CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E GEOQUÍMICA DE ROCHAS ANFIBOLÍTICAS E METAMÁFICAS ASSOCIADAS ÀS FAIXAS METAMÓRFICAS AMPARO E ITAPIRA NA REGIÃO NORDESTE DE SÃO PAULO

MARCOS AURÉLIO FARIAS DE OLIVEIRA¹, ANTENOR ZANARDO¹, ANA PAULA LAZARINI², ALESSANDRO HENRIQUE MEDEIROS SILVA³ & ANTÔNIO JOSÉ RANALLI NARDY¹

Abstract *PETROGRAPHIC AND GEOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF AMPHIBOLITE AND METAMAFIC ROCKS IN THE AMPARO AND ITAPIRA METAMORPHIC BELTS, NORTHEAST SÃO PAULO STATE, BRAZIL* Metamafic and metaultramafic rocks and amphibolite are common throughout the region of occurrence of the Amparo and Itapira metamorphic complexes. A regional study of these rocks is presented for an area between the cities of Socorro and Amparo in the south and Monte Sião and Itapira in the north. Field and petrographic data indicate that these rocks may be classified into four groups, represented by hornblende schist, amphibolite, orthopyroxene amphibolite and metaultramafic units. The last one is interpreted as a cumulate based on petrographic features and olivine and pyroxene contents. Geochemical data show evidences of magmatic derivation, and a tholeiitic sub alkaline composition. Sub alkaline basalt, andesite basalt and picro basalt or picrite can be recognized in the classification diagrams. Some samples show MgO contents between 6,30 and 8,41% and are grouped as low MgO (MBM) and others have MgO contents between 12,31 and 28,81% and are grouped as high MgO (MAM). The sample with 28,81% MgO is the metaultramafic that is considered to be a cumulate, with very high Cr and Ni contents. The rocks of the MAM group present in the diagrams trends of magmatic differentiation that are not confirmed by fractional crystallization tests. Besides the high Ce anomalies may be related to process involving the continental crust in the generation of the protolith from the mantle or during emplacement. Also the spidergrams show that these rocks have been affected by the continental crust related to the mantle source or to the intrusion time. As an example are the anomalies of Sr, K, Rb and Ba. The metamorphic effects are also evident when some discrepant signatures are observed in spidergrams of incompatible elements. Even so, it is still possible to recognize E-MORB type signatures shown by the multi element diagrams for the metamafic and amphibolite, with the ultramafic being more primitive.

Keywords: metamafic-metaultramafic rocks, geochemistry, petrogenesis, Amparo Complex, Itapira Group.

Resumo Ocorrências de rochas metamáficas, metaultramáficas e anfibolitos são comuns em toda a região por onde se distribuem os metamorfitos dos complexos Amparo e Itapira. Estudo regional sobre essas ocorrências é apresentado para uma área compreendida entre as cidades de Socorro e Amparo, ao sul, e entre Monte Sião e Itapira, ao norte. Dados de campo e petrográficos indicam que essas rochas podem ser reunidas em quatro agrupamentos representados por hornblenda xisto, anfibolito, ortopiroxênio anfibolito e metaultramáfica, sendo este último interpretado como cumulado pelas feições texturais e concentração de olivina e ortopiroxênio. Dados geológicos, petrográficos e litogeoquímicos evidenciam uma derivação magmática para as amostras estudadas, com material pretérito de composição subalcalina e toleítica, podendo ser classificadas como basalto subalcalino, andesita basalto e picro basalto ou picrito. Os teores de MgO permitem a subdivisão em dois grupos: baixo magnésio (MBM), com teores de MgO entre 6,30 e 8,41% e alto magnésio (MAM), com teores desse óxido entre 12,31 e 28,81%. A amostra que contém 28,81% de MgO é a metaultramáfica que está sendo interpretada como cumulado e que apresenta altos teores de Cr e Ni. As amostras do agrupamento MAM parecem definir *trends* de diferenciação magmática o que não se confirma em um teste de cristalização fracionada. Além disso, as fortes anomalias de Ce, que elas exibem, podem relacionar-se a processos envolvendo a crosta continental, quer na geração do protólito a partir do manto ou então na fase de intrusão. Também os diagramas multielemento deixam transparecer que em algum momento essas rochas parecem ter sido afetadas pela crosta continental, quer na etapa referente à fonte mantélica quer na etapa de intrusão, sendo exemplos disso as anomalias de Sr, K, Rb e Ba. Os efeitos do metamorfismo também são evidenciados quando se observam padrões de distribuição aleatórios para as amostras do agrupamento MBM em diagramas multielemento. Por fim, a análise desses diagramas revela uma assinatura E-MORB, para a metamáfica e o anfibolito, com características mais primitivas para a metaultramáfica (cumulato).

Palavras-chave: metamáfica-metaultramáfica, geoquímica, petrogênese, complexo Amparo e Grupo Itapira.

