DADOS ISOTÓPICOS Pb-Pb EM ZIRCÃO (EVAPORAÇÃO) E Sm-Nd DO COMPLEXO GRANÍTICO ESTRELA, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS, BRASIL: IMPLICAÇÕES PETROLÓGICAS E TECTÔNICAS

CARLOS EDUARDO DE MESQUITA BARROS^{1,4}, MOACIR JOSÉ BUENANO MACAMBIRA^{1,3},
PIERRE BARBEY² & THOMAS SCHELLER^{1,3}

Abstract PB-PB EVAPORATION ON ZIRCON AND SM-ND DATA OF THE ESTRELA GRANITE COMPLEX, CARAJÁS METALOGENIC PROVINCE, BRAZIL: PETROLOGIC AND TECTONIC IMPLICATIONS The Estrela Granite Complex is a syntectonic alkaline (A-type) massif located to the east of the Carajás range, southeastern of the Amazonian Craton. Pb-Pb evaporation zircon analysis yielded an age of 2763 ± 7 Ma to its emplacement. The petrogenetic model considering the partial melting of dehydrated crustal sources (enderbites) is favoured by the Sm-Nd model ages (T_{DM}) (2.97 Ga to 3.19 Ga) and the negative $\epsilon_{Nd(t)}$ values (-0.38 to -2.06). The low initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios could suggest the partial melting of Rb-depleted granulitic rocks. The short time interval between the Estrela Granite Complex and the mafic-ultramafic (Luanga Complex) and Planalto and Plaqué granites shows that a widespread magmatic event took place at 2.76 b.y. ago in the northern part of the Carajás Metalogenic Province as well as permit to date the age of an important event of shortening. The following sequence of events is proposed: a) development of the former crust (~ 3.2 Ga to 3.0); b) development of the gneissic basement (2.97 Ga to 2.81 Ga); c) distensive regime, Carajás basin formation and metavolcano-sedimentary deposition (between 2.81 Ga and 2.76 Ga); d) syntectonic granite emplacement and high-temperature/low-pressure metamorphism during weak protracted shortening (2.76 to 2.74 Ga).

Keywords: Pb-Pb on zircon; Sm-Nd; Archean, Estrela; syntectonic granites; Carajás Metalogenic Province.

Resumo O Complexo Granítico Estrela é um maciço sintectônico de assinatura geoquímica comparável àquela dos granitos do tipo A. A idade de 2763 ± 7 Ma, obtida pelo método de evaporação de zircão, marca a idade de colocação deste maciço e permite precisar com mais segurança a idade de um evento compressivo na evolução tectono-metamórfica arqueana da Província Mineral de Carajás. Análises Sm-Nd em rocha total forneceram valores de ϵ_{Nd} entre -0,38 e -2,06 que, para idades de cristalização de 2763 Ma, corresponderiam a fontes crustais com idades-modelo Sm-Nd (T_{DM}) de 2,97 Ga a 3,19 Ga. As baixas razões iniciais $^{87}Sr/^{86}Sr$ indicam fontes crustais empobrecidas em Rb, muito provavelmente de natureza granulítica (enderbites). A semelhança das idades do Complexo Granítico Estrela com as idades das rochas máficas/ultramáficas do Complexo Luanga e dos granitos Planalto e Plaqué colocam em evidência um amplo magmatismo ocorrido a 2,76 Ga na parte norte da Província Mineral de Carajás. Uma sequência de eventos é proposta: a) formação de crosta continental (~ 3,2 a 3,0 Ga); b) formação de embasamento gnáissico (2,97 a 2,81 Ga); c) formação e preenchimento da Bacia Carajás em regime distensivo e estágio proto-oceano (entre 2,81 e 2,76 Ga); d) colocação de granitos sintectônicos e metamorfismo de alta temperatura e baixa pressão durante fraca e prolongada fase de compressão (2,76 a 2,74 Ga).

Palavras-chave: Pb-Pb em zircão; Sm-Nd; Arqueano; Estrela; granitos sintectônicos; Província Mineral de Carajás.

INTRODUÇÃO O estudo das relações entre plutonismo, metamorfismo e deformação, discutidas por muitos autores (Delor *et al.* 1991, Bloem *et al.* 1991, Jelsma *et al.* 1993), tem contribuído para a compreensão da evolução tectono-termal de terrenos de diferentes idades. Os granitos sintectônicos são marcadores de fases de deformação, daí a importância de sua caracterização e da determinação de suas idades, dentro de uma óptica integrada que envolve as petrologias ígnea e metamórfica, a geologia estrutural e a geocronologia.

Na última década, a importância do papel dos granitos neoarqueanos na evolução tectono-termal na Província Mineral de Carajás foi reconhecida por diversos autores (Lindenmayer *et al.* 1994, Huhn *et al.* 1999, Barros *et al.* 2001). Este novo enfoque levou Barros *et al.* (2001) a sugerir a presença de um cinturão

plutono-metamórfico delineado pela coalescência de auréolas tectono-metamórficas presentes nas séries metavolcano-sedimentares do Supergrupo Itacaiúnas ao redor de corpos granitóides sintectônicos.

A similaridade entre a idade do Complexo Granítico Estrela e as idades de associações máficas/ultramáficas acamadadas que ocorrem na região de Carajás (p.ex. Complexo Luanga) traz algumas complicações quando são considerados os regimes tectônicos esperados durante a colocação dos magmas máficos/ultramáficos com os esforços compressivos que atuaram durante a colocação destes granitos neoarqueanos na região de Carajás. Neste trabalho são apresentados os dados geocronológicos Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd (rocha total) do Complexo Granítico Estrela e são discutidas as implicações petrológicas e tectônicas deste

1 - Depto. de Geoquímica e Petrologia (Universidade Federal do Pará). Campus Universitário do Guamá. CP 1611, Belém - PA, CEP 66075-100. E-mails: cadu@ufpa.br, moamac@ufpa.br, scheller@ufpa.br

2 - Université Henri Poincaré - Nancy I e Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG - CNRS). E-mail: barbey@crpg.cnrs-nancy.fr

3 - Laboratório de Geologia Isotópica (Pará-Iso) do Centro de Geociências da UFPA.

