GRANADAS NOS GRANULITOS DE SALVADOR, BAHIA: DISCUSSÃO SOBRE RELAÇÕES ENTRE SUA VARIAÇÃO QUÍMICA E REAÇÕES METAMÓRFICAS

G. P. SHIGHINOLFI* e SHIGUEMI FUJIMORI**

ABSTRACT Some granulites from the Farol da Barra in Salvador, Bahia, are very rich in garnets. These garnets show appreciable variation in their chemical composition, mainly in the Mg, Fe and Mn contents. This variation is better explained by local differential pressures of the oxygen and water.

INTRODUÇÃO Recentemente, um dos autores (Fujimori, 1968) estudou uma ocorrência de rochas metamórficas situada no Farol da Barra em Salvador, Bahia. Além de um mapeamento minucioso, esse autor estudou as associações mineralógicas apresentadas por várias rochas pertencentes a uma mesma fácies metamórfica. Naquele trabalho foram considerados três principais tipos de rochas: granulitos félsicos constituídos de numerosas e diferentes associações mineralógicas; granulitos básicos do tipo charnockítico; metabasitos.

Com base na composição mineralógica e nas observações de campo, principalmente por essas rochas se apresentarem em camadas de composições diferentes, sugeriu-se como rocha original para os granulitos félsicos, arenitos mais ou menos arcóicos, enquanto que, para os máficos, uma mistura de sedimentos argilosos e calcário-magnesianos.

A grande heterogeneidade da paragênese mineral e a presença na mesma rocha de minerais de gerações diferentes (biotitas e granadas) levaram o autor a admitir uma sucessão de vários eventos polimetamórficos. Particularmente, parece evidente que, após um metamorfismo regional que atingiu a fácies granulítica, as rochas sofreram um fenômeno de metamorfismo retrógrado, seguido posteriormente por um novo episódio de metamorfismo crescente até novamente a fácies do granulito. Tais fenômenos são evidentes e confirmados pelas coroas de reação de cordierita em torno de granadas, pela coexistência de biotitas de composição diferente provavelmente, e pela transformação da biotita para granada ou vice-versa.

O presente trabalho apresenta dados químicos sobre composição de sete amostras de granulitos, das granadas correspondentes e de um número limitado de biotitas dessas mesmas rochas. Objetiva o estudo das relações entre composição das fases e as composições mineralógica e química das rochas envolvidas. Discutem-se os significados das variações eventuais apresentadas pelas granadas em relação às reações metamórficas.

Descrição petrográfica Na Fig. 1 estão relacionados os pontos de amostragem no Farol da Barra. As suas características petrográficas estão resumidas na Tab. I. Como se pode observar, seis amostras são granulitos félsicos típicos e apresentam associação mineralógica constituída por quartzo-plagioclásio-pertita-sillimanita-granada-biotita. De acordo

*Pesquisador visitante do Instituto de Geociências da UFBA, 1969

**Departamento I do Instituto de Geociências da UFBA

Figura 1 — Mapa de localização das amostras

Tabela I — Composição mineralógica e classificação dos granulitos do Farol da Barra, Salvador, Bahia

Amostra	Composição mineralógica	Tipo	Observações
FB 1	Quartzo-plagioclásio-ortoclásio-cordierita-pertita-biotita-granada-sillimanita-espinélio	khondalito	Dois tipos de plagioclásio estão presentes. Coroas de reação em torno de granada
FB 2	Quartzo-plagioclásio-ortoclásio-cordierita-pertita-biotita-granada-sillimanita-espinélio	khondalito	
FB 3	Quartzo-plagioclásio-ortoclásio-pertita-biotita-sillimanita-granada-espinélio-cordierita	khondalito	A maioria da granada está digerida por biotita. Metamorfismo retrógrado está evidente. A biotita pode ser atribuída a gerações diferentes
FB 4	Quartzo-plagioclásio-pertita-biotita-granada-espinélio	khondalito	Às vezes a granada é geneticamente posterior à biotita
FB 5	Quartzo-plagioclásio-granada-biotita-pertita-ortopiroxênio-(clorita)	charnockito	
FB 6	Quartzo-plagioclásio-pertita-ortoclásio-biotita-sillimanita(?)-granada	khondalito	
FB 7	Quartzo-plagioclásio-pertita-antipertita-biotita-sillimanita-granada-espinélio-cordierita-coríndon	khondalito	O espinélio é incorporado em cristais de granada. A biotita pode ser atribuída a gerações diferentes

com a terminologia usual, essas rochas podem ser chamadas khondalitos (Walker, 1902; Subramanian, 1959; etc.).