INTRODUÇÃO O presente trabalho é parte de um programa de estudos petrográficos, litoquímicos, geotermobarométricos e isotópicos de anfibolitos e metamáficas inseridas em cinturões metamórficos de parte da região sudeste e sul do Brasil, abrangendo desde o sul de Minas Gerais até o norte do Paraná. Pretende-se com este estudo um conhecimento melhor da petrografia, geoquímica e condições de pressão e temperatura do evento metamórfico que afetou essas unidades e, a partir daí, tentar uma

modelagem da sua gênese e conseqüentemente do conjunto ou conjuntos metamórficos encaixantes.

No presente artigo é feito um apanhado geral das ocorrências de anfibolitos e metamáficas na área situada entre as cidades de Socorro e Amparo, a sul e Monte Sião e Itapira, a norte. Realizou-se uma classificação petrográfica e litoquímica dos tipos cadastrados, incluindo ETR, visando, por essa caracterização, definir critérios distintivos que permitam relacioná-los ao embasamento ou à

1 - Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Avenida 24 A, 1515, Caixa Postal 178, CEP 13506-900, Rio Claro, SP, maurelio@rc.unesp.br.

2 - Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Av 24 A, 1515, CEP 13506-900, Rio Claro, SP.

3 - AngloGold, Rua Cássio Magnani, 31, CEP 34000-000, Nova Lima, MG.

seqüência supra crustal, entidades tectono-metamórficas componentes dessa área.

A evolução geológica da região é complexa e onde os anfibolitos e metamáficas ocorrem associados tanto ao embasamento (Complexo Amparo) como à seqüência metavulcanossedimentar do Grupo (Complexo) Itapira. As paragêneses de metamorfismo dessas rochas é variável, com litotipos da fácies anfibolito e outros da fácies granulito. Petrograficamente ocorrem diversos tipos desde praticamente monominerálicos (mais de 95% de anfibólio) até associações complexas, com piroxênio e granada.

CONTEXTO GEOLÓGICO Na área estudada ocorrem associações íntimas de rochas ortoderivadas do embasamento (Complexo Amparo) e da seqüência metavulcanossedimentar (Grupo ou Complexo Itapira), ambas de médio a alto grau metamórfico, a ponto de muitas vezes tornar-se difícil o reconhecimento de sua posição estratigráfica. O fator preponderante nesse caso é uma tectônica que gerou grande concentração de zonas de cisalhamento empinadas, destrais, que colocaram, lado a lado, faixas estreitas e alongadas de rochas do embasamento e da seqüência supracrustal, e que participam de uma estrutura de empurrão descrita por Campos Neto *et al.* (1984) como *Nappe* de Empurrão Socorro-Guaxupé. Os primeiros trabalhos sobre essa área como, dentre outros, os de Wernick (1967), Ebert (1968, 1971) e Wernick & Penalva (1973), não distinguiram essas unidades como hoje caracterizadas. Dados geocronológicos mostram que estas rochas possuem idades que variam do Arqueano ao Neoproterozóico (Wernick 1978, Artur 1980, Wernick *et al.* 1976, Tassinari & Campos Neto 1988, Tassinari *et al.* 2001, Fetter *et al.* 2001). Geotectonicamente a região está contida nos domínios da faixa Alto Rio Grande (Hasui & Oliveira 1984) e da *Nappe* Socorro-Guaxupé (Campos Neto *et al.* 1984, Campos Neto (1985).

As ocorrências de anfibolitos e metamáficas estão intercaladas em nas diversas rochas da área estudada, com formas tabulares a lenticulares, cisalhadas e fragmentadas, com larguras centimétricas a métricas, orientadas e alongadas segundo NNE-SSW. Um perfil de Socorro e Amparo ocorrem os seguintes agrupamentos de rochas: (Fig. 1)

- Íntimas associações de gnaiss mangerítico, charnockítico e enderbítico; granulito básico e piroxênio anfibolito ocorrem intercalados a sul de Socorro. Este agrupamento é limitado à oeste, próximo a Socorro, por uma zona de falha de cavalgamento, parte da *Nappe* Socorro-Guaxupé de Campos Neto *et al.* (1984).

- Gnaisses, migmatitos e granitos sintectônicos com intercalações de biotita hornblenda gnaiss, anfibolito, quartzito, gondito e rocha metaultramáfica. O quartzito se destaca por sustentar serras alongadas segundo NE.

- Paragnaisse arcossiano, grauvaquico, às vezes migmatizado, mica xisto e quartzito, anfibolito e rocha ultramáfica, com intercalações subordinadas de ortognaisse granítico a granodiorítico.

- Gnaiss e migmatito cinzento a róseo, homogêneo a bandado, granítico a granodiorítico, com intercalações de anfibólio gnaiss e rocha ultramáfica.

- Migmatito com estruturas diversas, ortognaisse, metamáfica e metaultramáfica.