4 - Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitóides, Bolsista do CNPq.

magmatismo na geologia da região de Carajás.

GEOLOGIA REGIONAL A região de Carajás (Fig. 1a), localizada na parte sudeste do Cráton Amazônico, é constituída em grande parte de rochas arqueanas (Tabela 1). A importância econômica desta província é incontestável pela grande quantidade de depósitos minerais (Docegeo 1988). A Província Mineral de Carajás tem sido dividida em dois domínios com base em dados litológicos e geocronológicos (Docegeo 1988, Costa *et al.* 1990, Macambira & Lafon 1995, Dall'Agnol *et al.* 1997). O domínio meridional corresponde ao Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, cujas rochas têm idades de 2,97 a 2,87 Ga, sendo por isto mais antigas do que o Domínio Carajás, que compreende a Serra do Carajás e seu entorno, onde predominam rochas com 2,76 Ga. As principais unidades litoestratigráficas desta região são apresentadas a seguir.

Terreno granito-greenstone de Rio Maria Este domínio ocupa a parte meridional da Província Mineral de Carajás, cujo limite norte não foi precisamente definido, mas provavelmente se situe a sul do município de Canaã dos Carajás. O limite sul deste terreno se

localiza no norte do Estado do Mato Grosso.

As seqüências do tipo *greenstone* de Rio Maria (Supergrupo Andorinhas) são constituídas de metabasaltos, intercalações de talco xistos, metatufos, metacherts e de formações ferríferas (Grupo Babaçu) e metapelitos, metapsamitos e meta-riodacitos (Grupo Lagoa Seca) (Docegeo 1988). Datações (U-Pb em zircão) de rochas vulcânicas félsicas do Grupo Lagoa Seca apontam idades de 2904 ± 22 Ma e 2971 ± 5 Ma (Macambira & Lafon 1995).

Dentre os granitóides da região de Rio Maria se destacam o Tonalito Arco Verde, o Granito Guarantã, o Granodiorito Rio Maria, o Tonalito Parazônia, o Trondhjemito Mogno e os granitos Xinguara e Mata Surrão (Dall'Agnol *et al.* 1997). As idades destas rochas variam de 2,96 Ga a 2,87 Ga (Macambira & Lafon 1995).

Domínio Carajás O Domínio Carajás se situa no norte da Província Mineral de Carajás e engloba a Serra de Carajás e o seu entorno. Este domínio é limitado a norte por rochas granitóides sintectônicas do Cinturão Maroni-Itacaiúnas (Macambira *et al.* 2003), porém a localização exata do limite ainda não foi estabelecida.

A unidade mais antiga do Domínio Carajás é o Complexo Pium

Figura 1- a) Mapa de localização da área estudada. b) Mapa geológico esquemático da parte norte da Província Mineral de Carajás, modificado de Docegeo (1988) e Barros *et al.* (1997). b) Mapa geológico simplificado do Complexo Granítico Estrela (modificado de Barros *et al.* 2001).

Tabela 1- Síntese dos dados geocronológicos da parte norte da Província Mineral de Carajás (modificado de Macambira & Lafon 1995).

Unidade	Rocha	Idade	Método	Referências
Granitos Paleoproterozóicos	Granitos pós-tectônicos, alcalinos, metaluminosos	1874 ± 2 Ma	U-Pb, zircão	Machado <i>et al.</i> 1991
Granito Old Salobo	Granitos alcalinos e metaluminosos	2573 ± 3 Ma	U-Pb, zircão	Machado <i>et al.</i> 1991
Granitos do Rio Itacaiúnas		2560 ± Ma	Evap. zircão	Souza <i>et al.</i> 1996
Diques Máficos	Metagabros	2708 ± 37 Ma	Evaporação zircão	Mougeot <i>et al.</i> 1996
Granitos Planalto, Plaquê e Serra do Rabo	Granitos alcalinos e metaluminosos	2747 ± 2 Ma 2727 ± 29 Ma	Evaporação zircão	Huhn <i>et al.</i> 1999, Avelar 1996, Sardinha <i>et al.</i> 2001.
Complexo Luanga	Máficas e ultramáficas	2763 ± 6 Ma	U-Pb, zircão	Machado <i>et al.</i> 1991
Supergrupo Itacaiúnas	Anfibolitos	2761 ± 3 Ma	U-Pb, zircão	Machado <i>et al.</i> 1991
Complexo Xingu	Gnaisses e granitóides deformados	2851 ± 4 Ma	U-Pb, zircão	Machado <i>et al.</i> 1991
Complexo Pium	Granulitos: metamorf. cristalização	2859 ± 9 Ma 3002 ± 14 Ma	U-Pb, zircão	Pidgeon <i>et al.</i> 2000

(Fig. 1a), o qual se situa a sul da Serra dos Carajás e compreende granulitos máficos e enderbitos que ocorrem em corpos alongados na direção E-W (Docegeo 1988). As idades (U-Pb em zircão) de 3002 ± 14 Ma e 2859 ± 9 Ma foram interpretadas como a idade de cristalização dos protólitos e de granulitização, respectivamente (Pidgeon *et al.* 2000). Renne *et al.* (1988) obtiveram idades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 2,5 e 2,7 Ga em anfibólitos, as quais foram interpretadas como datando diferentes fases de aquecimento. Idades em torno de 2,5 Ga têm sido amplamente obtidas em rochas da região de Carajás, como resultado, sobretudo, da reabertura dos sistemas isotópicos Rb-Sr (Macambira & Lafon 1995).

