EVENTOS MAGMÁTICOS ARQUEANOS DE NATUREZA CÁLCIO-ALCALINA E THOLEIÍTICA NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO E SUAS IMPLICAÇÕES TECTÔNICAS

MAURÍCIO ANTÔNIO CARNEIRO*, HANNA JORDT-EVANGELISTA** & WILSON TEIXEIRA***

ABSTRACT TECTONIC IMPLICATIONS OF ARCHEAN CALC-ALKALINE AND THOLEIITIC MAGMATIC EVENTS IN THE QUADRILÁTERO FERRÍFERO, BRAZIL. Mafic amphibolitic dikes cutting tonalitic rocks with little evidence of metamorphism are one of the singularities in the crust, evolution of the Quadrilátero Ferrífero, in Minas Gerais. Petrographic, geochemical and geochronological studies show that in the Bonfim Metamorphic Complex these rock types constitute two distinct magmatic series, one tholeiitic and the other calcalkaline. They were partially metamorphosed under the conditions of higher greenschist to lower amphibolite facies. In the calcalkaline tonalites the metamorphic reactions, which required the introduction of water, were diffculted by their massive structure. Therefore primary textures and mineralogy were mostly preserved. In the tholeiitic rocks of the dikes the metamorphism was more homogeneous because the primary igneous mineralogy, rich in pyroxenes, is more sensible to hydration reactions than the mineralogy of the tonalites. The access of the needed aqueous fluids certainly was more effective to the mafic rocks because fluids tend to be concentrated in zones of crustal weakness such as dikes. We conclude that the non-penetrative metamorphic recrystallization of the two rocks series under the conditions of the higher greenschist to lower amphibolite facies, and also the preservation of early Archean U/Pb ages in titanites of the tonalites, indicate that the studied region was not submitted to any penetrative tectonometamorphic event of higher metamorphic conditions than the lower amphibolite facies during the Proterozoic. Therefore we also conclude that the tectonometamorphic overprinting of the Transamazonian Event (2.2 My) in the Bonfim Metamorphic Complex and probably also in the rest of the Quadrilátero Ferrífero was heterogeneous, not affecting all áreas with the same intensity.

Keywords: Amphibolite, Tonalite, Geochemistry, Geochronology, Metamorphism, Archean, Quadrilátero Ferrífero, Bonfim Metamorphic Complex

RESUMO Diques máficos anfibolitizados, intrusivos em rochas tonalíticas, estas últimas praticamente sem evidências metamórficas, constituem um dos aspectos singulares da evolução crustal arqueana do Quadrilátero Ferrífero, no Estado de Minas Gerais. Estudos petrográficos, geoquímicos e geocronológicos indicam tratar-se de duas suítes magmáticas distintas, uma tholeiítica e a outra cálcio-alcálica, que foram metamorfozadas com intensidade diferente sob as condições das fácies xisto verde alto a anfíbolito baixo. Na suíte cálcio-alcálica tonalítica a transformação metamórfica foi dificultada por suas características estruturais e mineralógicas, de modo que a rocha mantém em grande parte as suas feições ígneas originais. Na suíte tholeiítica os efeitos do metamorfismo foram mais efetivos porque a sua composição mineralógica ígnea primária, rica em piroxênios, foi mais sensível às reações metamórficas de hidratação. Além disso, o metamorfismo destas rochas de dique foi mais pronunciado porque os fluidos aquosos necessários às reações mineralógicas tendem a concentrar-se em zonas de fraqueza crustal como aquelas por onde ascendeu o magma tholeiítico. Conclui-se que a recrystallização metamórfica não-penetrativa das duas suítes sob as condições da fácies xisto verde alto a anfíbolito baixo, bem como a preservação de idades U-Pb neoarqueanas em titanitas dos tonalitos, indicam que a região estudada não foi submetida a qualquer evento tectonometamórfico de caráter penetrativo de fácies mais elevada do que anfíbolito baixo no decorrer do Proterozoico. Portanto, a atuação do Evento Transamazônico (2.2 Ma) no Complexo Metamórfico Bonfim e, por extensão, no Quadrilátero Ferrífero, foi heterogênea, não afetando todas as áreas com a mesma intensidade.

Palavras Chaves: Anfíbolito, Tonalito, Geoquímica, Geocronologia, Metamorfismo, Arqueano, Quadrilátero Ferrífero, Complexo Metamórfico Bonfim.

INTRODUÇÃO A região conhecida como Quadrilátero Ferrífero (Fig. 1) está inserida na porção centro sul do estado de Minas Gerais que, por sua vez, faz parte da porção meridional do Craton do São Francisco.

A evolução geológica da crosta siálica deste fragmento crustal está bem caracterizada no Complexo Metamórfico Bonfim (Carneiro 1992; Carneiro *et al.* 1996; Teixeira *et al.* 1996) a partir do Meso-Arqueano, quando foram geradas e/ou retrabalhadas algumas suítes gnaissicas (Carneiro 1992, Noce 1995).

O Gnaiss Alberto Flores (Figura 3) tem uma idade mínima de 2.920 Ma e contém, aparentemente, o registro mais antigo de uma herança siálica na região (Machado & Carneiro 1992). Eventos de magmatismo máfico fissural impostos à crosta siálica do Quadrilátero Ferrífero, ainda no Meso-Arqueano, são representados, por exemplo, pelo Anfíbolito Paraopeba (Carneiro 1992). Já para o final do Meso-Arqueano, a crosta siálica do Quadrilátero Ferrífero foi acres-

cida por eventos de magmatismo félsico, como é o caso dos gnaisses do tipo Souza Neschese (Carneiro 1992).