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA Nesse contexto procedeu-se à coleta sistemática de amostras de anfibolitos e metamáficas, precedida de revisão das amostragens de projetos anteriores realizados na área. A localização das amostras ora descritas está indicada na figura 1, observando-se que existem tipos

associados ao pacote metassedimentar, aos migmatitos e aos granulitos. O estudo de mais de duas dezenas de lâminas de anfibolitos permitiu agrupá-los nos seguintes tipos:

Hornblenda xisto – HXO - (amostras ALS 10, SOR 13, SOR 14, SOR 15). São rochas foliadas com mais de 80% de anfibólio modal, possuem cores escuras, verde a preto, e texturas nematoblástica ou nematoblástica e granoblástica. O anfibólio é hornblenda, com pleocroísmo fraco a médio de incolor a verde pardo ou verde azulado pálido. Cummingtonita pode ocorrer. Os demais constituintes compreendem labradorita parcialmente saussuritizada e corroída e clinopiroxênio em fenoblastos corroídos e transformados em hornblenda verde. Titanita e opacos são acessórios e epidoto e actinolita secundários. Observam-se por vezes lentes milimétricas, rompidas, concordantes com a foliação, compostas por plagioclásio e clinopiroxênio (gabro) ou apenas quartzo. Lazarini (2000), por meio de química mineral dessas rochas, determinou a presença de actinolita, Mg-hornblenda e Mg-cummingtonita.

Anfibolito – ANF - (amostras ALS-1, ALS-9, AMG-4, AMG-5, SOR-7, SOR-16, SOR-21). É o litotipo mais abundante. São rochas foliadas, com textura nematoblástica a granoblástica, frequentemente afetadas por cataclase. A granulação é dominante fina a média. Hornblenda é o mineral predominante, com pleocroísmo forte de verde pálido a verde pardo e a verde azulado. Os cristais são, por vezes, zonados (manchados), com núcleo esverdeado e borda mais pardas ou azuladas. O plagioclásio é andesina e constitui até 50% dessas rochas. Diopsídio está presente em até 15% e seus cristais estão corroídos, fraturados e parcialmente alterados. Os demais constituintes compreendem quartzo, microclínio, granada, biotita, titanita, epidoto e opacos.

Metaultramáfica – MUM - (amostra ALS-2). Ocorrências de olivina-ortopiroxênio anfibolito, olivina metaortopiroxenito e meta-harzburgito foram registradas próximo à cidade de Lindóia, associadas a quartzito, e na região de Arcadas por Pellogia (1990). A ocorrência de Lindóia, ora estudada, é maciça, fraturada, textura granoblástica inequigranular fina a média. O principal componente é a olivina (até 40%), de até 7 mm de diâmetro e com fraturas preenchidas por serpentina, seguida de bronzita (até 40%) em prismas de até 5 mm de comprimento. Os demais constituintes compreendem hornblenda tremolítica a Mg-hornblenda (15%), com pleocroísmo fraco de incolor a levemente pardo, flogopita, espinélio verde pardo (picotita), todos inferiores a 1 mm. Serpentina, talco e clorita são secundários. A composição mineral e as feições texturais sugerem que essas rochas podem representar cumulos de olivina e piroxênio. Os dados químicos dos minerais foram obtidos em Lazarini (2000).

Ortopiroxênio anfibolito – OPA - (granulito máfico, amostras ALS-6 E ALS-7). Ocorre na porção sul da faixa charnockítica de Socorro (Fig. 1). São rochas de discretamente foliadas, cinza-esverdeado escuro a pretas, e de textura milonítica granoblástica, contendo anfibólio cálcico (pargasita), marron, fortemente pleocróico, em teores modais de 30 e 40%, e plagioclásio (bitownita) às vezes simplectítico, intercrescido com granada ou clinopiroxênio (salita), e proporções entre 25 e 50%. Os demais minerais compreendem bronzita (8-16%), granada (5 a 8%) e clinopiroxênio (4 a 16%). Os dados de química mineral são de Lazarini (2000).

O metamorfismo que afetou essas rochas é de fácies anfibolito alto a granulito. No caso do anfibolito, do hornblenda xisto e da

Figura 1 - Mapa geológico simplificado da região de Itapira, Amparo e Socorro, SP.

metaultramáfica as associações minerais indicam condições de fácies anfibolito. Se considerarmos um protólito rico em piroxênio e plagioclásio, as transformações ocorridas para desenvolver hornblenda nessas rochas implicariam na adição de fluido aquoso. Já no granulito máfico, as transformações metamórficas devem ter ocorrido sob condições de P_{H_2O} limitada para estabilizar o piroxênio. Os intercrescimentos simplectíticos de granada, piroxênio e plagioclásio indicam condições de pressão superiores a 10 kbar (Freitas 2000).

DADOS GEOQUÍMICOS A partir dos estudos petrográficos foram selecionadas amostras para análises químicas no LABOGEO do DPM, IGCE-UNESP de Rio Claro. Um total de 16 exemplares foram analisados, segundo os métodos descritos em Nardy *et al.* (1997), por fluorescência de raios-X para os óxidos de elementos maiores SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 e os elementos traços Cr, Ni, Rb, Sr, Zr, Y, Nb e Ba, estes analisados em pastilhas prensadas sob 30 t/cm². Os ETR foram determinados em oito amostras por espectrometria de ICP-AES, segundo o método descrito em Malagutti *et al.* (1998). Os resultados constam na Tabela 1.