Granitóides fortemente deformados, atribuídos ao Complexo Xingu, afloram próximo ao alvo Salobo, sob a denominação de Gnaiss Cascata, e na pedreira CIMCOP (km 16 da PA 275). A idade (U-Pb em zircão) deste último é de 2851 ± 4 Ma (Machado *et al.* 1991).

O Supergrupo Itacaiúnas (Fig. 1a) engloba rochas metavulcano-sedimentares pertencentes aos grupos Salobo, Pojuca, Grão Pará e Buritirama (Docegeo 1988). O Grupo Grão Pará é formado por vulcânicas máficas intercaladas com formações feríferas da Formação Carajás (Docegeo 1988). Lindenmayer & Fyfe (1991) propuseram que as rochas dos grupos Salobo e Pojuca seriam variações laterais do Grupo Grão Pará, submetidas a metamorfismo de fácies piroxênio hornfels. Datações (U-Pb em zircão) de rochas metabasaltos dos grupos Salobo e Pojuca (Machado *et al.* 1991) indicaram idades de 2761 ± 3 Ma.

Rochas máficas acamadadas, localizadas nas proximidades da Serra Pelada e denominadas de Complexo Luanga (Docegeo 1988), apresentaram idades (U-Pb em zircão) de 2763 ± 6 Ma (Machado *et al.* 1991). Segundo esses autores, as rochas do Complexo Luanga cortam as rochas supracrustais do Supergrupo Itacaiúnas.

No Domínio Carajás afloram granitos alongados na direção E-W, de caráter sintectônico a tardi-tectônico de tendência alcalina e metaluminosa, representados pelos granitos Estrela, Planalto, Plaquê, (Fig. 1a) e Serra do Rabo. Datações Pb-Pb em zircão (evaporação) (Macambira *et al.* 1996, Huhn *et al.* 1999) e U-Pb em zircão (Sardinha *et al.* 2001) forneceram idades de 2727 ± 29 Ma a $2743 \pm 1,6$ Ma para os três últimos corpos.

Na Serra dos Carajás, aflora a Formação Águas Claras (Fig. 1a), que engloba extensas exposições de arenitos e silitos de

ambientes litorâneo a fluvial (Nogueira *et al.* 1995). Estas rochas são cortadas por diques e soleiras de diabásio/gabro, cujas datações U-Pb em zircão (Mougeot *et al.* 1996) apontaram idades de 2708 ± 37 Ma.

O Granito Old Salobo (2573 ± 3 Ma, U-Pb zircão; Machado *et al.* 1991) aflora a sul do alvo Salobo, mostra sinais de deformação e assinatura moderadamente alcalina (Lindenmayer *et al.* 1994). Uma idade semelhante (Pb-Pb em rocha total), de 2525 ± 38 Ma, foi obtida para granitos foliados da região do Rio Itacaiúnas (Souza *et al.* 1996).

Em ambos domínios afloram diversos granitos paleoproterozóicos (Fig. 1a) que são discordantes da estruturação regional, e formados por rochas isotrópicas, alcalinas e metaluminosas com quimismo comparável ao dos granitos do tipo A (Docegeo 1988; Dall'Agnol *et al.* 1997). A idade (U-Pb em zircão) destas rochas é de 1,88 Ga (Machado *et al.* 1991).

O COMPLEXO GRANÍTICO ESTRELA Este maciço granítico, situado a leste da Serra dos Carajás (Figs. 1a e 1b), é constituído de três principais plútons monzograníticos, os quais têm ampla variação faciológica marcada pela abundância relativa de clinopiroxênio, hornblenda e biotita. Estas rochas têm altas razões $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$, elevados teores de Zr (146-632 ppm), Y (13-404 ppm), Nb (21-45 ppm) e elementos terras raras, exceto Eu, o que resulta em uma assinatura alcalina e metaluminosa (Barros *et al.* 1997), semelhante àquela dos granitos do tipo A de Whalen *et al.* (1987).

Os dados geocronológicos, disponíveis para estas rochas, limitavam-se a uma idade de 2527 ± 34 Ma obtida pelo método Rb-Sr em rocha total (Barros *et al.* 1992). Naquela ocasião se obteve a razão inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7018 \pm 0,0020$, cujo baixo valor será discutido mais adiante.

A evolução estrutural deste maciço granítico é marcada por bandamentos magmáticos (S_0) subverticais nas bordas do corpo e subhorizontais no centro dos plútons. Uma xistosidade (S_1) subvertical, de direção E-W e zonas miloníticas concordantes permite dizer que sua colocação ocorreu concomitantemente a esforços compressivos. Durante a intrusão do magma quente, os esforços de expansão lateral, juntamente aos esforços regionais criaram nas suas rochas encaixantes uma auréola termal interna e uma auréola termal externa (Fig. 1b) relativamente mais fria (Barros *et*

al. 2001).

RESULTADOS As datações Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd (rocha total) foram realizadas no espectrômetro Finnigan Mat 262 do Laboratório de Geologia Isotópica (Pará-Iso) da Universidade Federal do Pará.

Geocronologia Pb-Pb em zircão **CONDIÇÕES ANALÍTICAS** A amostra do Complexo Granítico Estrela escolhida para datação pelo método Pb-Pb em zircão (evaporação) corresponde a um hornblenda sienogranito (CRN-8) coletado na parte centro-leste do complexo granítico (648929 E / 9315824 N), associado aos hornblenda monzogranitos, e apresenta altos teores de Zr (505 ppm), relativa abundância modal de cristais de zircão (0,2 %) e a ausência de forte recristalização dinâmica.