Embora sejam ainda parcialmente obscuras as relações tectônicas desta crosta siálica com a sequência supracrustal do Supergrupo Rio das Velhas (Dorr II 1969, Ladeira 1985; Schorscher 1982), o intervalo de variação de idades U-Pb em rochas do Supergrupo Rio das Velhas (Machado *et al.* 1992) coaduna-se com o intervalo de idades U-Pb da crosta siálica (Carneiro *et al.* 1995). Por outro lado, têm sido encontrados, nas unidades superiores do Supergrupo Rio das Velhas, seixos de rochas ígneas (Golia *et al.* 1996) petrográfica- e geoquimicamente semelhantes ao Tonalito Samambaia e ao Granito Brumadinho do Complexo Metamórfico Bonfim. Sendo assim, algumas das unidades litoestratigráficas da crosta siálica arqueana do Quadrilátero Ferrífero precedem, pelo menos, a sedimentação das unidades superiores do Supergrupo Rio das Velhas. Estas características, juntamente com o padrão geocronológico U-Pb, têm invocado ambientes tectônicos de natureza continental e/ou de margem ativa (Carneiro

* Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 35400-000 - Ouro Preto - MG - Brasil - e-mail: mauricio@degeo.ufop.br

** Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 35400-000 - Ouro Preto - MG - Brasil

*** Departamento de Geologia Geral, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Figura 1 - Geologia do Craton do São Francisco Meridional (modificado de Carneiro 1992). Simbologia: 1- Contato geológico; 2 - Empurrão; 3 - Limite cratônico oriental; 4 - Superggrupo São Francisco; 5 - Superggrupo Espinhaço; 6 - Complexo Metamórfico formado ou retrabalhado no Neo-Proterozóico; 7 - Superggrupo Minas; 8 - Superggrupo Rio das Velhas; 9 - Complexo Metamórfico Arqueano. BHZ - Belo Horizonte; BFM - Bonfim

Figure 1 - Geology of the Southern São Francisco Craton (modified after Carneiro 1992). Keys: 1 - Geological contact; 2 - Thrust fault; 3 - Eastern cratonic boundary; 4 - São Francisco Supergroup; 5 - Espinhaço Supergroup; 6 - Metamorphic Complex formed or reworked in the Neo-Proterozoic; 7 - Minas Supergroup; 8 - Rio das Velhas Supergroup; Archean Metamorphic Complex. Cities: BHZ - Belo Horizonte; BFM - Bonfim

1992) para explicar a evolução geológica deste terreno *granito-greenstone*, constituído, respectivamente, pela crosta sílica arquearia e o Superggrupo Rio das Velhas.

A outra unidade litoestratigráfica do Quadrilátero Ferrífero, Superggrupo Minas (Dorr II 1969), tem uma evolução estritamente relacionada ao Proterozóico (Carneiro *et al.* 1995 e referências ali citadas).

COMPLEXO METAMÓRFICO BONFIM

O Complexo Metamórfico Bonfim (Figura 2) é, no âmbito da crosta sílica do Quadrilátero Ferrífero, um dos seus segmentos mais bem conhecidos. Este complexo é constituído, basicamente, por oito suítes, sendo que seis delas (Tabela 1), estão diretamente relacionadas ao Arqueano (Carneiro 1992, Teixeira *et al.* 1996).

As outras duas relacionam-se ao Proterozóico, quando novos eventos de magmatismo máfico fissural invadiram a crosta sílica arquearia. Os magmatitos destes últimos episódios têm sido designados, respectivamente, de Metadiabásio Conceição do Itaguá e Diabásio Santa Cruz (Carneiro 1992).

Todas as suítes arqueanas do Complexo Metamórfico Bonfim guardam registros isotópicos do Proterozóico obtidos pelos métodos Rb-Sr e K-Ar (Tabela 1). Estes registros, no

entanto, estão relacionados a distúrbios isotópicos ocorridos sob baixas condições de temperatura e pressão, subordinados a processos tectonometamórficos de fácies xisto verde (Carneiro 1992).

Todavia, dentre as várias suítes que constituem o Complexo Metamórfico Bonfim (Carneiro 1992; Teixeira *et al.* 1996), destaca-se uma associação petrográfica constituída por metamafitos toleíticos (Anfibolito Candeias) e granitóides cálcio-alcálicos (Tonalito Samambaia). O Tonalito Samambaia tem o seu domínio aflorante, mais significativo, no canto sudeste do Complexo Metamórfico Bonfim (Figura 2), onde esta suíte é intrusiva no Gnaiss Alberto Flores. Neste local, é possível observar matacões de tonalitos com textura hipidiomórfica preservada. Outra ocorrência do Tonalito Samambaia, embora de tamanho mais reduzido, ocorre mais ao norte, nos domínios do Gnaiss Souza Noschese (Figura 2). Já o Anfibolito Candeias aflora como diques de variada espessura, não só na porção oriental da área, onde intrudem o Tonalito Samambaia e o Gnaiss Souza Noschese, como também, em outras partes do Complexo Metamórfico Bonfim, no domínio do Gnaiss Alberto Flores (Figura 2).