A composição mineralógica entre as várias amostras parece oscilar principalmente na abundância relativa do par biotita-granada, conforme a Tab. III. Essa variação será discutida posteriormente ao relacionar composição de fases e o grau metamórfico.

A amostra FB 5 apresenta uma associação mineralógica constituída de quartzo, plagioclásio e ortopiroxênio, principalmente, que é típica do grupo do charnockito.

RESULTADOS ANALÍTICOS E DISCUSSÃO As análises relativas às rochas e minerais examinados (7 granadas e 3 biotitas) estão registradas na Tab. II. Nessa tabela encontram-se também os valores do parâmetro $m \left(m' = \frac{\text{MgO}}{\text{MgO} + \text{FeO}} \right)$ útil para a discussão dos resultados.

De maneira geral, as rochas apresentam alto conteúdo de Al e as características mais significativas são as variações de Si, Al e K nas amostras, enquanto que os outros elementos permanecem aproximadamente constantes, exceto no charnockito FB 5.

O conteúdo de Ca foi baixo em todos os granulitos félsicos como era esperado, de vez que as rochas se originaram de rocha inicial do tipo arenito arcóxico. A amostra de charnockito difere dos félsicos principalmente pelo conteúdo maior de Ca, Mg e Fe.

As composições de granadas, biotitas e de rochas envolventes foram registradas no diagrama (Ca + Mn)–(Fe ferroso)–(Mg) e os minerais e as respectivas rochas foram ligados por *tie-lines*. O conteúdo de (Mn + Ca) (praticamente conteúdo de Ca) nas rochas é sempre alto e apresenta algumas variações, enquanto que, na granada, é limitado e mais constante. Isso demonstra que Ca entra preferencialmente em outros minerais, provavelmente plagioclásio.

Tabela II — Resultados analíticos

	FB 1		FB 2		FB 3		FB 4			FB 5		FB 6			FB 7		
	rc	gr	rc	gr	rc	gr	rc	gr	bio	rc	gr	rc	gr	bio	rc	gr	bio
SiO ₂	54,77		63,05		56,52		60,39			59,53		74,53			50,66		
TiO ₂	0,80		0,89		1,17		0,89			1,08		0,33			1,06		
Al ₂ O ₃	23,53		19,87		22,57		17,16			15,91		9,45			23,11		
Fe ₂ O ₃	1,43	1,90	0,61	1,33	0,86	0,47	2,30	0,95	1,05	2,05	2,72	2,02	2,54	0,64	2,44	1,45	1,62
FeO	6,48	23,69	5,65	21,73	4,90	22,85	6,36	24,64	10,05	7,30	25,48	6,10	25,55	10,74	8,66	22,50	8,31
MnO	0,16	0,72	0,12	0,46	0,17	2,03	0,19	0,87	0,03	0,13	0,66	0,08	0,33	0,02	0,26	0,79	0,04
CaO	2,55	1,59	1,51	1,35	2,30	1,44	3,62	0,96	0,56	4,69	1,73	1,13	1,40	0,50	2,45	1,38	0,57
MgO	4,55	7,85	2,94	8,82	4,53	6,72	4,15	8,75	13,68	5,22	7,44	3,12	8,44	12,18	5,10	9,50	13,18
Na ₂ O	1,29		0,65		1,83		2,25		0,57	0,51		2,71		0,45	1,99		0,79
K ₂ O	3,77		3,24		3,00		1,24		8,38	1,30		0,32		7,20	4,01		7,95
H ₂ O ⁺	1,21		0,46		1,30		0,51			1,68		0,53			0,51		
H ₂ O ⁻	0,31		0,18		0,20		0,12			0,51		0,12			0,09		
Total	99,85		99,17		99,35		99,13			100,11		100,44			100,34		
m	0,556	0,371	0,481	0,420	0,622	0,344	0,538	0,387	0,708	0,560	0,342	0,476	0,370	0,668	0,512	0,429	0,738

rc = rocha; gr = granada; bio = biotita; $m = \frac{\text{MgO}}{\text{MgO} + \text{FeO}}$

