

## GEOQUÍMICA E PETROLOGIA DO ENXAME DE DIQUES MÁFICOS DA SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL, MG, BRASIL

V. A. V. Girardi<sup>1</sup>, M. Mazzucchelli<sup>2</sup>, G. Rivalenti<sup>2</sup>, A. B. Menezes Leal<sup>3</sup>, B. B. Brito Neves<sup>1</sup> & W. Teixeira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geociências, Universidade de S. Paulo, S. Paulo, BRASIL, girardi@usp.br, bbleybn@usp.br, wteixeir@usp.br

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli studi di Modena e Regio Emilia, ITÁLIA, riva@unimo.it, mazzuc@unimo.it

<sup>3</sup>Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BRASIL, angelab@ufba.br

### ABSTRACT

Four groups of mafic dykes occur in the Diamantina region (Minas Gerais State, Brazil). They are tholeiitic basalts intrusive in the Espinhaço Supergroup and underlying crystalline basement. The dykes have been distinguished on the basis of petrographic and geochemical characteristics. Group 1 is constituted by metabasites that only exceptionally preserved igneous relics. Groups 2 and 3 were metabasites containing relict igneous textures. A single igneous body formed Group 4. Only LILE was substantially affected by metamorphic element mobility. The various groups differed on trace element composition and ratios, and on their REE patterns. Geochemical evidence ruled out any important influence of crustal contamination, fractional crystallization or variable degrees of melting of a common source in order to explain geochemical variations. The inference was that inter-group variability reflected differences of their mantle sources. These were attributed to variable metassomatic enrichment of a depleted mantle by a component with OIB characteristics.

### RESUMO

Quatro grupos de diques máficos ocorrem na região de Diamantina (Minas Gerais, Brasil). Trata-se de basaltos toleíticos intrusivos no Super grupo Espinhaço e embasamento cristalino subjacente. Os diversos grupos são caracterizados com base em características petrográficas e geoquímicas diversas. O grupo 1 é constituído por metabasitos que excepcionalmente preservam remanescentes ígneos. Os grupos 2 e 3 contêm texturas ígneas reliquias. O grupo 4 é formado por um único corpo de textura ígnea. O metamorfismo afetou somente os elementos tipo LILE. Os vários grupos diferem em razão de seu conteúdo em elementos traços, das razões entre eles e dos padrões de terras raras. As evidências geoquímicas afastam a possibilidade de influências importantes de contaminação crustal, cristalização fracionada ou graus variáveis de fusão de fonte mantélica comum para explicar a formação dos quatro grupos. Infere-se que a variação geoquímica dos grupos reflete diferenças nas fontes mantélicas, que são atribuídas a enriquecimentos metassomáticos variáveis, por componente com características OIB, afetando manto empobrecido.

### INTRODUÇÃO

A região de Diamantina, Minas Gerais situa-se na borda este do craton de São Francisco. O enxame de diques preenche fraturas orientadas segundo NS, EW e NE, e é intrusivo no Supergrupo Espinhaço e no seu embasamento cristalino, cuja idade é transamazônica (2,0-2,15 Ga). O Supergrupo Espinhaço é um rift continental abortado desenvolvido principalmente durante o Período Ectasiano (1,4-1,2 Ga) (ALMEIDA *et al.*, 2000). Trata-se de uma sequência metassedimentar de origem continental ou marinha rasa, contendo também extrusivas ácidas e suites graníticas. Sua extensão presente (1000 x 400 km) foi pelo menos o dobro antes da deformação (MACHADO *et al.*, 1989; CORDANI *et al.*, 1992; BABINSKI, 1994). Essa megasequência pertenceu ao Supercontinente Rodínia no fim do Mesoproterozóico (HOFFMAN, 1991), e seus remanescentes são encontrados no Brasil e na África (TEIXEIRA *et al.*, 1999). Vários enxames de diques formaram-se face ao regime extensivo sofrido pelo Rodínia entre o Meso e o Neoproterozóico (PORADA, 1989; BRITO NEVES *et al.*, 1995), como sugerido por idades U/Pb e <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar confiáveis obtidas em enxames na parte este do craton de São Francisco, a saber: Salvador (1003-926 Ma), Olivença –Itaju da Colonia (1078-1035 Ma), Ilheus (1012 Ma.), e na região de Pedro Lessa, no Espinhaço, a sul de Diamantina, onde se determinou a idade de 906 Ma. (MACHADO *et al.*, 1989; RENEE *et al.*, 1990; HEAMAN, 1991; DOSSIN *et al.*, 1995; ALMEIDA ABREU, 1995).