As idades Sm-Nd (TDM) do Anfibolito Candeias e do Tonalito Samambaia são respectivamente 2680 e 2940 - 2800

Figura 2 - Mapa geológico do Complexo Metamórfico Bonfim e de parte das seqüências supracrustais do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Carneiro 1992). Simbologia: 1 - Diabásio Santa Cruz; 2 - Metadiabásio Conceição do Itaguá; 3 - Supergrupo Minas; 4 - Granito Brumadinho; 5 - Anfibolito Candeias; 6 - Tonalito Samambaia; 7 - Supergrupo Rio das Velhas; 8 - Gnaiss Souza Noschese; 9 - Anfibolito Paraopeba; 10 - Gnaiss Alberto Flores

Figure 2 - Geologic map of the Bonfim Metamorphic Complex and part of the Quadrilátero Ferrífero supracrustal sequences (modified from Carneiro 1992). Keys: 1 - Santa Cruz Diabase; 2 - Conceição de Itaguá Metadiabase; 3 - Minas Supergroup; 4 - Brumadinho Granite; 5 - Candeias Amphibolite; 6 - Samambaia Tonalite; 7 - Rio das Velhas Supergroup; 8 - Souza Noschese Gneiss; 9 - Paraopeba Amphibolite; 10 - Alberto Flores Gneiss

Tabela 1 - Características petrográficas e geocronológicas das suítes arqueanas do Complexo Metamórfico Bonfim

Table 1 - Petrographic and geochronological characteristics of the Archean Suites from the Bonfim Metamorphic Complex

Suítes arqueanas do Complexo Metamórfico Bonfim	Características Petrográficas Gerais	Idade (Ma)			
		U-Pb ¹	Sm-Nd ² (TDM)	Rb-Sr ³ (WR) ⁴	K-Ar ³
Granito Brumadinho	Pequenos corpos e diques cortando o bandamento gnaissico do Gnaiss Alberto Flores	2703 +24/-20 (Zircão)	2950 ± 50 ε (-) de 3,07 2780 ± 70 ε (-) de 1,25	982 ± 91 R ₀ =0.741±0.002 MSWD=10,3	1090 - 700 (Biotita)
Anfibolito Candeias	Diques máficos com blastofenocrístais de plagioclásio e hornblenda poiquiloblástica, intrusivos nas unidades anteriores, especialmente, no Tonalito Samambaia	-	2680 ± 58 ⁷ ε (+) de 1,05	-	1710 (Hornblenda)
Tonalito Samambaia	Granitóides cinzentos com texturas ígneas preservadas e intrusivos nos Gnaisses Souza Noschese e Alberto Flores	2778 +3/-2 (Zircão e Titanita)	2940 ± 80 ε (-) de 2,04 2800 ± 40 ε (-) de 0,31	1188 ± 46 R ₀ =0.713±0.0005 MSWD=24,9	1120 - 720 (Biotita)
Gnaiss Souza Noschese	Orto-gnaisses graníticos cinzentos com foliação milonítica bem desenvolvida, intrusivos no Gnaiss Alberto Flores	-	3000 ± 100 ε (-) de 1,83	1295 ± 80 R ₀ =1.006±0.017 MSWD=7,9	-
Anfibolito Paraopeba	Diques máficos boudinados e rompidos com textura granonematoblástica encontrados dentro do Gnaiss Alberto Flores	-	2800 ± 102 ε (-) de 0,39	-	2160 - 1930 (Hornblenda)
Gnaiss Alberto Flores	Gnaisses cinzentos de composição trondhjemitica. Constitui a suíte mais antiga do Complexo Metamórfico Bonfim	2772 ± 6 ⁵ 2920 ⁶ (Zircão)	2970 ± 50 ε (-) de 2,23	2219 ± 80 R ₀ =0.707±0.001 MSWD=2,1	540 (Biotita)

¹ Machado & Carneiro (1992); ² Teixeira *et al.* 1996; ³ Carneiro (1992); ⁴ Isócrona; ⁵ Sobrecrecimento; ⁶ Núcleo; ⁷ Carneiro *et al.* (1996)

Ma (Teixeira *et al.* 1996, Carneiro *et al.* 1996), enquanto que os zircões e titanitas do Tonalito Samambaia forneceram idades U-Pb idênticas de $2780 \pm 3/-2$ Ma (Machado & Carneiro 1992; Tabela 1). A concordância entre as idades U-Pb dos zircões e titanitas do Tonalito Samambaia é, por si só, um fato curioso, pois caso esta suíte tivesse sido submetida a um regime metamórfico de fácies anfibolito, quando do metamorfismo, por exemplo, do Anfibolito Candeias, as titanitas teriam sido reequilibradas isotopicamente e estariam fornecendo a idade deste reequilíbrio. Isto, no entanto, não aconteceu pois, além de guardarem a idade de sua cristalização magmática, no sistema isotópico U-Pb das titanitas, estas rochas tem um caráter textural tipicamente magmático com a presença, inclusive, de plagioclásios com *habitus* euédrico a subédrico. Em contraposição a isto, o Anfibolito Candeias apresenta um caráter textural/mineralógico tipicamente metamórfico. Como estas duas unidades estão inseridas num fragmento crustal de longa atividade geológica, supostamente afetada pelos processos tectono-termiais do Evento Transamazônico, a compreensão dos processos responsáveis pelo metamorfismo do Anfibolito Candeias passa a ter uma importância significativa na história tectono-metamórfica do Complexo Metamórfico Bonfim e, por extensão, do Quadrilátero Ferrífero.

Tonalito Samambaia O Tonalito Samambaia é uma suíte de rochas leucocráticas de cor cinza a cinza escura, faneríticas, equigranulares, de granulação média a grossa. A sua composição química é essencialmente tonalítica. De maneira geral a textura é tipicamente hipidiomórfica. Ela está caracterizada por cristais subédricos a anédricos e, mais raramente, euédricos de plagioclásio e cristais anédricos de microclina e quartzo. Em amostras deformadas, no entanto, esta textura hipidiomórfica pode exibir variações locais para texturas miloníticas (*s.l.*).