Os cristais de zircão do Complexo Granítico Estrela apresentam coloração castanha, formas geralmente prismáticas e alongadas, podendo por vezes exibir moderado fraturamento. Localmente são observados alguns cristais de zircão apresentando crescimento geminado. Zoneamento oscilatório moderado a forte pode ser descrito em alguns cristais do zircão (Fig. 2). São comuns as feições de metamictização (opacidade, fraturamento, coloração leitosa etc.), as quais são muito provavelmente relacionadas a altas concentrações de urânio nos cristais de zircão. Todavia, para as análises, foram selecionados cristais relativamente menos afetados por estas transformações.

Figura 2- Fotomicrografia de cristais de zircão da amostra CRN-8. Notar o zoneamento oscilatório de alguns cristais; localmente há cristais com crescimento geminado.

No método aplicado, cada cristal de zircão é colocado em um filamento de rênio e submetido à evaporação em diferentes temperaturas (1450°C, 1500°C e 1550°C), seguindo-se a técnica de Kober (1987). O Pb liberado pela evaporação é fixado no filamento de ionização. Durante o aquecimento deste filamento são analisadas, no espectrômetro, as intensidades das emissões dos diferentes isótopos de Pb. A apresentação dos resultados considera os desvios a 2 σ , e as correções do Pb comum são efetuadas com base no modelo de evolução do Pb em estágio duplo (Stacey & Kramers 1975).

RESULTADOS ANALÍTICOS Os dados analíticos são apresentados na Tabela 2. Dos dez cristais selecionados, dois (cristais 4 e 6) não apresentaram emissão de Pb suficiente para as análises. Dos restantes, os resultados de quartzo (cristais 1, 3, 7 e 10) foram eliminados do cálculo da idade média por apresentarem idade inferior à dos demais. Este comportamento certamente é produto da metamictização que afetou estes grãos, permitindo a perda de Pb radiogênico ao longo do tempo. Das três etapas de evaporação, os cristais de zircão analisados mostraram resultados preferencialmente nas etapas relativas às temperaturas de 1450°C e 1500°C. Para os cristais de zircão 2 e 5, que apresentaram diferentes resultados para essas duas etapas, apenas o de mais alta temperatura foi aproveitado para o cálculo da idade. A idade média calculada para os quatro cristais de zircão restantes (2, 5, 8 e 9) do Complexo Granítico Estrela é de 2763 ± 7 Ma (2 σ), a qual é considerada como a idade de cristalização dos cristais de zircão da amostra selecionada e de colocação do maciço.

Geocronologia Sm-Nd **CONDIÇÕES ANALÍTICAS** As rochas analisadas são monzogranitos das fácies piroxênio-hornblenda (PSV-22), hornblenda (PSV-75), biotita-hornblenda monzogranito (PSV-62), hornblenda-biotita (CN-40) e biotita monzogranito (PSV-77). Estas rochas são representativas da variação faciológica e geoquímica existente no Complexo Granítico Estrela. As três primeiras amostras pertencem ao grupo metaluminoso ($Al_2O_3 \sim 11,5\%$) e as duas últimas amostras se enquadram no grupo de rochas fraccamente peraluminosas ($Al_2O_3 \sim 13,5\%$) (Barros *et al.* 1997).

As amostras, previamente pulverizadas, foram levadas à abertura por via úmida com HF e HNO_3 em forno de microondas. Em seguida, foi realizada a separação química em duas etapas, utilizando-se colunas de cromatografia de troca iônica. Na primeira coluna é feita a separação dos elementos terras raras dos demais elementos maiores. Na segunda coluna é feita a separação de Sm e Nd dos elementos terras raras. A análise é realizada por espectrometria de massa, sendo que o depósito de Nd é feito em filamento de Ta e o de Sm em filamento de Re. Na análise química é empregado um arranjo de filamento duplo, constituído de um filamento de evaporação, onde é feito o depósito de Sm ou Nd, e um filamento de ionização. As razões isotópicas medidas do Nd são corrigidas para o fracionamento de massa utilizando como parâmetro de normalização a razão $^{146}Nd/^{144}Nd = 0,7219$. Os cálculos das idades-modelo foram feitos com base na curva de evolução do manto empobrecido de DePaolo (1981).

As razões $^{147}Sm/^{144}Nd$ das amostras do Complexo Granítico Estrela variam de 0,10221 a 0,12729, com os valores algo mais baixos nas rochas com menor quantidade de anfibólio e biotita e algo mais altos em algumas amostras com maior quantidade daqueles minerais. Das cinco amostras analisadas, duas (PSV-62 e PSV-75) apresentaram razões $^{147}Sm/^{144}Nd$ em torno de 0,127, as quais, segundo Sato & Tassinari (1997), estão um pouco acima do limite

Tabela 2 - Dados isotópicos de Pb de cristais de zircão - Complexo Granítico Estrela.

Zircão	Temperatura de Evaporação °C	Nº de Razões	$^{204}\text{Pb}/^{296}\text{Pb} \pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 2\sigma$	$(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})_c \pm 2\sigma$	Idade (Ma) $\pm 2\sigma$
CRN-8/2	1500	90	0.000000 ± 0	0.19187 ± 25	0.19187 ± 25	2759 ± 2
CRN-8/5	1500	80	0.000003 ± 2	0.19171 ± 33	0.19169 ± 34	2757 ± 3
CRN-8/8	1450	82	0.000000 ± 0	0.19403 ± 57	0.19403 ± 57	2777 ± 5
	1500	82	0.000002 ± 1	0.19333 ± 27	0.19332 ± 27	2771 ± 2
	1550	52	0.000000 ± 0	0.19397 ± 44	0.19397 ± 44	2776 ± 4
CRN-8/9	1450	52	0.000002 ± 2	0.19138 ± 49	0.19134 ± 49	2754 ± 4
	1500	90	0.000000 ± 0	0.19101 ± 35	0.19101 ± 35	2751 ± 3
		528				2763 ± 7

Tabela 3- Dados analíticos Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela.