Considerando que as amostras são de rochas submetidas a metamorfismo, e possivelmente metassomatismo, para verificar os efeitos destes processos sobre a sua composição química os resultados foram inseridos no diagrama de Miyashiro (1975) (Fig. 2), que emprega as concentrações de dois elementos móveis (Na e

K). Do diagrama conclui-se que a composição das amostras não foi significativamente afetada por estes processos.

Os diagramas de variação (Figs. 3 e 4) revelam, em exame preliminar, a existência de dois grupos distintos. Um tem concentrações de MgO entre 6,30 e 8,14%, e aqui designado de baixo magnésio (MBM), e outro tem MgO entre 12,31 e 28,81%, denominado de alto magnésio (MAM). O valor de MgO = 28,81% corresponde à amostra ALS 2, metaultramáfica e possível cumulado, e cujos teores de Cr são elevados (> 3000 ppm) e de Ni (> 2000 ppm). Ambos grupos têm características petrográficas distintas, em que as amostras do MBM são representadas por anfibolito e ortopiroxênio anfibolito, e as do MAM por hornblenda xisto e metaultramáfica. As amostras do grupo MAM, com 16,5% de variação máxima de MgO, distribuem-se (Figs. 3 e 4) ao longo de alinhamentos, especialmente com respeito a SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Cr, Ni, Rb e Zr que podem indicar *trends* de diferenciação. O mesmo não ocorre com as amostras do grupo MBM, nas quais há grandes variações de SiO_2 , TiO_2 , FeO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , Ba, Rb, Zr e Nb ao longo de pequeno intervalo de MgO (1,84%).

Os dados geológicos e petrográficos sugerem que os protólitos das amostras estudadas foram magmáticos (Fig. 5), de filiação subalcalina e toleítica (Figs. 6 e 7). Na figura 7, os agrupamentos MAM e MBM distribuem-se no campo dos toleitos, com forte tendência de enriquecimento em Fe, em especial nas amostras do agrupamento MBM. Observe-se que, embora haja uma diferença significativa na concentração de MgO entre os dois grupos, am-

Tabela 1 - Concentrações de elementos maiores, menores, traços e terras raras de rochas anfibolíticas e metamáficas estudadas.

	ALS 1	ALS 2	ALS 6	ALS 7	ALS 9	ALS 10	SOR 7	SOR 13a	SOR 13b	SOR 13d	SOR 14	SOR 15	SOR 16	SOR 21	AMG 5	AMG 4
Rocha	ANF	MUM	OPA	OPA	ANF	HXO	ANF	HXO	HXO	HXO	HXO	HXO	ANF	ANF	ANF	ANF
SiO ₂	54,90	45,20	42,98	47,23	48,29	50,38	48,01	51,20	54,25	48,98	50,60	48,63	55,53	50,17	47,69	50,36
TiO ₂	0,63	0,16	1,54	2,07	1,31	0,64	1,38	0,62	0,78	0,81	0,83	0,70	0,62	0,93	1,56	0,85
Al ₂ O ₃	14,87	5,18	15,35	13,56	14,64	4,61	15,11	5,19	7,93	6,53	6,41	5,75	12,38	15,36	14,28	15,76
FeO	9,11	8,65	12,49	16,85	15,97	13,24	12,20	12,43	11,22	14,11	13,08	13,75	10,28	12,07	16,43	10,80
MnO	0,17	0,11	0,15	0,28	0,22	0,20	0,21	0,19	0,18	0,20	0,18	0,22	0,18	0,19	0,21	0,16
MgO	7,01	28,81	6,83	6,85	7,37	16,74	8,14	16,16	12,31	17,82	14,57	18,69	7,96	7,38	6,30	7,32
CaO	10,90	4,62	16,27	10,85	10,35	10,18	12,73	11,86	11,52	9,36	11,44	9,51	9,38	12,49	9,34	9,72
Na ₂ O	1,51	0,23	1,32	1,48	1,00	0,69	1,62	0,38	1,98	0,58	0,63	0,81	2,61	1,44	0,91	2,61
K ₂ O	0,13	0,05	0,43	0,25	0,19	0,07	0,35	0,07	0,17	0,10	0,20	0,11	0,89	0,15	1,27	1,13
P ₂ O ₅	0,07	0,01	0,24	0,30	0,12	0,14	0,11	0,06	0,07	0,11	0,07	0,07	0,06	0,08	0,16	0,09
LOI	1,27	6,06	2,10	1,04	0,87	2,90	1,02	1,03	0,60	0,97	1,75	0,94	0,93	0,47	1,12	1,26
SOMA	100,57	99,29	99,70	100,76	100,33	99,79	100,88	99,19	101,01	99,57	99,76	99,18	100,82	101,27	99,27	100,06
Cr	169	3494	155	72	200	2003	330	1554	799	1674	1384	1512	730	417	221	229
Ni	124	2647	108	123	121	1247	100	470	235	925	422	924	224	177	149	141
Rb	4	3	14	7	6	9	10	1	2	23	5	1	18	8	60	46
Sr	73	19	1394	85	85	83	150	44	84	37	53	78	122	215	145	232
Ba	2	18	212	65	59	33	19	17	18	-	7	16	58	18	252	435
Nb	6	5	5	16	8	7	7	3	4	13	6	5	4	4	9	6
Zr	37	8	91	143	54	57	84	41	46	59	64	38	35	50	83	69
Y	16	8	19	34	170	193	22	19	19	33	21	17	28	19	23	25
La	-	1,40	11,24	15,60	-	87,60	-	4,80	-	26,50	-	-	-	2,93	4,05	-
Ce	-	1,24	26,38	38,29	-	27,30	-	7,62	-	15,10	-	-	-	7,49	10,53	-
Nd	-	0,89	19,06	20,30	-	147,00	-	7,55	-	28,00	-	-	-	6,02	8,34	-
Sm	-	0,27	4,48	5,10	-	39,40	-	2,48	-	7,04	-	-	-	2,13	2,13	-
Eu	-	0,37	1,38	1,46	-	9,78	-	0,84	-	1,96	-	-	-	0,87	1,15	-
Gd	-	0,50	3,82	5,33	-	28,20	-	2,57	-	6,42	-	-	-	2,58	3,44	-
Dy	-	0,62	2,91	5,03	-	22,50	-	2,34	-	4,78	-	-	-	2,59	3,48	-
Er	-	0,56	1,61	3,33	-	11,60	-	1,53	-	2,78	-	-	-	1,89	2,52	-
Yb	-	0,57	1,29	2,94	-	10,10	-	1,31	-	2,22	-	-	-	1,71	2,30	-
Lu	-	0,10	0,18	0,46	-	1,33	-	0,20	-	0,31	-	-	-	0,26	0,40	-