O **plagioclásio** é o principal constituinte em volume das rochas da suíte tonalítica e ocorre em cristais zonados e geminados Carlsbad e albite, frequentemente saussuritizados. A intensidade dessa saussuritização varia de cristal para cristal e de amostra para amostra. Nas amostras mais cisalhadas a saussuritização é intensa, com transformação quase completa dos plagioclásios em epidoto/clinozoisita $\pm$ sericita. Eles mostram, ainda, inclusões de biotita castanha e, mais raramente, de quartzo globular. Alguns cristais apresentam-se antipertíticos, exibindo manchas anédricas de microclina.

A microclina é muito subordinada, perfazendo no máximo 10% em volume nestas rochas. Ela mostra cristais anédricos e muito raramente subédricos, com geminação *tartan* e distribuição intersticial junto com o quartzo. Apresenta-se sempre limpa. O quartzo é sempre anédrico intersticial e apresenta-se em mosaicos recristalizados, com extinção ondulante. A biotita e a hornblenda são os minerais varietais destas rochas. A biotita castanha é o mais frequente, perfazendo em média cerca de 10% em volume. Ela mostra agregados lamelares com transformação para clorita verde, verde pálido ou incolor, epidoto e grãos anédricos de titanita. A sua transformação secundária, no entanto, ao contrário do observado nas demais unidades litoestratigráficas do Complexo Metamórfico Bonfim, tem, notadamente, um predomínio para a formação de epidoto incolor em detrimento à clorita. Nas amostras mais cisalhadas a biotita pode formar leitos de espessura variável e, juntamente com o epidoto granular, envolver os plagioclásios. Inclusões de agulhas de rutilo são uma feição corriqueira nestas biotitas. A hornblenda aparece em algumas amostras. Ela exibe pleocroísmo intenso amarelo pálido, verde oliva e verde azulado. Em alguns casos o volume de hornblenda suplanta o volume de biotita e pode alcançar até 10%. Titanita, allanita, zircão e apatita são acessórios comuns. Contudo, o Tonalito Samambaia é geralmente pobre

em minerais opacos, que mostram formas anédricas corroídas e/ou esqueléticas associadas à biotita e/ou hornblenda. De maneira geral, estão bordejados por titanita anédrica granular. A **titanita** pode constituir também grandes cristais subédricos a euédricos. **Allanita** é um acessório frequente e mostra cristais zonados, geminados e envolvidos por epidoto incolor. Estão geralmente associados à biotita. O **zircão** mostra cristais idiomórficos de variadas dimensões, preferencialmente associados à biotita. Não foram observados núcleos ou inclusões nos cristais de zircão. **Apatita** mostra cristais idiomórficos inclusos em quartzo, feldspatos ou associados a biotita. Calcita, epidoto, sericita e clorita são minerais metamórficos crescendo sobre a paragénese principal.

Anfibolito Candeias O Anfibolito Candeias é uma suíte de rochas melanocráticas, densas, faneríticas, equigranulares a inequigranulares, de granulação média, apresentando localmente fenocristais relícticos de plagioclásios. A composição química das rochas desta suíte é essencialmente basáltica. A textura varia de decussada a granonematoblástica e é comum a alternância de leitos de anfibólio e de plagioclásio, em cristais geralmente polygonizados e com junções triplíceis. O **anfibólio** é o principal constituinte destes anfibolitos. Este mineral exibe, de maneira geral, cristais prismáticos delgados. Outras vezes são granulares xenoblásticos e poiquiloblásticos. Em algumas rochas, o pleocroísmo mais fraco (amarelo - verde amarelado - verde azulado) e o ângulo de extinção ($c \wedge Z \leq 17^\circ$) leva a supor que este anfibólio é uma actinolita. Em outras rochas, porém, o pleocroísmo intenso amarelo amarronzado - verde oliva - verde azulado e o ângulo de extinção ($c \wedge Z \geq 17^\circ$) são compatíveis com uma hornblenda. O **plagioclásio** pode ocorrer em duas gerações. A mais antiga constitui fenocristais tabulares, cujo hábito é tipicamente magmático. Estes plagioclásios relícticos mostram-se intensamente saussuritizados. A geração mais jovem é constituinte da matriz, exibe cristais anédricos, zonados e geminados segundo albite e Carlsbad. Embora sejam geralmente limpidos, podem ser portadores de finos cristais de epidoto. O **quartzo** é muito raro e ocorre em pequenos cristais anédricos polygonais nos leitos de plagioclásio ou inclusos na hornblenda, exibindo, raramente, extinção ondulante. Relíctos intersticiais de quartzo granofírico foram herdados do protólito ígneo. Os opacos mostram cristais anédricos de aspecto esquelético, bordejados por grãos de titanita que, por sua vez, podem formar compridos cordões granulares associados aos leitos de hornblenda nas amostras mais cisalhadas. **Apatita**, em diminutos cristais euédricos, é acessório comum. Biotita, clorita, sericita, carbonato e epidoto são minerais metamórficos. O **epidoto** desenvolve-se, particularmente, sobre os plagioclásios mais antigos e, mais raramente, sobre a hornblenda, conferindo a estes minerais um aspecto pulverulento. Este aspecto pulverulento, nos plagioclásios, é intensificado pela presença de sericita que ocorre em finas palhetas geralmente associada ao epidoto. A biotita, comumente acastanhada, desenvolve-se a partir da hornblenda e, associada a ela, tem lugar a clorita.

GEOQUÍMICA Apresentam-se nas Tabelas 2 e 3 os resultados das análises químicas em rocha total do Tonalito Samambaia e Anfibolito Candeias.

Algumas das características geoquímicas destas duas suítes podem ser deduzidas a partir dos diagramas das Figuras 3 a 6.

