

CARATTERISTICHE GEOCHIMICHE DI CHARNOCKITI IGNEE DEL COMPLESSO ARCHEANO DI JEQUIÉ (BAHIA, BRASILE)

G. PAOLO SIGHINOLFI

Istituto di Mineralogia e Petrografia, Università di Modena

BARBARA KRÖNBERG

Department of Geology, University of Western Ontario, London, Canada

M. ALBA TANNER DE O.

Instituto de Geociencias, Universidade Fed. da Bahia, Salvador, Bahia, Brasile

RIASSUNTO. — Fra i terreni metamorfici di alto grado costituenti il substrato Precambriano dello Stato di Bahia (Brasile) ricerche petrologiche e geochimiche hanno rivelato la presenza di un complesso di età Archeana ($\approx 2,7$ Ga), denominato complesso di Jequié, costituito da rocce riferibili ad una serie charnockitico-mangeritica. Le rocce del complesso presentano un chimismo essenzialmente granitico e si differenziano dalle comuni rocce granulitiche delle formazioni circostanti per l'assenza di impoverimento in elementi mobili ed incompatibili. Al contrario, alcune rocce del complesso caratterizzate da un contenuto più elevato in ferro ed in alcuni elementi siderofili (charnockiti ricche in Fe) sono fortemente arricchite in elementi quali Rb, Y, Zr, terre rare, etc. rispetto a comuni rocce granitiche.

Per interpretare il chimismo generale delle rocce del complesso e l'arricchimento in elementi mobili ed incompatibili nei termini a contenuto elevato in elementi siderofili viene prospettata l'ipotesi che la serie charnockitica-mangeritica di Jequié derivi dalla cristallizzazione di un liquido di composizione granitica sottoposto a fenomeni di frazionamento sotto condizioni di pressione parziale di H_2O molto ridotta. In tali condizioni la cristallizzazione di fasi idrate e di biotite in particolare verrebbe ritardata con conseguente concentrazione nei liquidi più frazionati di ferro ed elementi incompatibili.

Viene proposta un'interpretazione generale per le così dette granuliti « non impoverite » basata sull'assunzione di un metamorfismo isochimico o quasi isochimico per rocce derivate da materiale igneo a composizione granitica.

ABSTRACT. — Within high grade metamorphic terrains constituting the Precambrian basement of Bahia (Brazil), petrological and geochemical studies revealed the existence of an Archean (≈ 2.7 Ga) complex formed by charnockitic-mangeritic rocks of probable igneous derivation. Chemically, the rocks

of the complex are essentially granitic and are peculiarly undepleted in mobile and incompatible elements with respect to common granulite facies rocks. In addition, samples characterized by higher contents of iron and of some siderophilic elements (high-Fe charnockites) are strongly enriched in elements like Rb, Y, Zr, REE etc. with respect to granitic rocks.

To explain the compositional features of the Jequié rocks and in particular of the high-Fe charnockites the hypothesis is prospected that the charnockite-mangerite rock suite derives from the crystallization of a granitic liquid that underwent fractionation under very low H_2O partial pressure. Under these conditions the crystallization of hydrous phases and in particular of biotite tends to be delayed and, consequently, iron and siderophilic elements accumulate together with incompatible elements in the more fractionated liquids.

A general interpretation for the so called « undepleted » granulites is put forwards that is based on the assumption that isochemical or quasi-isochemical metamorphism occurs in the case of granitic material of igneous derivation.

Introduzione

Rocce di facies granulitica sono relativamente diffuse in aree Precambriane di vari continenti ed in anni recenti tali rocce sono state oggetto di numerosi studi per le importanti e molteplici informazioni che esse possono fornire sulle caratteristiche della crosta continentale inferiore in epoche primitive. Per esempio, la concomitanza di episodi di metamorfismo di facies granulitica ha con-

dotto ad ipotizzare (WINDLEY, 1977) l'esistenza di gradienti geotermici genericamente più marcati in alcuni periodi dell'Archeano. Il confronto, poi, fra granuliti Precambriane e granuliti di età più recente può fornire indicazioni sulle possibili variazioni nel tempo dei fondamentali parametri chimico-fisici della crosta continentale inferiore e pertanto sull'evoluzione globale della crosta terrestre.