Amostra	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	2 σ	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2 σ	$\epsilon_{\text{Nd}(t)}$	T_{DM}	$\epsilon_{\text{Nd}(t)}$
PSV-22	14.72	87.05	0.10221	0,00021	0.510853	0,000006	-34.82	3.03	-1.22
CN-40	11.67	67.97	0.10378	0,00054	0.510892	0,000032	-34.06	3.02	-1.02
PSV-77	5.85	33.67	0.10503	0,00042	0.510947	0,000016	-32.99	2.97	-0.38
PSV-62	16.17	76.89	0.12716	0,00048	0.511265	0,000027	-26.78	3.19	-2.06
PSV-75	16.04	76.20	0.12729	0,00144	0.511304	0,000036	-26.02	3.12	-1.34

Figura 3- Diagrama Idade (Ga) vs. $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ com dados do Complexo Granítico Estrela.

superior de 0,125 desejado para rochas félsicas. Como as razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ destas amostras não são excessivamente elevadas e as idades-modelo não são discrepantes, preferiu-se mantê-las no conjunto de dados. Os valores de $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ se situam entre -0,38 e -2,06 Ga e as idades-modelo (T_{DM}) se situam entre 2,97 e 3,19 Ga (Tabela 3 e Fig. 3).

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES **Implicações petrológicas** Dois modelos petrogenéticos tentam explicar a origem de magmas graníticos do tipo A: 1) extremo fracionamento de magmas basálticos (Turner *et al.* 1992, Whalen *et al.* 1996), e 2) fusão parcial de rochas crustais de composição tonalítica ou granodiorítica (Anderson & Bender 1989, Patiño-Douce 1997) ou de rochas metaígneas previamente granulitizadas (Skjerlie & Johnston 1993, Landenberger & Collins 1996).

A proximidade das idades das rochas máficas (Supergrupo Itacaiúnas) e ultramáficas (Complexo Luanga) (Machado *et al.* 1991) com a idade obtida para o Complexo Granítico Estrela, bem como os baixos valores da razão inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ($0,7018 \pm 0,00197$), poderiam sugerir uma origem dos magmas graníticos a partir do

extremo fracionamento de líquidos basálticos. Deve ser ressaltado que esta razão inicial foi obtida a partir de uma isócrona Rb-Sr que forneceu uma idade de 2527 ± 34 Ma (Barros *et al.* 1992). Com a obtenção da idade de cristalização (Pb-Pb em zircão) de 2763 ± 7 Ma, a razão inicial poderia ser recalculada para esta idade. Porém, a confiabilidade desta razão inicial recalculada seria questionável em função de não se conhecer o deslocamento sofrido pela isócrona. De qualquer modo, mesmo supondo-se ter havido mudanças do valor da razão inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, admite-se, para efeito das considerações petrogenéticas, baixas razões iniciais.

Por outro lado, a ausência de encraves (autólitos) máficos, as idades T_{DM} (2,97 Ga a 3,19 Ga) e os valores negativos $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ (-0,38 a -2,06) são indicadores de uma fonte crustal. A geração dos magmas Estrela, de natureza alcalina e metaluminosa (Tipo-A), parece se ajustar melhor aos processos de fusão parcial de metatonalitos, de modo semelhante ao proposto por Anderson & Bender (1989) e Patiño-Douce (1997). Este modelo torna-se mais adequado à razão inicial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ quando se considera uma fonte de natureza granulítica, onde se espera um empobrecimento em potássio e rubídio e, por consequência, menores razões iniciais $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. O modelo petrogenético para estes granitóides envolvendo fontes crustais anídras explicaria as altas temperaturas necessárias para a fusão crustal e as altas temperaturas esperadas em magmas graníticos do tipo A, cujas concentrações de Zr são em geral elevadas. Estas temperaturas altas se traduzem, na área do Complexo Granítico Estrela, pela presença de rochas encaixantes submetidas a condições de fácies clinopiroxênio hornfels (Barros *et al.* 2001).

Na região de Carajás, fontes potenciais para as rochas do Complexo Granítico Estrela poderiam ser representadas por granulitos enderbíticos (hiperstênio tonalitos) descritos por Pidgeon *et al.* (2000), os quais apresentam idades de cristalização de 3,0 Ga e de granulitização de 2,85 Ga. Idades-modelo (T_{DM}) de algumas rochas granitóides da região de Rio Maria (Rämo *et al.* 2002), situada mais a sul, têm valores semelhantes aos apresentados neste trabalho. Segundo Macambira & Lafon (1995), a formação de parte da crosta mais antiga na região de Carajás poderia ter ocorrido póstimo a 3,0 Ga. A granulitização de rochas crustais antigas poderia alternativamente ter ocorrido durante a colocação das seqüências vul-

cânicas máficas do Supergrupo Itacaiúnas, pouco tempo antes da colocação do Complexo Granítico Estrela.

De acordo com Sylvester (1989), magmas graníticos do tipo A colocados em ambientes compressivos são preferencialmente derivados de fontes crustais, ao passo que, em ambientes distensivos, fontes mantélicas são mais favoráveis. Neste sentido, a hipótese de uma fonte crustal parece se adequar melhor aos dados isotópicos e ao modelo de colocação sintectônica, concomitante a esforços compressivos que atuaram na Província Mineral de Carajás há 2,76-2,74 Ga.