Os diques do grupo 1 são formados por metabasitos de granulação fina, por vezes foliados, nos quais só excepcionalmente a textura ígnea é preservada. Normalmente são actinolita-clorita xistos e anfíbolitos, onde além de anfíbólios ocorrem epidoto, quartzo,

plagioclásio sódico e opacos. Tais diques são os únicos que cortam as unidades inferiores do Supergrupo Espinhaço (MENEZES LEAL *et al.*, 1999), o que poderia sugerir serem estes corpos mais velhos que os demais, hipótese reforçada por terem sofrido metamorfismo mais intenso. Os diques dos grupos 2 e 3 são também metabasitos. A textura predominante, porém, é ofítica. Os minerais ígneos primários estão em parte preservados, e parcialmente transformados na assembléia metamórfica descrita no grupo 1. O grupo 4 é representado por um único corpo, cuja textura, de natureza ígnea, é predominantemente porfírica; com cristais de clinopiroxênio incluindo plagioclásio. Somente as bordas do clinopiroxênio mostram transformação em anfíbólio. Quartzo e epidoto são acessórios. Como ver-se-á adiante, tais rochas são também geoquimicamente muito diversas das dos demais grupos, podendo representar localmente magmatismo muito mais jovem, talvez mesozóico.

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com a finalidade de se avaliar a mobilidade dos elementos durante o processo metamórfico, foram elaborados diagramas MPR, propostos por BESWICK (1982). Com exceção dos LILE, os outros elementos não mostraram sinais de mobilidade, fato consistente com a premissa de que o metamorfismo é aberto para a circulação de água e os elementos LILE possuem os mais altos graus de mobilidade em fluidos hidratados. Assim, assumiu-se que a variação química é consistente com os processos ígneos que atuaram na formação desses corpos.

O enxame de diques de Diamantina é constituído de basaltos de afinidade toleítica, de acordo com a classificação de rochas vulcânicas do IUGS. A distinção entre os grupos pode ser bem percebida quando se correlaciona Zr com os elementos REE e HFSE. Nos diques do grupo 1, Zr varia de 80 a 150 ppm, e se correlaciona com todos os incompatíveis exceto LILE, e Sr que varia de 300 a 500 ppm. Com relação ao grupo 2, as rochas do grupo 1 tem concentrações mais elevadas de Nb, Ce, Sr, e teores pouco menores de Ti, P e Y. As rochas do grupo 2 mostram intervalo de variação maior do Zr (100 a 220 ppm). O grupo 3 tende a se alinhar paralelamente ao grupo 2 nesses diagramas, havendo parcial recobrimento; porém atinge concentrações mais elevadas na grande maioria dos elementos incompatíveis. O grupo 4 possui as concentrações mais elevadas de incompatíveis, e se destaca claramente dos demais grupos. Os quatro grupos diferem também no comportamento das terras raras, cujos diagramas mostram curvas menos inclinadas do grupo 1 para o grupo 3, onde  $(La/Yb)_n = 6.2$ ; 5,1 e 4,8 respectivamente. O grupo 4 mostra padrão bem mais acentuado  $(La/Yb)_n = 10.7$ . Razões entre elementos incompatíveis caracterizam também as diferenças entre os vários grupos.

Os diagramas relacionando  $Mg\#$  ( $MgO/(MgO+FeO_{tot})$ ) com elementos maiores e menores mostram algumas diferenças entre os grupos. No intervalo entre 0.68 e 0.60 as rochas do grupo 1 sofrem forte influência de cristalização fracionada de olivina, observação sustentada por cálculos de balanço de massa. Nos estágios mais avançados plagioclásio e clinopiroxênio tornam-se as fases controladoras predominantes. Nos grupos 2 e 3 estas duas fases minerais controlam a cristalização fracionada dos diques em todo o intervalo de  $Mg\#$  observado.

Análises isotópicas Rb/Sr e Sm/Nd foram efetuadas em treze amostras. Através do método Rb/Sr não foi possível obter-se indicação de idade, face à mobilidade metamórfica do Rb, e talvez do Sr. As determinações Sm/Nd indicaram a presença de duas curvas, sendo a mais inclinada formada por rochas do grupo 1 e por outras duas amostras, sendo uma do grupo 2 e outra do grupo 3. A curva menos inclinada, é constituída por amostras do grupo 2 e 3. Face à pequena variação isotópica não foi possível calcular-se idade confiável, porém o comportamento das curvas poderia sugerir diferenças na idade de formação dos grupos. Foram também calculadas idades modelo, utilizando-se como referência a curva evolutiva do CHUR (modelo condritico), e a curva evolutiva do manto empobrecido. As idades obtidas foram 1131-1258 Ma e 832-1064 Ma, para o modelo CHUR, e 1646-1862 e 1391-1779 Ma para o modelo de manto empobrecido. Tendo-se em vista as determinações geocronológicas disponíveis, já citadas, para os enxames de diques da porção sul do craton de São Francisco valores  $\epsilon Nd$  foram recalculados para o intervalo 900-1100 Ma. A 900 Ma a grande maioria das amostras situa-se próxima ao CHUR, sendo as três mais distantes tem  $\epsilon Nd$  próximo a -2. A 1100 Ma estas de

valor negativo movem-se próximas ao CHUR, enquanto que as demais assumem valores positivos de até +2.