Le rocce granulitiche sono d'altra parte oggetto di una dibattuta controversia circa la loro effettiva importanza come fonte crostale di elementi e di fluidi. Com'è ben noto, alcuni autori ritengono che il metamorfismo di facies granulitica sia un processo essenzialmente isochimico. Secondo altri autori i processi che portano alla formazione di granuliti contribuiscono in modo determinante alla genesi di liquidi anatettici od in ogni caso alla liberazione di grandi quantità di elementi e fluidi.

Sulla base di tali presupposti, l'esistenza e le peculiari caratteristiche geochemiche di rocce granulitiche di età Archeana prese in esame da alcuni di noi in un recente studio sul segmento crostale Precambriano di Bahia, hanno suggerito l'opportunità di ulteriori considerazioni riguardo la loro genesi che verranno qui riportate.

Inquadramento geologico e note petrografiche

Le rocce riferibili al complesso Archeano di Jequié sono situate nel basamento precambriano dello Stato di Bahia nella parte nord-orientale del Brasile (13°-14° lat. S; 39°-40°15' long. O). Notizie generali sulle rocce costituenti il basamento e sulla stratigrafia Precambriana dell'area ricostruita su base geocronologica sono riportate in una serie di lavori recenti (ALMEIDA, 1977; CORDANI e IYER, 1979; WERNIK ed ALMEIDA, 1979; FIGUEREDO, 1980). Il basamento Precambriano è essenzialmente costituito da rocce di metamorfismo di alto grado fra cui predominano granuliti di tipo diverso e migmatiti. I dati geocronologici (vedere un sommario in SIGHINOLFI et al., 1981) hanno portato ad una suddivisione del Precambriano di Bahia correlabile all'esistenza di alcuni principali cicli orogenetici che può essere così sintetizzata:

<i>Archeano</i>	
Ciclo di Jequié	(0,7 ± 0,2 Ga)
<i>Proterozoico Inferiore</i>	
Ciclo Transamazzoneo	(2,0 ± 0,2 Ga)
<i>Proterozoico Medio</i>	
Ciclo Espinhaco	(1,5 ± 0,2 Ga)
<i>Proterozoico Superiore</i>	
Ciclo Brasiliano	(0,7 ± 0,2 Ga)

(Ga = 10⁹ anni)

La definizione del Ciclo di Jequié è stata ottenuta da una serie di isocrone Rb-Sr roccia totale considerando campioni di rocce granulitiche dell'area di Jequié nella parte sud dello Stato di Bahia (per la localizzazione esatta dell'area vedere SIGHINOLFI et al., 1981). Secondo opinioni correnti tale ciclo è associato alla formazione e stabilizzazione di una gran parte delle formazioni metamorfiche di alto grado di Bahia. Durante il successivo ciclo Transamazzoneo gran parte di tali formazioni hanno subito processi di ringiovanimento congiuntamente all'aggiunta al blocco crostale di nuovo materiale come testimoniato dall'esistenza nello stesso blocco di sequenze sopracrostaali con età di circa 2,0 Ga (SIGHINOLFI, 1970, 1971).

La petrografia essenziale delle rocce di Jequié è riportata in SIGHINOLFI et al., 1981). Le rocce costituenti il complesso presentano un aspetto notevolmente omogeneo se confrontato con quello delle formazioni metamorfiche di alto grado circostanti. Presentano un caratteristico colore verde-marrone legato alla spiccata colorazione scura dei minerali silicici (quarzo, feldspati). Foliazione e struttura a bande sono evidenti in talune aree del complesso, normalmente in coincidenza con alternanze di paragenesi mineralogiche di tipo diverso. Fra quest'ultime, essenzialmente sulla base del tipo di minerale femico predominante, ne sono state individuate alcune utili per una classificazione petrologica delle rocce.

