio da recristalização (Hoskin & Schaltegger 2003). A supressão destes elementos se dá a partir de uma frente de alteração, a qual avança gradualmente rumo ao centro do zircão. Assim, evolui-se para um domínio externo pristino e praticamente puro que contém inclusões de fases minerais constituídas pelos elementos eliminados por esse processo, como xenotíma, coffinita e torita (Geisler *et al.* 2007).

Destarte, a recristalização promove a perda de elementos como Pb, Hf, REE e U (Geisler *et al.*, 2003; Geisler *et al.*, 2007). Ainda, o zircão recristalizado tende a ser relativamente empobrecido em elementos terras raras, porém a distribuição de ETR pesados é geralmente mantida e, assim, domínios preservados e alterados revelam razões Lu_N/La_N similares. Além

disso, quando o zircão apresenta defeitos induzidos por radiação, facilita-se a difusão dos elementos *non-formula* e pode haver ganho de cátions Al, Ca, Fe, Mg e Pb_{comum}, que ocuparão sítios intersticiais do retículo cristalino.

Caso a recristalização seja incompleta, o mineral ainda reterá parcialmente a assinatura geoquímica e isotópica primária e, portanto, as informações obtidas nesses domínios representam um valor intermediário entre a cristalização ígnea e o metamorfismo (Hoskin & Black, 2000; Möller *et al.*, 2003; Kelly & Harley, 2005; Harley *et al.*, 2007). Desta forma, na recristalização os sistemas geoquímico e isotópico são considerados apenas parcialmente fechados para determinados elementos e, conseqüentemente, não se atinge o equilíbrio completo com o restante da rocha (Martin *et al.* 2008).

2.5. Considerações finais

Conforme discutido nos tópicos anteriores, zircão pode ser alterado durante o metamorfismo de alto grau e esse processo resulta em distintas feições texturais e composicionais. A partir da integração da caracterização textural com dados isotópicos e geoquímicos, torna-se possível avaliar as condições de formação ou alteração destes grãos e recuperar informações a respeito do ambiente físico-químico de cristalização ou recristalização dos mesmos. Adicionalmente, esta avaliação multicriterial traz implicações importantes para a datação de rochas de alto-grau, visto que a assinatura geoquímica do zircão permite identificar em que momento da trajetória P-T este mineral se formou e, assim, diferenciam-se com mais precisão as etapas da evolução do orógeno.

Dessa forma, as informações aqui apresentadas fornecerão subsídios para a correta interpretação das idades obtidas em zircão de rochas dos complexos Anápolis-Itaçu e Barro Alto e, conseqüentemente, auxiliarão a elucidar a evolução tectônica da Faixa Brasília.