O Tonalito Samambaia tem um caráter cálcio-alcalino em contraposição ao caráter tholeiítico do Anfibolito Candeias (Figura 3). As Figuras 3 a 5 revelam uma aparente "bimodalidade" entre estas duas suítes, pois os resultados concentram-se em dois agrupamentos distintos. No diagrama álcalis *versus* sílica (Figura 4) as análises de amostras do Tonalito

Tabela 2 - Composição química de amostras selecionadas do Tonalito Samambaia

Table 2 - Chemical composition of selected samples of the Samambaia Tonalite

Amostras %	ML8-J	ML13-A	MM6-A	MN10-A	MN10-E	MN10-F	MN10-H	MN10-J	NK5
SiO ₂	68,00	64,00	63,10	64,10	65,80	64,40	64,60	64,80	67,20
TiO ₂	0,46	0,81	0,76	0,71	0,68	0,68	0,73	0,69	0,56
Al ₂ O ₃	14,20	16,10	17,30	15,30	14,90	15,10	14,70	15,30	15,40
Fe ₂ O ₃	0,58	2,00	2,30	0,98	0,54	3,10	0,50	0,64	2,60
FeO	2,90	2,90	2,60	3,80	4,10	1,90	4,50	4,10	1,40
MnO	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07
MgO	1,70	1,90	2,00	2,30	2,00	2,10	2,40	1,90	1,50
CaO	3,60	4,20	4,80	4,70	4,30	4,40	4,40	4,50	3,80
Na ₂ O	4,30	4,20	3,60	4,70	4,30	4,60	4,40	4,30	3,80
K ₂ O	2,70	1,90	2,00	2,00	2,10	2,00	2,10	2,10	2,10
P ₂ O ₅	0,14	0,21	0,21	0,21	0,19	0,21	0,22	0,22	0,16
LOI	1,07	1,55	1,17	0,80	0,92	1,21	1,18	1,02	1,29
Total	99,71	99,84	99,90	99,66	99,89	99,77	99,80	99,64	99,88
(ppm)									
Cr	18	68	68	32	28	26	32	30	68
Ni	22	78	78	30	28	27	30	26	78
Co	10	24	26	14	13	13	14	13	24
V	82	72	67	100	96	108	100	78	56
Cu	17	8	15	16	17	15	17	13	25
Zn	66	86	80	75	76	70	76	72	71
Rb	100	56	92	63	68	69	66	67	84
Ba	710	599	779	730	720	750	790	700	402
Sr	340	290	340	380	360	370	330	360	320
Nb	42	20	30	42	42	40	42	50	25
Zr	380	400	470	480	620	520	620	600	340
Y	30	36	42	38	33	35	37	37	36
S	110	50	50	130	130	130	140	130	50
F	700	590	540	900	900	700	1000	800	850
Cl	20	39	73	110	110	120	130	130	20
(ppb)									
La	52,06	-	-	-	79,78	-	-	-	-
Ce	113,70	-	-	-	152,60	-	-	-	-
Nd	37,21	-	-	-	58,63	-	-	-	-
Sm	7,47	-	-	-	12,01	-	-	-	-
Eu	1,17	-	-	-	1,79	-	-	-	-
Gd	4,81	-	-	-	7,81	-	-	-	-
Dy	3,67	-	-	-	6,44	-	-	-	-
Ho	0,75	-	-	-	1,26	-	-	-	-
Er	2,07	-	-	-	3,25	-	-	-	-
Yb	1,83	-	-	-	2,67	-	-	-	-
Lu	0,26	-	-	-	0,33	-	-	-	-

Tabela 3 - Composição química de amostras selecionadas do Anfibolito Candeias

Table 3 - Chemical composition of selected samples of the Candeias Amphibolite

Amostras (%)	JG1-C	JG4-A	JG4-L	JH5-A	KH3-A	KH3-L	LJ10	ML8-C
SiO ₂	49,00	50,10	49,40	50,60	51,30	49,60	49,20	51,20
TiO ₂	1,60	1,90	2,10	1,60	2,00	1,70	1,90	1,20
Al ₂ O ₃	13,60	13,10	12,60	14,20	13,10	12,90	13,20	14,00
Fe ₂ O ₃	2,90	3,20	2,10	1,30	1,50	2,60	1,20	1,80
FeO	10,40	11,50	12,90	12,00	13,60	13,10	12,90	11,10
MnO	0,21	0,23	0,23	0,19	0,22	0,25	0,22	0,19
MgO	6,40	5,60	5,60	5,60	4,30	5,10	6,00	5,90
CaO	10,70	10,30	10,70	10,80	9,90	10,20	10,60	11,10
Na ₂ O	2,30	2,50	2,50	2,00	2,40	2,70	2,50	2,10
K ₂ O	0,54	0,49	0,49	0,45	0,45	0,49	0,36	0,28
P ₂ O ₅	0,16	0,28	0,21	0,16	0,19	0,19	0,21	0,10
LOI	1,97	0,58	0,86	1,03	0,95	0,82	1,42	0,92
Total	99,78	99,78	99,69	99,93	99,91	99,65	99,71	99,89
(ppm)								
Cr	200	120	220	220	132	136	230	340
Ni	100	86	142	146	102	112	156	158
Co	44	43	58	52	66	58	60	84
V	288	228	458	228	288	438	468	268
Cu	103	75	66	100	94	81	113	88
Zn	147	187	167	127	137	137	137	113
Rb	24	10	10	10	17	15	10	10
Ba	72	84	74	75	96	110	67	24
Sr	110	100	88	110	100	97	94	120
Nb	20	20	52	20	20	36	58	20
Zr	134	172	240	156	210	182	210	132
Y	56	77	104	64	86	74	82	70
S	1000	1000	1100	1100	1100	1300	1300	900
F	200	300	300	200	300	300	300	200
Cl	180	280	310	130	170	200	190	20
(ppb)								
La	7,84	-	13,75	9,82	-	-	-	-
Ce	29,20	-	41,54	29,26	-	-	-	-
Nd	14,64	-	23,17	16,59	-	-	-	-
Sm	4,11	-	6,87	4,72	-	-	-	-
Eu	1,14	-	1,67	1,22	-	-	-	-
Gd	3,22	-	5,58	3,87	-	-	-	-
Dy	4,45	-	7,37	5,40	-	-	-	-
Ho	0,93	-	1,50	1,13	-	-	-	-
Er	2,83	-	4,55	3,34	-	-	-	-
Yb	2,45	-	4,04	2,89	-	-	-	-
Lu	0,29	-	0,50	0,36	-	-	-	-