bos apresentam um mesmo intervalo de variação de SiO₂, (MBM = 42,98 a 55,53%; MAM = 45,20 a 54,25%) (Fig. 6). A maioria das amostras de ambos grupos se distribui preferencialmente no campo do basalto, subordinadamente do andesito basáltico, e a amostra ALS-6 (MBM) corresponde a picro-basalto.

Na figura 8, as amostras do grupo MAM se classificam como basalto subalcalino (2524 ≤ R1 ≤ 2896; 1999 ≤ R2 ≤ 2172) e as do grupo MBM se distribuem no mesmo campo (1841 ≤ R1 ≤ 2434; 2004 ≤ R2 ≤ 2062), mas com representantes no campo do andesito-basalto (2040 ≤ R1 ≤ 2819; 1592 ≤ R2 ≤ 1805). A exemplo do que ocorre no diagrama da figura 6, a amostra ALS-6 situa-se no campo do picrito (R1 = 1906; R2 = 2381).

O diagrama de Jensen (1976) (Fig. 9) permite detalhar melhor ambos grupos, onde as amostras do grupo MAM situam-se preferencialmente no campo do basalto komatiítico, subordinadamente no do komatiito peridotítico. As amostras do grupo MBM distribuem-se nos campos dos Mg-toleito (anfibolito) e do Fe-toleito (piroxênio anfibolito-granulito máfico).

A composição normativa (CIPW) do anfibolito e da metamáfica analisados revela que a maioria das amostras contém proporções variadas de olivina e apenas duas contém quartzo e uma, nefelina (amostra ALS-6). Ao plotar esses valores no tetraedro dos basaltos de Yoder & Tilley (1962) (Fig. 10), estas correspondem a olivina toleito (Fig. 10).

Com relação aos ETR, as oito amostras analisadas foram normalizadas aos valores do condrito C1 (Evensen *et al.* 1978) (Fig. 11). As amostras do grupo MAM, representadas por olivina-ortopiroxênio anfibolito (ALS-2) e hornblenda xisto (ALS-10, SOR-13a e SOR-13d), apresentam em comum apenas as fortes anomalias negativas de Ce, com valores de Ce/Ce*_N variáveis entre 0,13 (ALS-10) e 0,67 (SOR-13a). O hornblenda xisto é mais rico em ETR

total (ALS-10 = 1545,61; SOR-13a = 124,90; SOR-13d = 363,24) e fracionamento de ETR maior (La/Lu_N - ALS-10 = 6,84, SOR-13a = 2,49; SOR-13d = 8,87;) do que o olivina ortopiroxênio anfibolito, com valores de ETR total de 33,33 e La/Lu_N = 1,45. Adicionalmente, a metaultramáfica (ALS 2) tem forte anomalia positiva de Eu (Eu/Eu*_N = 3,04) comparativamente ao hornblenda xisto (Eu/Eu*_N = 0,86 a 1,01) e é mais pobre em terras raras intermediárias em relação às pesadas (Gd/Lu_N = 0,62), em contraste com as amostras de hornblenda xisto, nas quais Gd/Lu_N varia de 1,60 (SOR-13a) a 2,64 (ALS-10).