Figura 2 - Variações na composição de rochas, granadas e biotitas

Considerando a distribuição aleatória de amostras de rochas e granadas, pode-se afirmar que a composição da granada praticamente não é afetada pela composição da rocha. Particularmente, os valores de m das granadas (Tab. III) independem inteiramente dos valores de composição das rochas.

Os três pares de granada e biotita coexistentes apresentam *tie-lines* paralelas ou sub-paralelas, demonstrando que a distribuição de Mn, Fe, Ca e Mg entre biotita e granada nas várias amostras é controlada por um mesmo princípio. Essa distribuição é considerada por Atherton (Atherton, 1968) devida ao fato de várias associações, às quais pertencem os pares biotita-granada, serem caracterizadas pelo mesmo grau de metamorfismo. Nessas condições, como foi observado por vários autores (Kretz, 1959; Lambert, 1959; Miyashiro, 1956; etc.), variações na composição da rocha encaixante não afetam a distribuição de elementos entre as duas fases.

As granadas pertencem à série pobre em Ca, piralspitas, de acordo com Miyashiro (Miyashiro, 1953), e as amostras apresentam marcada variação, principalmente nos conteúdos de Mg, Fe^{++} e, às vezes, Mn. O Ca se mantém, ao contrário, muito constante a nível baixo ou, se varia, é dependendo do conteúdo de Ca da rocha. Esse é o caso, por exemplo, da amostra FB 5.

No diagrama MnO—FeO—MgO (Fig. 3) estão registradas as granadas e os campos de estabilidade de granadas, de acordo com diferentes ambientes metamórficos propostos por Miyashiro (Miyashiro, 1953). Todas as amostras caem no campo do granulito, mas,

Figura 3 — Composição de granadas e campos de estabilidade em vários ambientes metamórficos

como foi observado anteriormente, elas mostram uma variação progressiva e regular, principalmente na relação Mg/Fe, que se reflete nos diferentes valores de m . O conteúdo de Mn apresenta pequena variação nas seis amostras, enquanto que, na amostra FB 5, aumenta de maneira abrupta e independentemente da composição de rocha.

É bem conhecido que o valor da relação Mg/Fe na granada depende do grau de metamorfismo das rochas envolvidas quando essas constituem uma série estritamente isoquímica. Estudos de vários autores (Miyashiro, 1953; Engel e Engel, 1960; Froese, 1963; Shighinolfi, 1966; etc.) sobre grandes áreas de metamorfismo regional concordam que, nas piralspitas, o Mg aumenta em relação ao Fe com o metamorfismo crescente. Portanto os valores de Mg/Fe podem ser considerados como uma escala termométrica efetiva, embora Saxena (Saxena, 1968) faça limitações a esse respeito (principalmente isoquimismo perfeito na série de rochas e controle de concentração de Ca na granada).

No caso em estudo, diferentes valores de Mg/Fe das granadas não refletem a variação no grau de metamorfismo das rochas encaixantes, pois é muito difícil admitir que sobre uma área tão limitada a pressão e temperatura metamórficas tenham agido diferentemente.

Variações na composição de granada de uma mesma localidade ou de uma mesma rocha submetida a um gradiente metamórfico foram encontradas por Hutton (Hutton, 1962), mas, mesmo nesse caso, isso é inexplicável, pois as granadas normalmente apresentam composição constante em áreas extensas que foram metamorfisadas a um mesmo grau (Phinney, 1963).

Verificado que a composição (e suas variações) da granada é, em grande parte, independente da composição da rocha ou das condições metamórficas de temperatura e pressão, permanece o controle pela influência da composição mineralógica das rochas. Para isso, a análise modal limitada à determinação de quantidades de biotita e granada foi efetuada em todas as amostras. A Tab. III registra os valores de m na granada e nas rochas bem como as quantidades relativas de biotita e granada. É interessante observar a relação estreita entre composição de granada e a relação biotita/granada da rocha. O aumento da quantidade de granada em relação à da biotita é acompanhado pelo acréscimo do conteúdo de Mg na granada.