Figura 3 - Diagrama AFM (Irvine & Baragar 1971) exibindo as composições químicas do Tonalito Samambaia (quadrados) e Anfíbolito Candeias (círculos)

Figure 3 - AFM diagram (after Irvine & Baragar 1971) for the Samambaia

Tonalite (boxes) and Candeias Amphibolite (circles) samples

Figura 4 - Classificação do Tonalito Samambaia e Anfíbolito Candeias, no diagrama álcalis versus sílica de Cox et al. (1979), onde o Tonalito Samambaia (quadrados) apresenta uma composição compatível com dacitos e riolitos e o Anfíbolito Candeias (círculos) tem uma composição compatível com basaltos

Figure 4 - Chemical classification of the Samambaia Tonalite (boxes) and Candeias Amphibolite (circles) in the alkalis versus silica diagram (Cox et al. 1979). The Samambaia Tonalite samples plot in the fields of dacites and rhyolites and the Candeias Amphibolite samples plot in field of basalts

Samambaia caem no campo dos dacitos e riolitos, enquanto que as amostras do Anfíbolito Candeias correspondem, quimicamente, a basaltos.

Esta "bimodalidade" manifesta-se também, muito claramente, em diagramas de variação do tipo Harker (Figura 5).

Nestes diagramas verifica-se, mais uma vez, que o Anfíbolito Candeias e o Tonalito Samambaia constituem dois grupos quimicamente distintos. Toma-se claro, portanto, que não há tipos litológicos quimicamente intermediários entre o Tonalito Samambaia e o Anfíbolito Candeias. Disto é possível

concluir que se trata de dois magmatismos distintos e não de uma série magmática formada por algum processo de diferenciação.

Finalmente, na Figura 6, é possível observar o padrão geoquímico de REE das duas suítes em estudo.

O padrão geoquímico do Tonalito Samambaia mostra-se bastante fracionado se comparado ao padrão do Anfíbolito Candeias. O fracionamento é muito mais acentuado no que tange os elementos de terras raras leves. O padrão geoquímico do Anfíbolito Candeias é mais achatado e guarda alguma semelhança com o padrão dos tholeiítos arqueanos do tipo TH2deCondrie(1981).

METAMORFISMO O metamorfismo de magmatitos, que são rochas compostas predominantemente por minerais anidros, requer a introdução de uma fase fluida aquosa para viabilizar as reações mineralógicas. O fluxo de fluidos através de um corpo magmático homogêneo é extremamente dificultado pela estrutura maciça e pela ausência de descontinuidades estruturais. Assim, granitóides como o Tonalito Samambaia costumam reter, na ausência de uma deformação penetrativa, a sua mineralogia e as texturas magmáticas originais. Deste modo, a principal transformação metamórfica no Tonalito Samambaia foi a saussuritização dos feldspatos. A saussuritização deu-se preferencialmente ao longo de superfícies anastomosadas e mais ou menos planares da rocha, onde também ocorreram transformações texturais como a recristalização dinâmica de biotitas e quartzo. Estas superfícies, que canalizaram o fluxo dos fluidos aquosos indispensáveis às reações metamórficas, são zonas de alto *strain* onde se concentrou a deformação. A saussuritização de feldspatos é uma reação do tipo:

Resultados experimentais de Ackermann & Karl (1972) indicam que a temperatura de equilíbrio desta reação é de $520 \pm 10^\circ\text{C}$ para uma pressão de 4 kbar, que corresponde à transição da fácies xisto verde para a fácies anfíbolito. No entanto, sabe-se que a temperatura, bem como o teor de Fe^{3+} do epidoto e a paragéneses das reações de saussuritização variam em função do quimismo do protólito e do grau de oxidação do ambiente (Braun 1974).

No Anfíbolito Candeias, que ocorre sob a forma de diques, verifica-se que o metamorfismo variou de fácies xisto verde alto (paragéneses actinolita + plagioclásio + epidoto/clinozoisita + quartzo) a anfíbolito baixo (paragéneses hornblenda + plagioclásio + epidoto/clinozoisita + quartzo). O metamorfismo teve, nestas rochas, uma atuação muito mais eficaz do que no tonalito, pois as transformações mineralógicas de saussuritização dos plagioclásios e de anfíbolitização dos piroxênios magmáticos foram quase que completas, restando raramente texturas ou minerais primários. Uma das razões para o fato das máficas terem sido mais homogeneamente metamorizadas do que o tonalito está relacionada ao controle estrutural e às propriedades mecânicas das rochas que, segundo Rumble (1989), são fatores de suma importância no controle do fluxo de fluidos. As fraturas transcrustais, que são descontinuidades estruturais por onde magmas máficos ascendem através da crosta para constituir diques, tendem a focalizar o fluxo de fluidos, favorecendo as transformações metamórficas dos mafítos. O processo metamórfico relacionado à forte influência de fluidos aquosos e o caráter não penetrativo das transformações metamórficas também foram verificados em outros corpos ígneos do Quadrilátero Ferrífero, como é o caso do Granito Mamona (Jordt-Evangelista et al. 1993a; b). Uma outra razão para o caráter mais penetrativo das transformações metamórficas sofridas pelo Anfíbolito Candeias é a composição mineralógica ígnea primária, rica em piroxênios, que são minerais mais propícios a reações metamórficas de hidratação do que os minerais máficos bio-