King *et al.* (1997) mostram que granitos metaluminosos do tipo A presentes no Cinturão Lachlan (Austrália) coexistem com granitos fracionados do tipo I, ambos colocados concomitantemente a esforços regionais. Segundo aqueles autores, a origem dos granitos metaluminosos do tipo A difere daquela dos granitos do tipo-I pelo fato de os primeiros terem sido gerados em condições de menor disponibilidade de H_2O e menor fugacidade de oxigênio durante a fusão parcial que, em consequência, resultaria em magmas mais quentes. Estas diferenças nas condições de geração dos magmas do tipo I e metaluminosos do tipo A traduziram heterogeneidades nas fontes envolvidas. O Complexo Granítico Estrela encontra fortes semelhanças geoquímicas e estruturais com os granitos do tipo A descritos por King *et al.* (1997) e, como sugerido por aqueles autores, a expressão "tipo A" não deveria ser utilizada para denotar a colocação em condições anorogênicas e sim ressaltar a tendência alcalina destas rochas.

Implicações tectônicas Quando da obtenção da idade Rb-Sr em rocha total do Complexo Granítico Estrela, não se tinha um claro entendimento sobre a relação temporal entre a colocação do maciço e a sua deformação. Esta idade foi então interpretada como uma idade mínima, possivelmente relacionada com os processos deformacionais (Barros *et al.* 1992).

Mais tarde, trabalhos detalhados possibilitaram uma visão mais clara sobre a história de colocação do complexo granítico e seus efeitos metamórfico-estruturais sobre suas rochas encaixantes. Naquela ocasião, Barros *et al.* (2001) estabeleceram a natureza sintectônica do Complexo Granítico Estrela com base nos seguintes critérios estruturais, propostos por Gapais (1989), Gower (1993), Miller & Paterson (1994), entre outros: a forma alongada do corpo, concordante com as estruturas de escala regional; a história de deformação progressiva em regime de temperatura decrescente; o paralelismo e transição de tramas magmáticas (estágio não completamente consolidado) para xistosidades formadas no estado sólido; o paralelismo das foliações presentes no granito e nas rochas encaixantes; padrão concêntrico de foliações primárias com deformação mais intensa nas bordas do que no centro do corpo granítico, e que indicam mecanismos de colocação por inchamento; padrão dômico marcado por acamamentos ígneos subverticais em periferia e subhorizontais no centro dos plútons; a presença de porfiroblastos sintectônicos em rochas encaixantes da auréola interna; e, finalmente, a coexistência de veios pegmatóides cogenéticos, sendo que aqueles precoces são muito foliados e dobrados, e aqueles relativamente tardios são pouco deformados.

A área estudada apresenta algumas semelhanças com domínios dos depósitos Salobo e Pojuca, situados a 50 km a oeste do Complexo Granítico Estrela, onde também foram descritos efeitos de contato em rochas metabásicas, provocados pelo Granito Old Salobo, considerado por Lindenmayer *et al.* (1994) como sintectônico. Com este quadro, Barros *et al.* (1997) sugeriram que o Complexo Granítico Estrela e os granitos Old Salobo e do Rio

Itacaiúnas, ambos com 2,55 Ga, fossem cronocorrelatos. Esta correlação é revista a partir dos novos dados geocronológicos Pb-Pb apresentados neste trabalho.

A idade de 2763 ± 7 Ma marca uma fase de deformação compressiva que atuou na história arqueana da Província Mineral de Carajás após o desenvolvimento da Bacia Carajás. Outros granitos cronocorrelatos, como os pertencentes à Suíte Plaquê (Macambira *et al.* 1996), ao Granito Serra do Rabo (Sardinha *et al.* 2001) e ao Granito Planalto (Huhn *et al.* 1999), reforçam a importância deste magmatismo sintectônico como uma considerável fonte termal, responsável por modificações tectono-metamórficas verificadas nas séries metavulcano-sedimentares encaixantes, pertencentes ao Supergrupo Itacaiúnas (Barros *et al.* 2001).

Os efeitos de metamorfismo de contato em rochas metavulcano-sedimentares provocados pelo Complexo Granítico Estrela comprovam que este é mais novo que as rochas supracrustais. Cálculos geobarométricos indicam que o Complexo Granítico Estrela foi colocado a pressões entre 2,5 e 3,5 kbar, ou seja, algo em torno de 10 quilômetros de profundidade (Barros *et al.* 2001). Em conclusão, pode-se dizer que após a instalação e preenchimento da bacia Carajás ocorreu uma fase de limitada compressão horizontal, acompanhada da colocação de granitos sintectônicos de nível crustal raso, os quais teriam promovido uma fase de metamorfismo de alta temperatura e baixa pressão com a formação de auréolas tectonotermiais.

A idade de 2763 ± 7 Ma para este magmatismo granítico sintectônico corrobora a proposta de Pinheiro & Holdsworth (1997), os quais sugerem que, entre 2,8 e 2,7 Ga, a região de Carajás foi submetida a uma fase compressiva. A fase de magmatismo, metamorfismo e deformação parece também se refletir nas idades de 2,7 Ga, obtidas pelo método $^{40}Ar-^{39}Ar$ em anfíbios de granulitos do Complexo Pium (Renne *et al.* 1988).

Os dados isotópicos apresentados neste trabalho, juntamente com idades de outras unidades (Machado *et al.* 1991; Pidgeon *et al.* 2000), permitem dizer que as rochas supracrustais da Bacia Carajás foram depositadas sobre uma crosta de natureza continental. A natureza toleítica dos basaltos, o hidrotermalismo regional destas rochas, indicativo de metamorfismo oceânico, e a presença de formações ferríferas associadas (Barros 1997) poderiam sugerir que a bacia atingiu um estágio de proto-oceano. Uma hipótese seria a deposição das rochas vulcânicas e das formações ferríferas em uma bacia pericontinental. Este ambiente parece explicar o empilhamento estratigráfico com rochas continentais servindo como o embasamento para derrames de basaltos em ambiente submarinho e durante esforços distensivos. O magmatismo granítico sintectônico a esforços compressivos, posterior à instalação da bacia, traduz esforços de encurtamento subhorizontal que poderiam refletir uma fase de subducção e subsequente colisão de fragmentos crustais continentais. Entretanto, evidências inequívocas da presença de um arco magmático e de um episódio de subducção ainda não foram demonstradas na região de Carajás, ou porque a tectônica vertical foi predominante, ou porque este arco magmático se situa lateralmente, em áreas com menos estudos de detalhe.