1) *Rocce granitiche*. Esse presentano una foliazione abbastanza ben sviluppata che permette la loro individuazione sul terreno. Presentano granulometria fino-media con strutture strettamente equigranulari. Sono formate da quarzo, plagioclasio oligoclasico (An = 24-29), K-feldspato peritico (più raramente microclino), biotite ed in quantità

TABELLA 1

Composizione delle rocce del complesso di Jequié e di alcune serie di rocce granulitiche del basamento Precambriano di Bahia

	Rocce del complesso di Jequié			Granuliti incassanti n = 11	Granuliti Transamazzonei. n = 64
	Campo di variaz. n = 38	Fe-charnock. n = 25	Charnock. n. n = 13		
SiO ₂	61.74 - 73.68	67.89	70.46	60.95	60.70
TiO ₂	0.02 - 1.41	0.65	0.21	0.79	0.95
Al ₂ O ₃	12.41 - 16.18	13.84	15.36	17.37	15.83
Fe ₂ O ₃	0.21 - 7.84	4.85	1.90	6.61	7.82
MnO	0.01 - 0.22	0.07	0.03	0.09	0.11
MgO	0.01 - 1.43	0.59	0.45	2.75	3.02
CaO	0.33 - 4.63	2.31	1.68	4.67	5.28
Na ₂ O	2.57 - 5.12	3.02	3.78	3.53	2.28
K ₂ O	1.81 - 7.60	5.09	4.53	1.85	3.55
P ₂ O ₅	0.0 - 0.64	0.24	0.07	0.29	
Sc ppm	0.0 - 16	8.4	4.5	17.2	
V "	1.0 - 40.5	7.6	11.0	97.4	
Cr "	0.2 - 9.8	2.2	5.7	147	71
Co "	0.8 - 15	5.4	2.8	54	
Ni "	7.3 - 54.1	20.1	21.7	93.4	
Cu "	0.6 - 23.1	3.7	3.6	33.4	39
Zn "	1.6 - 77.4	39.9	15.6	42.3	94
Rb "	34.4 - 436.1	195.6	116.2	37.1	45.8
Sr "	29.0 - 540.8	134	259	338	543
Y "	2.0 - 224.8	103.9	10.2	19.4	
Zr "	24.7 - 1016	529.7	239.2	340	222
Nb "	0.2 - 54.1	19.	3.6		
Ba "	326 - 1601	879	762	725	1217
K/Rb	117 - 465	261	362	774	626

subordinata, orneblenda. Biotite ed orneblenda sono parzialmente cloritizzate.

2) *Rocce charnockitiche*. Esse presentano strutture charnockitiche (quarzo azzurro tabulare, etc.) e sono in genere costituite da circa il 25 % di quarzo, 40 % K-feldspato pertitico (micro-mesopertitico), 20 % plagioclasio (An = 21-30) e 15 % iperstene. Biotite ed orneblenda sono presenti in quantità subordinate. Mineralogicamente tali rocce presentano una stretta affinità con quelle di « plutoni » charnockitici di altre aree Precambriane (PARRAS, 1958; KLIMOV et al., 1964).

3) *Rocce granulitiche*. In tale gruppo vengono considerate rocce provenienti da

aree diverse del complesso, caratterizzate da paragenesi mineralogiche tipiche di facies granulitica ma sostanzialmente diverse dalle charnockiti precedentemente descritte. Normalmente presentano un contenuto maggiore in fasi femiche e sono caratterizzate dalla presenza di pirosseno monoclino accanto all'iperstene. L'orneblenda è pure presente in quantità subordinata. La quantità di K-feldspato (sia pertitico che microclino) è più contenuta a favore del plagioclasio (An = 18-45). Su alcuni campioni di tali rocce uno di noi (G.P. SIGHINOLFI, dati non pubblicati) ha calcolato la temperatura di cristallizzazione usando il geotermometro di WOOD e BANNO (1973). I valori calcolati (810-880° C) sono compresi nella norma per rocce di facies granulitica.

Le rocce attribuibili al complesso di Jequié non sono facilmente distinguibili sul terreno dalle altre rocce di facies granulitica del basamento circostante. In sezione sottile, tuttavia, tale distinzione è raramente problematica in quanto quest'ultime sono caratterizzate da una quantità molto maggiore di fasi femiche, da un contenuto minore in minerali di K e dall'assenza virtuale di biotite.