Figura 5 - Diagramas selecionados do tipo Harker onde se observam dois nítidos agrupamentos de resultados para o Tonalito Samambaia (quadrados) e o Anfíbolito Candeias (círculos) e a ausência de termos intermediários entre estas duas suítes
 Figure 5 - Selected Harker diagrams showing two distinct plot concentrations for the Samambaia Tonalite (boxes) and Candeias Amphibolite (circles) and the lack of intermediate types between these two rock suites

Figura 6 - Diagrama de elementos de terras raras, normalizado para o condrito de Massuda *et al.* (1973), mostrando os padrões geoquímicos do Tonalito Samambaia (quadrados) e do Anfíbolito Candeias (círculos)

Figure 6 - Chondrite normalized (Massuda *et al.* 1973) REE pattern for the Samambaia Tonalite (boxes) and Candeias Amphibolite (circles)

tita ou hornblenda do Tonalito Samambaia. Portanto, as máficas Candeias foram metamorfizadas de modo muito mais homogêneo do que o Tonalito Samambaia que elas cortam na forma de diques.

CONCLUSÕES Os resultados petrográficos e geoquímicos acerca do Tonalito Samambaia e do Anfíbolito Candeias, discutidos acima, permitem concluir que estas duas suítes não apresentam termos petrográficos intermediários entre si, tratando-se, portanto, de duas suítes magmáticas distintas. O caráter não-cogenético destas suítes está, de certa forma, confirmado pelos dois agrupamentos distintos de idades Sm-Nd (TDM; Tabela 1). Enquanto o Tonalito Samambaia mostra idades Sm-Nd da ordem de 2940 e 2800 Ma, o Anfíbolito Candeias tem uma idade da ordem de 2680 Ma (Carneiro *et al.* 1995; Carneiro *et al.* 1996; Teixeira *et al.* 1996). O metamorfismo ocorrido no Anfíbolito Candeias, situado no limite entre a fácies xisto verde alto a anfíbolito baixo, foi um processo restrito em termos regionais, porém amplo e eficaz na transformação dos protólitos desta suíte. Este processo foi favorecido pela existência das zonas de fraqueza e pelos próprios planos de descontinuidade crustal por onde o magma tholeiítico, responsável pela geração dos protólitos do Anfíbolito Candeias, ascendeu crosta acima. A concentração do fluxo de fluidos, nestes planos, favoreceu as transformações metamórficas no protólito do Anfíbolito Candeias. No caso do Tonalito Samambaia esta transformação metamórfica foi dificultada, não só pela características texturais deste granitóide (tipicamente maciço), como também, pela ausência de descontinuidades estruturais por onde o fluxo de fluidos pudesse ter sido canalizado. Finalmente, fica claro que a atuação do Evento Transamazônico, no âmbito do Complexo Metamórfico Bonfim e, por conseguinte, no Quadrilátero Ferrífero, tem um caráter heterogêneo do ponto de

vista de seu regime tectono-metamórfico. Por isto, é possível encontrar, no Complexo Metamórfico Bonfim, o registro de idades U-Pb arqueanas nas titanitas do Tonalito Samambaia, o que não acontece, por exemplo, em outros domínios da crosta sílica do Quadrilátero Ferrífero, onde titanitas de gnaisses arqueanos do Complexo Belo Horizonte (Figura 1) forneceram idades U-Pb proterozóicas (Noce 1995).

Metodologia As análises químicas em rocha total foram realizadas no GEOLAB/Geosol com amostras em duplicata para o controle dos resultados analíticos. Os métodos empregados foram os seguintes: Fluorescência de Raios-X (por fusão da amostra com tetraborato de Li) em Al, Ca, e Fe^(total), Si, Mg, P, Cr e Ti; Fluorescência de Raios-X (pó prensado) em Ba, Cl, Cs, S, Nb, P, Rb, Sr, Y e Zr; Absorção Atômica em K, Mg, Mn, Na e Pb; Espectrografia Óptica em

Zn, Cu, Co, Sc, Ni e V; Titulação (com permanganato de K) em Fe²⁺; Espectrometria de Plasma nos elementos de terras raras (RÉE). Os erros estimados nestes procedimentos analíticos são da ordem de 1% para Fluorescência de Raios-X (fusão); 5% para Fluorescência de Raios X (pó prensado); 3% para Absorção Atômica; 5% para Espectrografia Óptica e Espectrometria de Plasma.