Por outro lado, no grupo MBM, o comportamento dos ETR nas amostras de anfibolito (SOR-21 e MAG-5) é distinto das amostras de ortopiroxênio anfibolito (ALS-6 e ALS-7). As primeiras são muito mais ricas em ETR_{total} (ALS-6 = 235,16 e ALS-7 = 326,80) do que as últimas (AMG-5 = 159,72 e SOR-21 = 120,06) e estas, por suas vez, são mais ricas em ETRL do que ETRP [La/Lu_N = 6,48 (ALS-6) a 3,52 (ALS-7)] comparativamente ao anfibolito [La/Lu_N = 1,05 (AMG-5) e 1,17 (SOR-21)]. Ressalte-se que também há diferenças significativas no comportamento dos ETR entre as amostras destes dois tipos petrográficos nos valores de La/Sm_N (ALS-6 = 1,58; ALS-7 = 1,93 e AMG-5 = 1,20; SOR-21 = 0,87), Gd/Lu_N (ALS-6 = 2,64; ALS-7 = 1,44 e AMG-5 = 1,07; SOR-21 = 1,23) e Eu/Eu* (ALS-6 = 1,00; ALS-7 = 0,85 e AMG-5 = 1,29; SOR-21 = 1,13).

CONSIDERAÇÕES FINAIS A análise dos dados geológicos, petrográficos e geoquímicos obtidos a partir do estudo de um conjunto de amostras de anfibolitos e metaultramáficas coletadas na região entre as cidades paulistas de Socorro e Amparo, ao sul, e Itapira e Monte Sião, ao norte, permitiu caracterizar pelo menos quatro tipos petrográficos principais que se agrupam em litotipos com alto magnésio - MAM (olivina ortopiroxenito e anfibólio xisto)

e baixo magnésio – MBM (ortopiroxênio anfibolito e anfibolito). As amostras do grupo MAM parecem definir *trends* de diferenciação magmática nos diagramas de variação, o que é reforçado pelos respectivos padrões de ETR, compatíveis com fracionamento magmático a partir de protólitos ígneos subalcalinos e toleíticos. Para testar esta hipótese, admitiu-se que a amostra ALS-10 poderia derivar da SOR-13A por cristalização fracionada envolvendo minerais máficos, no caso a hornblenda. Sendo assim, os ETR têm comportamento de elementos incompatíveis em relação a esse mineral, com valores dos coeficientes de distribui-

Figura 2 - Diagrama $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs. $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ segundo Miyashiro (1975), para discriminar rochas que passaram por alteração pós magmática. Círculos: $\text{MgO} > 10\%$; quadrados: $\text{MgO} < 10\%$; estrela: amostra ALS 2 (cumulato).

ção (K_d) variável de aproximadamente 0,2 (para o La) a 0,64 (para o Dy) (Green & Pearson 1985). Se considerarmos cristalização fracionada em desequilíbrio modal, para obter o enriquecimento destes elementos como observado na amostra ALS-10 em relação à SOR-13 (ex. $\text{La} = 5$, $\text{Ce} = 8$, $\text{Nd} = 8$, $\text{Gd} = 3$, etc) (Tabela 1)s, seria necessária a cristalização de 95 a 98% deste mineral para que a composição do líquido residual se aproximasse da amostra ALS-10, o que seria pouco provável. Além disso, as fortes anomalias negativas de Ce ($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 0,13$ a $0,67$) nas rochas deste grupo, parecem envolver a crosta continental, seja na fase de geração do magma a partir do manto ou na de intrusão, como proposto em casos semelhantes por Heming & Rankin (1979), Othman *et al.* (1989), Meen (1990) e Guy *et al.* (1999). Este aspecto parece também estar impressos nos diagramas multielemento, normalizados aos valores de N-MORB propostos por Sun & McDonough (1989) (Figs. 12 e 13). Nestes diagramas, a título de comparação, está em destaque o padrão de distribuição da crosta continental superior e inferior (CCS e CCI), onde se observa, pelas assinaturas, que os magmas das rochas estudadas, em algum momento, parecem ter sido afetados, em diferentes intensidades, pela crosta continental, quer durante a evolução da fonte mantélica do protólito (assimilação crustal durante a subducção) ou durante a intrusão (contaminação crustal), especialmente no que tange ao comportamento de Sr, K, Rb e Ba.

Entretanto, nos mesmos diagramas, as amostras de metamáficas apresentam padrões bastante aleatórios, o que pode indicar alterações da composição das mesmas durante o metamorfismo

Figura 3 - Diagramas de variação química dos principais óxidos das rochas estudadas. Símbolos como na Figura 2

Figura 4 - Diagramas de variação para elementos traço das rochas estudadas. Símbolos como na Figura 2.

Figura 5 - Diagramas para a caracterização química da origem dos protólitos das rochas estudadas, segundo Leake (1964). Símbolos como na Figura 2. Os numerais 1, 2 e 3 correspondem respectivamente aos estágios da diferenciação iniciais ou cumulatos, intermediários e finais, dos doleritos do Karroo.

Figura 6 - Diagrama sílica vs. álcalis, mostrando classificação e nomenclatura das rochas estudadas (Irvine & Baragar 1971; Le Bas et al. 1986). Símbolos como na Figura 2.

Figura 7 - Diagrama AFM para as rochas estudadas segundo Irvine & Baragar (1971). Símbolos como na Figura 2.

(metassomatismo), o que também parece ser evidenciado pelo padrão da amostra ALS-6 (grupo MBM), com filiação picrítica, embora não apresente evidências petrográficas para tanto.