Chimismo delle rocce di Jequié

I dati chimici per i singoli campioni presi in esame sono stati riportati in altra sede (SIGHINOLFI et al., 1981). In Tabella 1 sono riportati i campi di variazione composizionale e la composizione media per 38 campioni di rocce di Jequié caratterizzate da paragenesi granitiche e charnockitiche. Nella stessa tabella è inclusa pure la composizione media per una serie di campioni di rocce granulitiche del basamento provenienti dai margini del complesso di Jequié. Dall'esame dei dati chimici possono trarsi le seguenti considerazioni.

1) Le rocce del complesso di Jequié caratterizzate da paragenesi granitiche non differiscono sostanzialmente da quelle con paragenesi charnockitiche. Si tratta di rocce a composizione variabile fra i così detti graniti ricchi in potassio e le quarzo-monzoniti (WEDEPHL, 1969) che presentano stretta affinità con i « graniti charnockitici » (ZAKRUTKIN, 1970) presenti in altre aree stabili. Lo stretto chimismo granitico delle rocce di Jequié è evidenziato anche dalla composizione dei feldspati (fig. 1).

2) Le rocce di facies granulitica del basamento incassante presentano una composizione molto variabile ma sono in genere più basiche ($\text{SiO}_2 = 52-66\%$) delle rocce del complesso e sono caratterizzate da un chimismo prevalentemente andesitico (Tabella 1). La loro variabilità composizionale e la loro tipica giacitura a bande suggeriscono che si tratti di materiale di origine prevalentemente sedimentaria, cioè che siano appartenenti a sequenze sopracrostali costituenti parte del blocco crostale di Bahia (SIGHINOLFI, 1970).

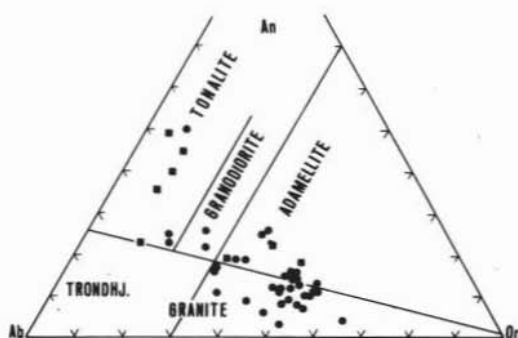


Fig. 1. — Composizione delle rocce di Jequié sul diagramma An-Ab-Or. ●: rocce del complesso; ■: rocce granulitiche del basamento incassante. I campi di composizione per le rocce intrusive sono stati delimitati di accordo con O'CONNOR (1965).

Per quanto riguarda le rocce del complesso di Jequié, al contrario, la caratteristica omogeneità, i valori di parametri geochimici quale l'indice di SHAW (1972) e le tendenze magmatiche messe in evidenza dalla rappresentazione su comuni diagrammi di differenziazione (fig. 2) sembrano comprovare la loro derivazione ignea. Collocando tali rocce nello schema classificativo usato

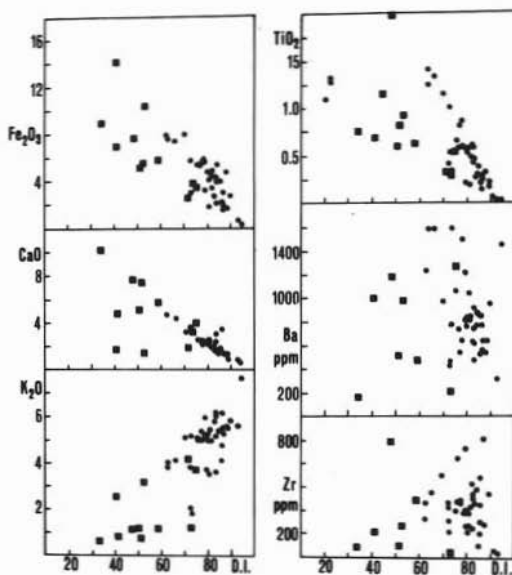


Fig. 2. — Variazione di alcuni elementi maggiori ed in tracce in funzione del contenuto normativo di $\text{Qz} + \text{Ab} + \text{Or}$ preso come indice di differenziazione. Simboli come in figura 1.

da ORMAASEN (1977) per rocce ignee cristallizzanti sotto condizione di facies granitica esse risultano in gran parte charnockiti e termini classificabili come quarzo mangeriti e mangeriti.