No intuito de se tentar explicar a origem dos diferentes grupos de diques foram examinadas as hipóteses envolvendo contaminação crustal, cristalização fracionada, graus variáveis de fusão a partir do mesmo manto e heterogeneidade mantélica. A contaminação crustal normalmente envolve aumento de elementos LILE, assim como empobrecimento de Ti e Nb. No caso presente a mobilidade metamórfica dos elementos LILE impede indicações mais precisas, observando-se porém que os baixos conteúdos de Rb e  $K_2O$ , principalmente nas rochas do grupo 1 não sugerem interações crustais relevantes. Acresce o fato de que anomalias de Ti e Nb, típicas de rochas crustais estão ausentes em todos os grupos, exceto no 4, onde são muito fracas. As razões  $^{87}Sr/^{86}Sr$  são altas, ( $>0,704$ ), porém face à mobilidade metamórfica do Rb e provavelmente do Sr, o uso dos isótopos de Sr é discutível. Conclui-se, portanto, que não há evidências claras de contaminação crustal.

Utilizando-se cálculos de balanço de massa testou-se a possibilidade dos vários conjuntos de diques se formarem através de cristalização fracionada. Os cálculos mostraram-se inconsistentes, abandonando-se portanto tal hipótese. Com o intuito de se verificar a hipótese de derivação dos vários grupos através de graus de fusão variáveis a partir do mesmo manto, foram calculadas várias razões entre elementos incompatíveis dos vários grupos. Durante a fusão progressiva, as razões que possuem como denominador o elemento mais incompatível tendem a aumentar de valor. Tomando-se como exemplo as razões La/Nb, Zr/Nb, Ti/Nb e Ti/Zr, por exemplo, observou-se que os valores aumentaram progressivamente do grupo 1 para o grupo 3, o que indicaria que os líquidos geradores dos diques do grupo 1 teriam se formado inicialmente (sob grau de fusão menor) seguindo-se os líquidos geradores do grupo 2, sendo os do grupo 3 o últimos. No entanto ao estimar a composição inicial dos elementos incompatíveis dos vários grupos observou-se fato contrastante. As composições iniciais foram calculadas através de diagramas onde tais elementos foram correlacionados com Ni. Seus valores foram obtidos através de intersecções em diagramas nos pontos obtidos tomando-se o valor de Ni de 200 ppm.

Os resultados mostraram que o grupo 1 é o que possui a menor concentração de elementos incompatíveis, seguindo-se o grupo 2, e finalmente o 3, este portador dos valores mais altos, e, portanto o primeiro a se formar, sob grau de fusão menor, tendo-se em vista esse critério. Os fatos acima apontados indicam que a geoquímica dos diferentes grupos de diques deve-se relacionar às suas fontes originais, que possuíam composição variável, face à heterogeneidade mantélica. Os diques de Diamantina têm afinidade toleítica, à semelhança dos diques dos cratons do São Francisco e do Rio da Plata. No entanto, as razões entre elementos incompatíveis são muito mais semelhantes com as derivadas de magmas do tipo OIB, do que com as produzidas por líquidos toleíticos que deram origem aos diques precambrianos que cortam os cratons acima citados; embora a quantidade absoluta de incompatíveis em líquidos OIB típicos seja bem mais elevada do que as calculadas para os diques em questão. Tal discrepância advém do fato de que estes diques são toleitos, sendo portanto produtos de fusão mais elevada do que as que produziram os líquidos OIB (basaltos alcalinos). Tais considerações levam à suposição de que a origem desses diques relaciona-se a um manto empobrecido que foi metassomaticamente enriquecido por componente com características OIB; e que sofreu fusão produzindo líquidos toleíticos, retendo porém características geoquímicas do componente OIB metassomatizante. Por analogia com OIB, imagina-se que tal componente seria provavelmente relacionado com uma pluma. Nesse caso o cenário geodinâmico seria de um rifteamento crustal, causado pela ação de diápiros provenientes de uma pluma na litosfera.

Face ao fato de que as rochas do grupo 1 exibirem maior grau de metamorfismo e serem as únicas a cortar as unidades mais antigas do Supergrupo Espinhaço, uma das hipóteses indicaria tais rochas como mais antigas. Com a contínua ação da pluma na litosfera, os líquidos toleíticos originários dos diques 2 e 3, tornar-se-iam progressivamente mais ricos em elementos incompatíveis, face à contínua percolação dos agentes metassomáticos. Nesse caso esses dois grupos representariam estágios mais avançados de fusão e de adelgaçamento crustal. Os dados geocronológicos existentes, porém, não são suficientes para sustentar tal hipótese.