Agradecimentos Este trabalho foi realizado com recursos do PROINT-UFPA (1998-2000) e do CNPq no âmbito do Programa Norte de Pós-Graduação (nº 40003899), do Edital Universal (476623/01-4). As etapas de preparação das amostras, de coleta, seleção e análise dos cristais de zircão, e a captação de imagens, não teriam sido possíveis sem a imensa orientação da geóloga Cléris R.

Sachett, do Prof. Cândido A. V. Moura e das estagiárias Vanderlucy P. de Melo e Elizety S. Leite. Somos muito gratos aos colegas Marco A. Galarza e Roberta Florencio pela realização das análises

Sm-Nd. Os autores agradecem os valiosos comentários e sugestões feitos pelos revisores. Este artigo é uma contribuição ao PRONEX-CNPq-FADESP (662103/1998-0, nº 420.00/00).

Referências

- Anderson J.L. & Bender B. 1989. Nature and origin of Proterozoic A-type granitic magmatism in the southwestern United States of America. *Lithos*, **23**:19-52.
- Avelar V.O. 1996. *Geocronologia Pb-Pb por evaporação em monocristal de zircão do magmatismo da região de Tucumã, SE do Estado do Pará, Amazônia oriental*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 149p.
- Barros C.E.M. 1997. *Pétrologie et structure du Complexe Granitique Estrela (2.5 Ga) et de son encaissant métavolcano-sédimentaire (Province Métallifère de Carajás, Brésil)*. Tese de Doutorado, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 316 p.
- Barros C.E.M., Barbey P. & Boullier A.M. 2001. Role of magma pressure, tectonic stress and crystallization progress in the emplacement of the syntectonic A-type Estrela Granite Complex (Carajás Mineral Province, Brazil). *Tectonophysics*, **343**:93-109.
- Barros C.E.M., Dall'Agnol R., Barbey P. & Boullier A.M. 1997. Geochemistry of the Estrela Granite Complex, Carajás Region, Brazil: an example of an Archaean A-type granitoid. *J. South-Amer. Earth Sci.*, **10**(3-4):321-330.
- Barros C.E.M., Dall'Agnol R., Lafon J.M., Teixeira N.P. & Ribeiro J.W. 1992. Geologia e geocronologia Rb-Sr do Gnaiss Estrela, Curionópolis, PA. *Bol. Mus. Par. Em. Goeldi, Ciênc. da Terra*, **4**:83-102.
- Bloem E.J.M., Dalstra H.J., Ridley J.R. & Groves D.I. 1991. Granitoid emplacement during protracted tectonism in an Archaean granitoid-greenstone belt, Yilgarn Block, Western Australia. *Precambrian Res.*, **85**:147-171.
- Costa J.B.S., Teixeira N.P., Pinheiro R.V.L. & Bermerguy R.L. 1990. Os sistemas estruturais transcorrentes do Cinturão Itacaiúnas na Região de Curionópolis, Leste do Estado do Pará. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 35, Natal, *Anais*, **5**:2345-2352.
- Dall'Agnol R., Souza Z.S., Althoff F.J., Barros C.E.M., Leite A.A.S. & Jorge João X.S. 1997. General aspects of the granitogenesis of the Carajás Metallogenic Province. In: CBPM, ISGAM, 2, Salvador, *Excursion guide*, 135-142.
- Delor C., Burg J.P. & Clarke G. 1991. Relations Diapirism-Métamorphisme dans la Province du Pilbara (Australia occidentale): implications pour les régimes thermiques à l'Archéen. *Comptes Rendues de l'Académie de Science de Paris*, **312**:257-263.
- DePaolo, D.J. 1981. Nd isotopic studies: Some new perspectives on Earth Structure and Evolution. *EOS*, 137-145.
- Docegeo (Rio Doce Geologia e Mineração). 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: CVRD/SBG, Congr. Bras. Geol., 35, Belém, *Província Mineral de Carajás - Litoestratigrafia e principais depósitos minerais. Anexo aos anais*, pp.: 11-59.
- Gapais D. 1989. Shear structures within deformed granites: mechanical and thermal indicators. *Geology*, **17**:1144-1147.
- Gower C.F. 1993. Syntectonic minor intrusions or synemplacement deformation? *Can. J. Earth Sci.*, **30**:1674-1675.
- Huhn S.B., Macambira M.J.B. & Dall'Agnol R. 1999. Geologia e Geocronologia Pb-Pb do Granito Alcalino Arqueano Planalto, Região da Serra do Rabo, Carajás - PA. In: SBG, Simp. Geol. Amaz., 6, Manaus, *Anais*, **1**:463-466.
- Jelsma H.A., Van der Beek P.R. & Vinyu M.L. 1993. Tectonic evolution of the Bindura-Shamva greenstone belt (northern Zimbabwe): Progressive deformation around diapiric structures. *J. Struct. Geol.*, **15**:163-176.
- King P.L., White A.J.R., Chappel B.W. & Allen C.M. 1997. Characterization and Origin of Aluminous A-type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *J. Petrol.*, **30**(3):371-391.
- Kober B. 1987. Single grain evaporation combined with Pb emitter bedding ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb investigations using thermal ion mass spectrometry and implications to zirconology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **96**:63-71.
- Landenberger B. & Collins W.J. 1996. Derivation of A-type Granites from a Dehydrated Charnockitic Lower Crust: Evidence from a Chaelundi Complex, Eastern Australia. *J. Petrol.*, **37**(1):145-170.
- Lindenmayer Z.G. & Fyfe W.S. 1991. Metamorfismo de alta temperatura e baixa pressão no depósito de cobre do Salobo: evidência de rift continental arqueano no Cráton Amazônico. In: SBG, Simp. Geol. Amaz., 3, Belém, *Anais*, 36-48.
- Lindenmayer Z.G., Fyfe W.S. & Bocalon V.L.S. 1994. Nota Preliminar sobre as Intrusões Granitoides do Depósito de Cobre do Salobo, Carajás. *Acta Geol. Leopold.*, **40**(XVII):153-184.
- Macambira E.M.B., Jorge-João X.S., Souza E.C. 1996. Geologic and petrologic aspects of the Plaquê Granite, Southeastern of Pará State. In: SBG, Symp. Archean Terranes South Amer. Platform, Brasília, *Extended abstracts*, pp. 73-75.
- Macambira M.J.B. & Lafon J.M. 1995. Geocronologia da Província Mineral de Carajás: síntese dos dados e novos desafios. *Bol. Mus. Par. Emilio Goeldi, Ciênc. da Terra*, **7**:263-288.
- Macambira M.J.B., Silva, D.C.C., Scheller T. & Barros C.E.M. 2003. New isotope evidences confirming the existence of a Paleoproterozoic terrain in the region at the north of the Carajás Mineral Province. In: Simp. Sul-Amer. Geol. Isotópica, 4, Salvador, CD-ROM.
- Machado N., Lindenmayer Z., Krogh T.H. & Lindenmayer Z.G. 1991. U-Pb geochronology of Archaean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Res.* **49**:329-354.
- Miller R.B. & Paterson S.R. 1994. The transition from magmatic to high-temperature solid-state deformation implications from the Mount