Per quanto riguarda gli elementi minori, le rocce di Jequié presentano campi di concentrazione molto ampi per elementi mobili ed incompatibili quali Rb (34-436 ppm), Y (2-225 ppm) e Zr (25-1016), con contenuti medi in tali elementi relativamente elevati se confrontati con quelli di altre rocce charnockitiche o di comuni graniti.

Il trattamento statistico dei dati rivela una certa correlazione positiva fra contenuto in alcuni elementi mobili ed incompatibili (Rb, Y, Zr, etc.) e contenuto in ferro ed in elementi siderofili quali Ti e V. Tale correlazione può essere evidenziata diagrammaticamente comparando tali elementi con l'in-

dice di differenziazione (fig. 3): per valori piuttosto variabili di quest'indice i campioni più ricchi in ferro ed in elementi siderofili sono invariabilmente arricchiti in elementi quali Rb, Y, Zr, Nb. Appare pertanto giu-

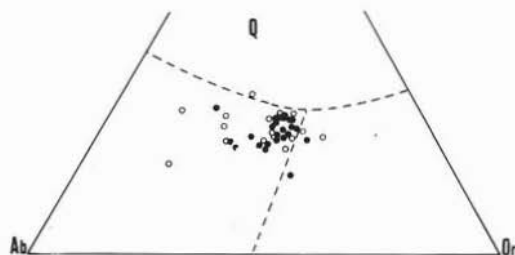


Fig. 4. — Rappresentazione delle rocce di Jequié sul diagramma Q-Ab-Or (simboli come in fig. 3). La linea cotecca disegnata mostra la composizione « minimum » del liquido per valori di $Ab/An=2,9$ e $P_{H_2O} = 4$ kb (WINKLER, 1967).

stificato distinguere due serie di campioni contrassegnati da distinte tendenze di frazionamento, gli uni denominati charnockiti « normali » e gli altri charnockiti « ricche in ferro », questi ultimi caratterizzati da un arricchimento anomalo in elementi mobili ed incompatibili. A dispetto della loro maggiore « basicità » (vedi Tabella 1) le charnockiti ricche in ferro presentano una composizione nel sistema quarzo-albite-ortoclasio più omogenea e più simile a quella del *minimum granite* di quella delle charnockiti normali (fig. 4).

Molte di queste charnockiti ricche in ferro sono caratterizzate da abbondanze in elementi a largo raggio ionico notevolmente superiori a quelle di comuni rocce granitiche (vedere per es. KOLJONEN e ROSENBERG, 1974), avvicinandosi a quelle di liquidi fortemente differenziati o peralcalini (GERASIMOVSKIY et al., 1975; SELF e GUNN, 1976). Conseguentemente in tali rocce i valori del rapporto K-Rb sono notevolmente inferiori di quelli di rocce di facies granulitica (DRURY, 1973; SIGHINOLFI, 1981) e di comuni rocce magmatiche (SHAW, 1968; LAMBERT e HOLLAND, 1974), avvicinandosi a quelli di prodotti formati durante processi pegmatitico-idrotermali (fig. 5).

Simili considerazioni possono trarsi dai dati relativi al contenuto in terre rare: i loro livelli di abbondanza nelle rocce di Jequié