Alternativamente, se os três grupos de diques forem sincrônicos, os dados geoquímicos e isotópicos indicariam ação da pluma em manto empobrecido de modo não uniforme, de molde a provocar a formação de líquidos geoquimicamente diversos. As rochas formadoras do grupo 4 são petrográfica e geoquimicamente muito diferentes das dos outros grupos, e podem representar ocorrência local e limitada de magmatismo muito mais jovem, talvez mesozóico.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP e ao CnPq pelo apoio financeiro, e ao Instituto Eschwege pela ajuda durante trabalhos de campo.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M.; BRITO NEVES, B.B. & DAL RÉ CARNEIRO, C. (2000) - The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews*, **50**: 77-111.
- ALMEIDA ABREU, P.A. (1995) - O Supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço meridional (Minas Gerais): o rift e orógeno. *Geonomos*, **3**(1), pp. 1-18.
- BABINSKI, M.; BRITO NEVES, B.B.; MACHADO, N.; NOCE, C. M.; UHLEIN, A. & VAN SCHMUS, W.R. (1994) - Problemas da metodologia U/Pb em zircões de vulcânicas continentais: caso do grupo Rio dos Remédios, Supergrupo Espinhaço, estado da Bahia. *Anais do 38 Congresso Brasileiro de Geologia*, Boletim de resumos expandidos, Camburiú, SC, pp. 409-410.
- BESWICK, A.E. (1982) - Some geochemical aspects of alteration and genetic relations in komatitic suites. In ARNDT, N.T. & NISBET, E.G. (Eds.), *Komatites*, G. Allen & Unwin, London, pp. 283-308.
- BRITO NEVES, B.B.; SÁ, J.M.; NILSON, A.A. & BOREZINO, N.F. (1995) - Supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço meridional (Minas Gerais): o rift e o orógeno. *Geonomos*, **3**(1), pp. 1-18.
- CORDANI, U. G.; KAWASHITA, K.; SATO, K.; IYER, S.S. & TAYLOR, P.N. (1992) - Pb-Pb, Rb-Sr and K-Ar systematics of the Lagoa Real Uranium Province (South Central Bahia, Brazil) and the Espinhaço cycle (ca. 1.5-1.0 Ga). *J. South American Earth Sci.*, **5**(1), pp. 33-36.
- DOSSIN, I.A. (1994) - Evolution structurale de la partie méridionale de l'Espinhaço sur la bordure orientale du Craton São Francisco, Minas Gerais - Brésil: un exemple de tectonique protérozoïque superposée. *Dr. Sci. thesis*, University of Orleans, France, 200 pp.
- HEAMAN, L.M. (1991) - U-Pb dating of giant radiating dike swarms potential for global correlation of mafic magmatic events. In TEIXEIRA, W.; ERNESTO, M. & OLIVEIRA, E.P. (Eds.), *III International Symposium on Mafic Dikes*, Extended Abstracts, S. Paulo, pp. 7-8.
- HOFFMAN, P.F. (1991) - Did the breakout of the Laurentia turn Gondwanaland inside out?. *Science*, **257**: 1405-1412.
- MACHADO, N.; SCHIRANK, A.; ABREU, F.K.; KNAUER, L.G. & ABREU, P.A.A. (1989) - Resultados preliminares de geocronologia U/Pb da Serra do Espinhaço meridional. *V Simpósio Geologia de Minas Gerais*, **10**: 171-174.
- MENEZES LEAL, A.B.; GIRARDI, V.A.V.; RIVALENTI, G. & MAZZUCHELLI, M. (1999) - Aspectos geológicos, petrográficos e geoquímicos do magmatismo básico do Espinhaço Setentrional, Minas Gerais. *V Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa e VII Congresso Brasileiro de Geoquímica*, Porto Seguro, Brasil, pp. 554-556.
- PORADA, H. (1989) - Pan American rifting and orogenesis in southern equatorial Africa and eastern Brazil. *Prec. Research*, **44**: 103-136.
- RENNE, P.R.; ONSTOOT, T.C.; D'AGRELLA FILHO, M.S.; PACCA, I.G. & TEIXEIRA, W. (1990) -  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of 1.0-1.1 Ga magnetizations from the São Francisco and Kalahari cratons: tectonic implications for Pan-African and Brasiliano belts. *Earth and Planetary Science Letters*, **101**: 349-366.
- TEIXEIRA, W.; RENNE, P.R.; BOSSI, J.; CAMPAL, N. & D'AGRELLA FILHO, M.S. (1999) -  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and Rb-Sr geochronology of the Uruguayan dike swarm, Rio de La Plata Craton and implications for Proterozoic intraplate activity in western Gondwanaland. *Precambrian Research*, **93**: 153-180.