Tabela III — Valores de m das granadas e das rochas e proporções de biotita e de granada

Amostra	m		biotita + granada = 100		porcentagem na rocha	
	granada	rocha	biotita, %	granada, %	biotita, %	granada, %
FB 5	0,342	0,560	90	10	13,9	1,5
FB 3	0,344	0,622	87	13	25,6	3,8
FB 1	0,371	0,556	47	53	16,6	18,8
FB 4	0,387	0,538	34	66	8,4	16,6
FB 6	0,370	0,476	32	68	9,9	20,6
FB 2	0,420	0,481	24	76	5,9	18,6
FB 7	0,429	0,512	24	76	8,2	25,5

Observações: biotita e granada em porcentagem volumétrica; $m = \frac{\text{MgO}}{\text{Mg} + \text{CaO}}$

Observações microscópicas mostraram, como dissemos antes, a presença de reações entre biotita e granada praticamente em todas as amostras. Essas considerações permitem afirmar que a composição das fases analisadas depende estreitamente do grau da possível reação (Kretz, 1964)

biotita + sillimanita — almandina + ortoclásio.

Mas, segundo de Waard (de Waard, 1965), os dois lados dessa reação representam associações estáveis em fácies metamórficas distintas. Permanece, portanto, uma explicação do significado das variações na composição da granada e nas associações mineralógicas.

Uma possível explicação seria admitir que um metamorfismo retrógrado tivesse atuado seletivamente em diferentes partes da rocha e influenciando diferencialmente no grau de reações metamórficas observadas. Granadas de rochas metamórficas granulíticas que sofreram metamorfismo retrógrado foram investigadas por Drugova e Bugrova (Drugova e Bugrova, 1964). Com efeito, em condições retrometamórficas, as granadas (e também biotitas) tornam-se mais ferríferas com diminuição da relação Mg/Fe. Mas isso é relacionado pela reação

granada + feldspato potássico — biotita + cianita

Nessa reação, a associação (biotita + cianita) é estável nas condições de retrometamorfismo.

No presente estudo, ao contrário, a maioria das granadas ricas em Fe parece ser formada tardiamente pela transformação da biotita.

Para explicar o problema levantado pelas variações na composição de granada, pode-se considerar uma outra possibilidade. A amostra FB 3 apresenta uma quantidade

mais limitada de granada em relação a outras amostras (exceto FB 5, que apresenta, por outro lado, uma paragênese mineralógica diferente) e essa granada parece claramente ser de neoformação, provavelmente derivada da biotita. Sua composição química revela um conteúdo alto em Mn (2,03% MnO), típico de granadas de pegmatitos ou de rochas de baixo grau de metamorfismo. Sobre o papel do Mn nas granadas de rochas metamórficas de alto grau existem muitos dados disponíveis.

Durante o metamorfismo regional, por exemplo, as piralspitas mostram claramente um decréscimo no conteúdo de Mn com o aumento do grau de metamorfismo, conforme foi demonstrado por Engel e Engel (Engel e Engel, 1960), Lambert (Lambert, 1959), Sturt (Sturt, 1962) e outros autores. A variação de Mn nas granadas, entretanto, tem sido atribuída a outros fatores. Clifford (Clifford, 1960) e Atherton (Atherton, 1965) concluíram que a composição global da rocha tem uma influência maior no conteúdo de Mn da granada do que o grau de metamorfismo.

Miyashiro (Miyashiro, 1953), considerando distintas séries de granada, admitiu que granadas ricas em Mn podem ser formadas sob condições de baixa pressão, em conformidade com Ramberg (Ramberg, 1952). Chinner (Chinner, 1960) interpretou as variações de Mn nas granadas da zona de sillimanita como função da pressão de oxigênio na rocha.

Com base nessas considerações, parece provável que a granada da amostra FB 3 (seu alto conteúdo em Mn não foi afetado pela composição da rocha encaixante) formou-se sob condições de baixa pressão hidrostática e/ou de alta fugacidade de O_2 (e também de H_2O). A presença de condições diferentes de pressão de oxigênio e de vapor d'água em áreas limitadas pode ser aceita e tal possibilidade foi investigada em vários trabalhos (Hounslow *et al.*, 1967).