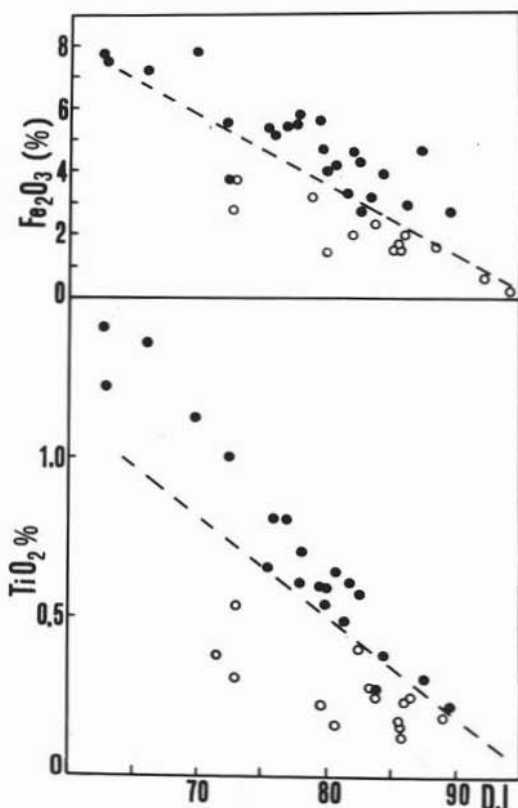


Fig. 3. — Variazione del contenuto in ferro e titanio in funzione dell'indice di differenziazione usato in fig. 2. ●: charnockiti ricche in ferro; ○: charnockiti « normali ».

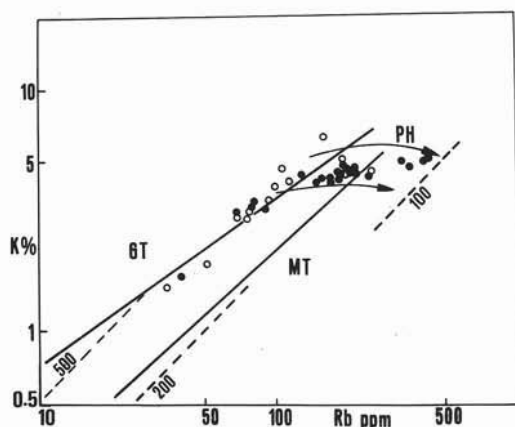


Fig. 5. — Rapporti K-Rb nelle rocce di Jequié (simboli come in fig. 3). Le rette si riferiscono a dati complessivi per alcune serie ignee e metamorfiche. GT = rocce di facies granulitica di Bahia (SIGHINOLFI, 1971); MT = rocce ignee; PH = serie pegmatitico-idrotermali (SHAW, 1968).

sono simili a quelli riscontrati in rocce derivate da liquidi fortemente differenziati (KOLJONEN e ROSENBERG, 1974; NEUMANN et al., 1977). Gli andamenti normalizzati delle terre rare in alcuni campioni di charnockiti ricche in ferro (fig. 6) mettono in evidenza una forte anomalia negativa di europio ed un rapporto terre rare leggere-terre rare pesanti piuttosto contenuto. Tali caratteristiche da un lato rendono ben evidenti le differenze fra le rocce di Jequié e molte altre rocce acide di serie calcoalcaline e toleitiche Precambriane (vedere nella vasta letteratura CONDIE e BARAGAR, 1974; O'NIONS e PANKHURST, 1974; COMPTON, 1978), e dall'altro confermano le loro affinità composizionali coi termini più differenziati di serie ignee mangeritiche-charnockitiche e con altre rocce intrusive Precambriane ricche in potassio quali le ben note plutoniti monzonitiche e quarzo monzonitiche Archeane rappresentanti fasi tardive di grandi cicli magmatettonici (STRONG e DICKSON, 1978).

L'anomalia negativa di europio in rocce ignee di composizione intermedia-acida è normalmente interpretata come dovuta ad un frazionamento dal liquido di plagioclasio in quanto tale minerale è estremamente efficiente nel separare Eu dalle altre terre rare. Il forte impoverimento in Eu riscontrato nelle rocce di Jequié suggerisce che, se esso è dovuto ad una separazione di fasi durante

il frazionamento del liquido, tale frazionamento deve essere avvenuto in condizioni di bassa fugacità di ossigeno in modo tale da determinare alti rapporti $\text{Eu}^{2+}/\text{Eu}^{3+}$ nel liquido e quindi di favorire una più efficiente rimozione di Eu da parte del plagioclasio, la cui struttura, com'è noto, favorisce Eu^{2+} (DRAKE, 1975).