Apesar destas constatações, nas figuras 13 e 14, onde também estão representados os padrões de basalto de ilhas oceânicas (BIO), basalto enriquecido de cadeia meio oceânica (E-MORB) e

Figura 8 - Distribuição das rochas metamáficas e anfibolito no diagrama R1 vs. R2 de De La Rocha et al. (1980). Símbolos como na Figura 2.

Figura 9 - Diagrama Al_2O_3 vs. FeO vs. MgO de Jensen (1976) para as rochas estudadas. Símbolos como na Figura 2.

Figura 10 - Tetraedro de classificação dos basaltos segundo Yoder & Tilley (1962), usando minerais normativos CIPW, com a maioria das amostras analisadas correspondendo a olivina toleitos. Símbolos como na Figura 2.

da crosta continental superior e inferior (Weaver & Tarney 1984), observa-se que as rochas estudadas têm uma tendência geral comparável com E-MORB, exceto ALS-2, metaultramáfica e possível cumulo, cuja tendência situa-se abaixo do conjunto principal.

Figura 11 - Padrões de abundância dos elementos terras raras normalizados pelo condrito segundo Evensen (1978), para as amostras estudadas. Símbolos como na Figura 2

Figura 12 - Padrões de distribuição de elementos incompatíveis normalizados pelo manto primitivo de Sun & McDonough (1989), para amostras de hornblenda xisto e metaultramáfica do grupo alto MgO (MAM). No destaque, a área sombreada equivale ao intervalo de variação para estas rochas e, para comparação, encontram-se os padrões de distribuição para rochas de diferentes ambientes geotectônicos: CCS – crosta continental superior; CCI – crosta continental inferior; BIO – basalto de ilha oceânica.

Figura 13 - Padrões de distribuição de elementos incompatíveis normalizados pelo manto primitivo de Sun & McDonough (1989), para amostras de anfibolito e granulito máfico do grupo baixo MgO (MBM). No destaque, a área sombreada equivale ao intervalo de variação para estas rochas e para comparação, encontram-se os padrões de distribuição para rochas de diferentes ambientes geotectônicos, conforme indicado na Figura 12.

Quanto à gênese dessas rochas, pouco se pode adiantar. É apenas evidente uma afinidade com associações do tipo E-MORB. Uma hipótese de origem komatítica foi aventada por Peloggia (1990) para a metamáfica e metaultramáfica (hornblenda xisto) da região de Arcadas, situada a sudoeste de Amparo. Apesar da proximidade e semelhança do material estudado pelo autor, não há, na área ora estudada, evidências que confirmem essa origem. Por outro lado, Zanardo (1987) levanta a possibilidade de que parte desse material possa representar fragmentos de crosta oceânica (restos de ofiolito), ligados à colisão responsável pelo pacote vulcanossedimentar do Grupo Itapira, com base na presença das metaultramáficas com anomalias negativas de Ce e elevados teores de Cr e Ni. Essa hipótese, no entanto, não se sustenta nas evidências de participação da crosta continental, seja na origem ou na evolução destas rochas.

O presente estudo mostra que etapas futuras devem incluir o detalhamento de cada grupo aqui definido, com caracterização geoquímica, isotópica e de química mineral das ocorrências mais importantes, com vistas à datação e evolução petrológica, para melhor situá-los no contexto dos Complexos Amparo e Itapira.

Agradecimentos À FAPESP, pelo suporte financeiro e bolsas de iniciação científica s(Processos 90/3948-1; 95/1051-8; 96/00881-0) e aos revisores da RBG pelas sugestões ao manuscrito.

Referências

- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sci. Rev.*, **17**:1-29.
Artur A.C. 1980. *Rochas metamórficas dos arredores de Itapira, Sp.* Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências,

Universidade de São Paulo, 193 p.