Isso pode ocorrer especialmente, como de fato é no caso em estudo, quando a estrutura e as camadas alternadas de rochas de composição diferente podem atuar diferencialmente na difusão de oxigênio e fases gasosas em diferentes direções. Uma variação gradual da pressão de oxigênio e d'água pode afetar fortemente uma associação em que estão presentes fases hidroxigenadas como a biotita (Eugster, 1959; Thompson, 1957; Annersten, 1968), explicando assim as quantidades relativas variáveis de biotita e granada em rochas com a mesma composição e mesmo grau de metamorfismo.

A respeito ainda de granada rica em Mn, outras considerações podem ser feitas. Essa granada apresenta um fator de concentração de Mn muito alto em relação à rocha. Devido a biotita, a partir da qual a granada deriva, apresentar uma quantidade desprezível de Mn, um mecanismo de migração de Mn através da rocha pode ser admitido como propiciador dessa concentração nas granadas neoformadas, que apresentam uma tendência bem conhecida de concentrar Mn em relação a outros minerais.

É claro que um elevado conteúdo gasoso (principalmente oxigênio e água) deve favorecer a migração de elementos e isso corrobora a hipótese de que as variações em associações mineralógicas e nas granadas dependem de variações locais de pressão de oxigênio e de água.

CONCLUSÕES 1) As granadas de granulitos de um mesmo afloramento apresentam variações na composição, principalmente no conteúdo de Mg, Fe, e Mn.

2) A maioria das variações independe da composição global da rocha.

3) A composição das granada e da biotita (particularmente a relação Mg/Fe) revela que as duas fases apresentam uma distribuição de elementos que se aproximam do equilíbrio.

4) A relação Mg/Fe da granada está estreitamente ligada com a abundância relativa de biotita e granada na rocha encaixante e o conteúdo de Mg cresce com a quantidade de granada.

5) Várias hipóteses são discutidas para explicar as variações na composição das granadas e as variações nas associações mineralógicas: variação no grau de metamorfismo regional, influência da composição global da rocha, queda local de pressão hidrostática, pressão diferencial local de oxigênio e d'água. Essa última hipótese parece ser a mais provável.

MÉTODOS ANALÍTICOS As amostras foram moídas até uma granulometria de areia e os minerais foram separados por processos clássicos de líquidos pesados, em separador isodinâmico Frantz. Do concentrado de mineral, somente os grãos relativamente puros foram selecionados sob microscópio binocular.

Os métodos que seguem foram usados para as análises químicas.

1) Si, Al e Ti. Análise rápida de silicatos de Shapiro e Brannock (Shapiro e Brannock, 1956).

2) Mn, Fe total, Mg, Ca, Na, K. Espectrografia de absorção atômica utilizando espectrofotômetro Perkin Elmer, mod. 303. Os detalhes do método são descritos por Shighinolfi (Shighinolfi, 1969).

3) Fe ferroso. Semimicroanálise por Meyrowitz (Meyrowitz, 1963).

Agradecimentos Os autores apresentam os seus agradecimentos à Professora Yeda de Andrade Ferreira, Coordenadora do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, pelo apoio proporcionado.