Ipotesi sulle condizioni di frazionamento dei liquidi

Le caratteristiche composizionali delle rocce di Jequié e le caratteristiche geochemiche sopra descritte portano a concludere che almeno gran parte delle rocce del complesso abbiano preso origine da materiale igneo di composizione granitica fortemente arricchito attraverso processi di frazionamento in elementi mobili ed incompatibili. L'esistenza di serie di rocce granitiche compatibili con fenomeni di frazionamento di liquidi è stata documentata di frequente (vedere ad es. McCHARTHY ed HASTY, 1976; McCHARTHY e ROBB, 1978) ed i processi di frazionamento possono essere seguiti prendendo in esame la distribuzione degli elementi minori (HANSON, 1978).

Di accordo con dati sperimentali un liquido granitico che risale attraverso la cro-

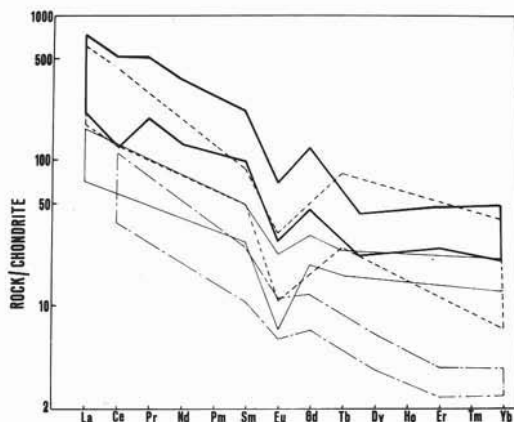


Fig. 6. — Distribuzione normalizzata delle terre rare nelle rocce di Jequié (area delimitata da tratto continuo pesante), in charnockiti ignee della Norvegia (tratto continuo leggero), in intrusioni quarzo-monzonitiche Precambriane di Barberton, Sud Africa (tratto interrotto) e del Minnesota, USA (doppio tratto interrotto). Da SIGHINOLFI et al., 1981.

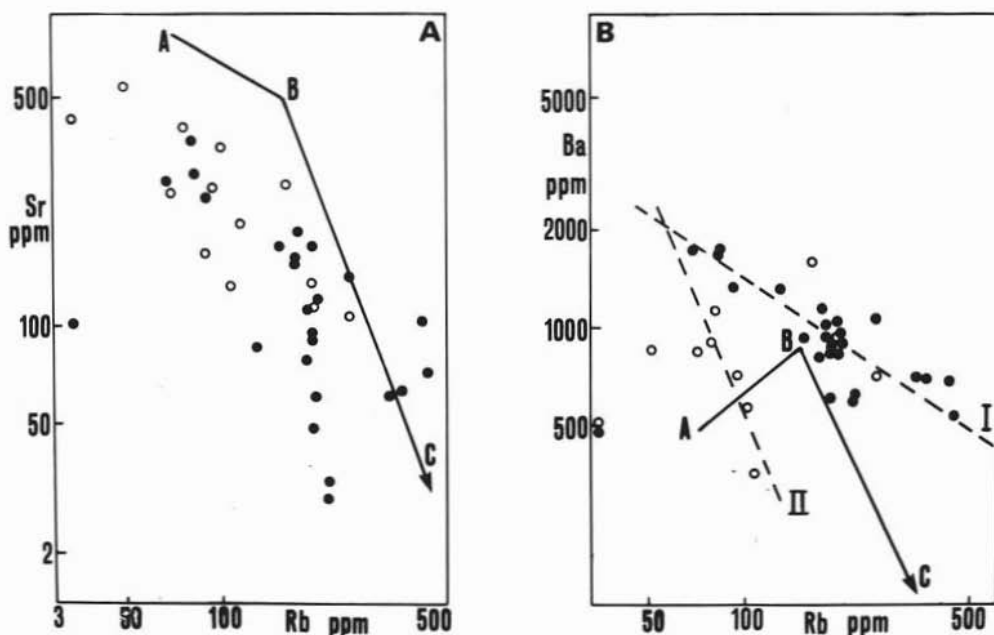


Fig. 7. — Rapporti Rb-Ba e Rb-Sr nelle rocce di Jequié (simboli come in fig. 3). Le linee AB e BC mostrano gli effetti del frazionamento di quarzo + plagioclasio + K feldspato sul contenuto dei tre elementi nel liquido (da McCHARTHY e ROBB, 1978).