- Artur A.C. 1988. *Evolução policíclica da infra-estrutura da porção sul do estado de Minas Gerais e áreas adjacentes do estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 231 p.
- Campos Neto M.C., Basei M.A.S., Alves F.R., Vasconcelos A.C.B. 1984. A nappe de cavalgamento Socorro (SP-MG). In: SBG, Congr. Bras. Geol., 33, Rio de Janeiro, *Anais*, 4:1809-1822
- Campos Neto M.C. 1985. Evolução do pré-cambriano paulista e regiões adjacentes. In: SBG, Simp. Reg. Geol., 4, São Paulo, *Atas*, p. 79-80
- De La Roche H., Leterrier J., Grandclaude P., Marchal M. 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1-R2 diagram and major element analyses. Its relationship with current nomenclature. *Chem. Geol.*, **29**:183-210.
- Ebert H. 1968. Ocorrência da facies granulítica no sul de Minas Gerais e áreas adjacentes, em dependência da estrutura orogênica: hipótese sobre a sua origem. *An. Acad. Bras. Ciec.*, **40**:215-229.
- Ebert H. 1971. *Os Paraíbaes entre São João Del Rei, Minas Gerais e Itapira, São Paulo, e a bifurcação entre Paraíbaes e Araxáides*. São Paulo. SBG, Boletim Especial, 1:177-178.
- Evensen N.M., Hamilton P.J., O'niions R.K. 1978. Rare earth abundances in chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**: 1199-1212.
- Freitas F.C. 2000. *Geotermobarometria e evolução metamórfica das rochas granulíticas da região de Socorro, SP*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, USP, 175 p.
- Green T.H. & Pearson N.J. 1985. Experimental determination of REE partition coefficients between amphibole and basaltic liquids at high pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**:1465-1468.
- Guy C., Daux V., Schott J. 1999. Behavior of rare earth elements during sea water/basalt interactions in the Mururoa Massif. *Chem. Geol.*, **158**:21-35.
- Hanson G.N. 1980. Rare earth elements in petrogenetic studies of igneous systems. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **8**:371-406.
- Hasui Y. & Oliveira M.A.F. 1984. Província Mantiqueira – Setor Central. In F.F.M. Almeida & Y. Hasui (Coord.) *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo, Edgard Blucher, pp.: 308-339.
- Irvine T.N. & Baragar W.R.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Can. Jour. Earth Sci.*, **8**:523-548.
- Jensen L.S. 1976. *A new cation plot for classifying subalkaline volcanic rocks*. Ontario Division of Mines, Misc., Paper 66, 22 p.
- Heming R.F. & Rankin P.C. 1979. Ce-anomalous lavas from Rabaul Caldera, Papua New Guinea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **43**:1351-1355.
- Lazarini A.P. 2000. *Petrologia de metabasitos/ultrabasitos da região de Águas de Lindóia*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 134 p.
- Le Bas M.J., Le Maitre R.W. Strekeisen A., Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Jorn. Petrol.*, **27**: 745-750.
- Leake B.E. 1964. The chemical distinction between ortho and para amphibolites. *Jour. Petrol.*, **5**: 238-254.
- Ludden J.N. & Thompson G. 1978. Behavior of rare earth elements during submarine weathering of tholeiitic basalt. *Nature*, **274**:147-149.
- Meen J.K. 1990. Negative Ce anomalies in Archean amphibolites and Laramide granitoids southwestern Montana, U.S.A. *Chem. Geol.*, **81**:191-207.
- Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics and origin of ophiolites. *Jour. Geol.*, **83**:249-281.
- Othman D.B., White W.M., Patchett J. 1989. The geochemistry of marine sediments, island arc genesis and crust-mantle recycling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **94**:1-21.
- Pearce J.A. 1983. Role of sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In C. J. Hawkesworth and M. J. Norry (ed.) *Continental basalts and mantle xenoliths*. Shiva, Nantwich, 230-249.
- Peloggia A.U.G. 1990. *A Faixa Alto Rio Grande na região de Amparo (SP)*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 124 p.
- Sun S.S. 1980. Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and islands arcs. *Phil. Trans. R. Soc. London*, **A297**:409-445.
- Sun S.S. & McDonough W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts for mantle composition and process. In: A.D. Saunderson, & M.J. Norry (ed.) *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society, Special Publication, **42**:313-345.
- Tassinari C.C.G. & Campos Neto M.C. 1988. Precambrian continental crust evolution of Southeastern São Paulo State, Brazil, based on isotopic evidences. *Geochim. Brasiliensis*, **2**:175-183.
- Weaver B. L. & Tarney J. 1984. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust. *Nature*, **310**:575-577.
- Wernick E. 1967. *A geologia da região de Amparo, leste do estado de São Paulo*. Tese de Doutorado, Fac. Fil. Ci. Let., Rio Claro, SP, 107 p.
- Wernick E. 1978. Contribuição à estratigrafia do Pré-cambriano do leste do estado de São Paulo e áreas vizinhas. *Rev. Bras. Geoc.*, **8**:206-216.
- Wernick E. & Penalva F. 1973. As relações entre os grupos Amparo e Itapira (SP). In: SBG, Congr. Bras. Geol., 27, Aracaju, *Boletim Especial*, **1**:116-117
- Wernick E. & Artur A. C. 1983. Evolução policíclica dos terrenos Arqueanos no leste do estado de São Paulo e sul de Minas Gerais. In: SBG/Núcleo Minas Gerais, Simpósio de Geologia de Minas Gerais 2, Belo Horizonte, *Atas*, 50-61
- Wernick E., Oliveira M.A.F., Kawashita K., Cordani U.G., Delhal, J. 1976. Estudo geocronológico pelo método Rb/Sr em rochas do bloco Jundiá e regiões adjacentes. *Rev. Bras. Geoc.*, **6**:125-135.
- Winchester J.A., Park R.G., Holland J.G. 1982. The geochemistry of Lewisian semipelitic schists from the Gairloch District, Western Ross. *Scott. Jour. Geol.*, **16**:165-179.
- Yoder H.S. & Tilley C.E. 1962 Origin of basalts magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems. *Jour. Petrol.*, **3**:342-532.
- Zanardo A. 1987. *Análise petrológica e microestrutural das rochas da folha Águas de Lindóia, São Paulo*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 270 p.

Manuscrito A-1437

Recebido em 30 de maio de 2003

Revisão dos autores em 25 de abril de 2004

Revisão aceita em 20 de maio de 2004