BIBLIOGRAFIA

- ANNERSTEN H. — 1968 — A mineral chemical study of a metamorphosed iron formation in Northern Sweden, *Lithos.*, **1**: 374-397
- ATHERTON, M. P. — 1968 — The variation in garnet, biotite and chlorite composition in medium grade rocks from the Dalradian, Scotland, with particular reference to the zonation in garnet, *Contr. Miner. Petrol.*, **18**: 347-71
- CHINNER, C. A. — 1960 — Pelitic gneisses with varying ferrous-ferric ratios, Glen Glova Angus, Scotland, *Jour. Petrol.*, **1**: 178-217
- CLIFFORD, T. N. — 1960 — Spessartine and magnesium biotite in cotecule-bearing rocks from Mill Hollow, Alstead Township, New Hampshire, USA, *Neues. Jb. Miner. Geol. Abh.*, **94**: 1369
- DRUGOVA, G. M., e BUGROVA, V. D. — 1964 — Garnets of the granulite facies of the Aldan Shield under conditions of polymetamorphism, *Geoch. Internat.*, 365-371
- ENGEL, A. E. J. e ENGEL, C. G. — 1960 — Progressive metamorphism and granization of the major paragneiss, northwest Adirondack Mountains, New York, part II, *Bull. Geol. Soc. Am.*, **71**: 1-58
- EUGSTER, H. P. — 1959 — Reduction and oxidation in metamorphic rocks, in P. H. Abelson, ed., *Researches in Geochemistry*, John Wiley and Sons, New York, 397-426
- FROESE, E. — 1963 — A chemical study of garnets from the Stony Rapids area, Saskatchewan, *Can. Miner.*, **7**: 698-712
- FUJIMORI, S. — 1968 — Granulitos e charnockitos de Salvador, Bahia, *An. Acad. Bras. Ciên.*, **40**: 181-202
- HOUNSLOW, A. W. e MOORE, J. M. Jr. — 1967 — Chemical petrology of Grenville schists, Ferleigh, Ontario, *Jour. Petrol.*, **8**: 1-28
- HUTTON, C. O. — 1962 — Composition of some garnets in low-grade schists, *Trans. R. Soc. N. Z.*, **1**: 129
- KRETZ, R. — 1959 — Chemical study of garnet, biotite, and hornblende from gneisses of south-western Quebec with emphasis on distribution of elements in coexisting minerals, *Jour. Geol.*, **67**: 371-402

- KRETZ, R. — 1964 — Analysis of equilibrium in garnet-biotite-sillimanite gneisses from Quebec, *Jour. Petrol.*, **5**: 1-20
- LAMBERT, R. St. J. — 1959 — The mineralogy and metamorphism of the Moine Schists of the Morar and Knoydart districts of Inverness-shire, *Trans. R. Soc., Edimb.*, **63**: 553-588
- MEYROWITZ, R. — 1963 — A semimicro procedure for the determination of ferrous iron in nonrefractory silicate minerals, *Amer. Miner.*, **48**: 340-347
- MIYASHIRO, A. — 1953 — Calcium-poor garnet in relation to metamorphism, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **4**: 179-208
- MIYASHIRO, A. — 1956 — Data on garnet-biotite equilibria in some metamorphic rocks of the Ryoke zone, *Jour. Geol. Soc. Jap.*, **62**: 700
- PHINNEY, W. C. — 1963 — Phase equilibria in the metamorphic rocks of St. Paul Island and Cape North, Nova Scotia, *Jour. Petrol.*, **4**: 90-130
- RAMBERG, H. — 1952 — The origin of metamorphic and metasomatic rocks, Univ. of Chicago Press, Chicago, USA
- SAXENA, S. K. — 1968 — Distribution of elements among coexisting minerals and the nature of solid solution in garnet, *Am. Miner.*, **53**: 994-1014
- SHAPIRO, L. e BRANNOCK, W. W. — 1956 — Rapid analysis of silicate rocks, *U. S. Geol. Surv., Bull.*, 1035-C
- SHIGHINOLFI, G. P. — 1967 — Metamorfismo regionale di alto grado: i granati. Parte I, *Period. Miner.*, **36**: 485-513
- SHIGHINOLFI, G. P. — 1969 — Determination of some major and trace elements in new standard rock samples by atomic absorption spectroscopic routine analysis, *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem. A*, **76**: 312-325
- STURT, B. A. — 1962 — The composition of garnets from pelitic schists in relation to the grade of regional metamorphism, *Jour. Petrol.*, **3**: 181-191
- SUBRAMANIAN, A. P. — 1959 — Charnockites of the type area near Madras, a reinterpretation, *Am. Jour. Sci.*, **257**: 321-353
- THOMPSON, J. B. Jr. — 1957 — The graphical analysis of mineral assemblages in pelitic sediments, *Amer. Miner.*, **42**: 842-858
- WAARD, D. de — 1965 — A proposed subdivision of the granulite facies, *Am. Jour. Sci.*, **263**: 455-461