Agradecimentos Os autores agradecem às seguintes instituições pelo apoio financeiro e laboratorial: CNPq, FAPEMIG, CEPEGEO/USP, GEOTOP/UQAM/Montreal, CPQ/DEGEO/EM/UFOP, GEOLAB/GEOSOL. Agradecimentos especiais à Beatriz Baeta Mol (CEEL) e Rinaldo Afrânio Fernandes (Totó) pela editoração e confecção dos desenhos e, finalmente, aos dois revisores anônimos que muito contribuíram para clareza deste relato.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, D. & KARL, F. - 1972 -Experimental studies on the formation of inclusions in plagioclases from metatonalites, Hohe Tauern, Austria (lower temperature stability limit of the paragenesis anorthite plus potash feldspar). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **35**:11-21.
- BRAUN, E. - 1974 -Mikrosondenuntersuchungen von Saussuriten in Abhängigkeit vom Metamorphosegrad und vom geochemischen Milieu. *Contr. Mineral. Petrol.*, **46**:301-327.
- CARNEIRO, M. A. -1992 -O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais): Litoestratigrafia e Evolução Geológica de um Segmento de Crosta Continental do Arqueano. São Paulo, 233p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo).
- CARNEIRO, M. A.; TEIXEIRA, W. - 1993 -Geoquímica e geocronologia dos diques máficos Precambrianos do Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional, região meridional do Craton do São Francisco, Brasil. In: SEMANA DE GEOQUÍMICA, IX; CONGRESSO GEOQUÍMICO DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA., II, Porto, 1993. *Memórias...* Porto, p. 15-16.
- CARNEIRO, M. A.; JORDT-EVANGELISTA, H.; TEIXEIRA, W.; CUNHA, E. M. -1994 - Tonalito Arqueano com textura ígnea preservada nos terrenos *granito-greenstone* do Quadrilátero Ferrífero. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA., 38, Camboriú, 1994. *Boletim de Resumos Expandidos...* Camboriú, SBG, **1**:81-82.
- CARNEIRO, M. A.; NOCE, C. M.; TEIXEIRA, W. - 1995 - Evolução po. icíclica do Quadrilátero Ferrífero: uma análise fundamentada no conhecimento atual da geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica Sm-Nd. *Rev. Escola de Minas*, **48**(3):264-273.
- CARNEIRO, M. A.; TEIXEIRA, W.; NOCE, C. M.; FERNANDES, R. A. - 1996 - Archean growth processes in the Quadrilátero Ferrífero: A geochronological U-Pb and Sm-Nd approach to the Rio das Velhas Event (2780 - 2700 Ma). In: Simpósio de Terrenos Arqueanos da Plataforma Sul-Americana. Brasília. 1996. *Anais ...* Brasília, SBG, p. 59 e 60.
- CONDE, K. C. - 1981 - *Archean greenstone belts*. 1 ed. Amsterdam, Elsevier. 434p.
- COX, K. G.; BELL, J. D.; PANKHURST, R. J. -1979 - *The interpretation of Igneous Rocks*. 1 ed. London, George Allen & Unwin, 450p.
- DORR II, J. Van N. - 1969 - Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S G.S. Professional Paper*, **641**(A), 110p.
- GOLIA, A.; CARNEIRO, M. A.; OLIVEIRA, C. G. de -1996 - Meta-conglomerados da região de São Bartolomeu, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Natureza, área fonte e implicações tectônicas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA., 39, Salvador, 1996. *Anais...* Salvador, SBG.
- JORDT-EVANGELISTA, H., ALKMIM, F. F., MARSCHAK, S. - 1993a - Transformações mineralógicas e microestruturais do Granito Mamona (Complexo Metamórfico Bonfim), na zona de cisalhamento do contato com o Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, MG. In: SNET, IV, Belo Horizonte, 1993. *Anais...* Belo Horizonte, SBG, Núcleo MG, Boi. 12, p. 246-250.
- JORDT-EVANGELISTA, H., CARNEIRO, M. A., LINDENBERG, S. F. - 1993b - Variações químicas do Granito Mamona (Complexo Metamórfico Bonfim), na zona de cisalhamento do contato com o Supergrupo Minas, Quadrilátero Ferrífero, MG. In: Simp. Geol. Minas Gerais, VII, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte, SBG, Núcleo MG, Boi. 12, p. 108-111.
- LADEIRA, E. A. -1985 - Metalogênese do Ouro na Mina de Morro Velho e no Distrito de Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: *Contribuições à Geologia e à Petrologia*. Belo Horizonte, CBMM. p. 95-151 (Núcleo de Minas Gerais, SBG, Boletim Especial).
- MACHADO, N. & CARNEIRO, M. A. - 1992 - U-Pb evidence of Late Archean tectonothermal activity in southern São Francisco shield, Brazil. *Can. J. Earth Sciences*, **29**:2341-2346.
- MASSUDA, A.; NAKAMURA, N.; TANAKA, T. -1973 - Fine structures of mutually normalized rare-earth pattern of chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **36**:379-382.
- NOCE, C. M. -1995 - *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. São Paulo, 128p. (Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo).
- RUMBLE, D. - 1989 - Evidences of fluid flow during regional metamorphism. *Eur. J. Mineral.*, **1**:731-737.
- SCHORSCHER, H. D.; SANTANA, F. C.; POLÓNIA, J. C. & MOREIRA, J. M. P. - 1982 - Quadrilátero Ferrífero -Minas Gerais State: Rio das Velhas Greenstone Belt and Proterozoic Rocks. In:-International Symposium on Archean and Early Proterozoic Evolution and Metallogenesis, Salvador, 1982. *Excursion Annex...* Salvador, SBG. 43p.
- TEIXEIRA, W.; CARNEIRO, M. A.; NOCE, C. M.; MACHADO, N.; S ATO; TAYLOR, P. N. -1996 - Pb, Sr and Nd isotope constraints on the Archean evolution of gneissic-granitoid complexes in the southern São Francisco Craton, Brasil. *Precambrian Res.*, **78**:151-164.

Manuscrito A886

Recebido em 15 de novembro de 1996

Revisão dos autores em 15 de abril de 1997

Revisão aceita em 15 de junho de 1997