- Stuart Batholith, Washington. *J. Struct. Geol.*, **16**:853-865.
- Mougeot R., Respaut J.P., Ledru P., Milesi J.P., Macambira M.J.B. & Huhn S.B. 1996. Contrainte géochronologique U-Pb pour l'âge de la formation sédimentaire de Águas Claras (Province de Carajás, Etat de Pará.). In: BRGM, Réunion des Sciences de la Terre, 16, Orléans, 67.
- Nogueira A.C.R., Truckenbrodt W. & Pinheiro R.V.L. 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: redescritção e redefinição litoestratigráfica. *Bol. Mus. Par. Em. Goeldi, Ciênc. da Terra*, **7**:177-277.
- Patiño-Douce, A.E. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, **25**:743-746.
- Pidgeon R.T.; Macambira M.J.B. & Lafon J.M. 2000. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulites facies metamorphism and the protolith of the enderbite. *Chem. Geol.*, **166**:159-171.
- Pinheiro R.V.L. & Holdsworth R.E. 1997. Reactivation of Archaean strike-slip fault systems, Amazon region, Brazil. *J. Geol. Soc. London*, **154**:99-103.
- Rämo T., Dall'Agnol R., Macambira M.J.B., Leite, A.A.S., Oliveira, D.C. 2002. 1.88 Ga Oxidized A-type Granites of the Rio Maria, Eastern Amazonian Craton, Brazil: Positively Anorogenic! *J. Geol.*, **110**:603-611.
- Renne P.R., Onstott T. & Jorge João X.S. 1988. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and paleomagnetic results from the Guaporé Shield: further implications for the nature of Middle-Late Proterozoic mobile belts of Gondwanaland. In: SBG, Congr. Lat.-Amer. Geol., 7, Belém, 1:348-362.
- Sardinha A.S., Barros C.E.M., Krinsky R. & Macambira M.J.B. 2001. Petrografia e Geocronologia U-Pb em zircão do Granito Serra do Rabo, Província Mineral de Carajás, Pará. In: SBG, Simp. Geol. Amaz., 7, Belém, CD-ROM.
- Sato K. & Tassinari C.G.G. 1997. Principais eventos de acreção continental no Cráton Amazônico baseados em idade-modelo Sm-Nd, calculada em evoluções de estágio único e estágio duplo. In M.L. Costa & R.S. Angélica (eds.). *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Belém, FINEP/SBG-NO, 91-142.
- Skjerlie, K.P. & Johnston A.D. 1993. Fluid-Absent Melting Behavior of an F-Rich Tonalitic Gneiss at Mid-Crustal Pressures: Implications for the Generation of Anorogenic Granites. *J. Petrol.*, **34**: 785-815.
- Souza S.R.B., Macambira M.J.B. & Sheller T. 1996. Novos dados geocronológicos para os granitos deformados do Rio Itacaiúnas (Serra dos Carajás, PA); implicações estratigráficas. In: SBG, Simp. Geol. Amaz., 5, Belém, 380-383.
- Sylvester P.J. 1989. Post-collisional alkaline granites. *J. Geol.*, **97**:261-280.
- Stacey J.S. & Kramers J.D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **26**:207-221.
- Turner S.P., Foden J.D. & Morrison R.S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma: An example from the Padthaway Ridge, South Australia. *Lithos*, **28**:151-179.
- Whalen J.B., Currie K.L. & Chappell B.W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **95**:407-419.
- Whalen J.B., Jenner G.A., Longstaffe F., Robert F. & Gariépy C. 1996. Geochemical and Isotopic (O, Nd, Pb and Sr) Constraints on A-type Granite Petrogenesis Based on the Topsails Igneous Suite, Newfoundland Appalachians. *J. Petrol.*, **37**:1463-1489.

Manuscrito A-1434

Recebido em 20 de maio de 2003

Revisão dos autores em 15 de junho de 2004

Revisão aceita em 30 de julho de 2004