sta normalmente tende a cambiare progressivamente di composizione arricchendosi nella componente feldspatica. Questo avviene attraverso un primo frazionamento di plagioclasio + quarzo seguito da un successivo frazionamento di plagioclasio + quarzo + K-feldspato (+ mafici), in proporzioni definite dalle condizioni di *P* e *T* e dalla composizione del liquido originale. L'evoluzione della composizione del liquido durante i processi di frazionamento può essere ricostruita prendendo in esame elementi in tracce quali Rb, Ba ed Sr la cui distribuzione nel liquido è fortemente influenzata dalla separazione delle fasi sopra citate ed i cui coefficienti di ripartizione liquido-solido per le principali fasi dei sistemi granitici sono ben conosciuti (McCHARTHY, 1976; CONDIE e HUNTER, 1976; IRVING, 1978; LONG, 1978). Gli effetti del frazionamento di plagioclasio, quarzo e K-feldspato sulla distribuzione nel liquido di Rb, Sr e Ba sono mostrati in fig. 7: le rette AB e BC rappresentano gli effetti del frazionamento delle tre fasi in determinati rapporti (vedere McCHARTHY e ROBB, 1978). La composizione iniziale (A) del liquido tende a spo-

starsi verso B durante il frazionamento di plagioclasio + quarzo e verso C quando il frazionamento include anche K-feldspato.

Nel diagramma Sr-Rb (fig. 7 a) le rocce di Jequié tendono ad allinearsi più o meno parallelamente alle rette AB e BC con un andamento verso C dei campioni di charnockiti ricche in ferro. Nel diagramma Ba-Rb (fig. 7 b), invece, le rocce di Jequié non sembrano seguire le tendenze di differenziazione mostrate dalle rette AB e BC ed inoltre le charnockiti ricche in ferro cadono in campi nettamente distinti da quello di gran parte delle charnockiti « normali ». A questo punto deve essere ricordato che le tendenze di differenziazione dei liquidi illustrate in fig. 7 non tengono conto della possibile separazione di fasi idrate ricche in K (muscovite, biotite), considerate componenti secondarie sia del solido che del liquido. Tali fasi peraltro possono avere notevoli effetti sui rapporti Rb/Sr e Sr/Ba nel liquido in quanto esse tendono a concentrare selettivamente i tre elementi. Per esempio, considerando i fattori di arricchimento relativi (conc. elemento fase A/conc. elemento fase B) mostrati in Tabella 2, è facile dedurre

che se la biotite viene frazionata al posto di parte del K-feldspato, i rapporti Si/Rb, Ba/Rb e K/Rb nel liquido tenderanno ad innalzarsi. Al contrario, tali rapporti (ed in particolare il rapporto Ba/Rb) tenderanno ad abbassarsi quando il « componente » biotite si arricchirà nel liquido relativamente al « componente » K-feldspato.

TABELLA 2

Fattori di arricchimento relativi per Rb, Ba e Sr fra feldspati e miche di sistemi granitici

Elemento	K feldspato plagioclasio	Biotite K feldspato	Muscovite K feldspato
Rb	20.	3.7	3.4
Ba	15.	1.	1.5
Sr	(1.1)	0.1	0.2

Dati calcolati a partire dai coefficienti di ripartizione solido-liquido misurati da McCHARTHY (1976) e CONDIE e HUNTER (1976).

Da tali considerazioni appare plausibile ipotizzare che le charnockiti ricche in ferro derivano il loro chimismo da un processo di frazionamento del liquido che porta ad un progressivo arricchimento del « componente » biotite nei liquidi residuali. Ciò equivale ad affermare che la cristallizzazione della biotite è stata impedita o quasi impedita durante il frazionamento delle principali fasi del sistema granitico. Se tale conclusione è esatta si può affermare che sia il frazionamento che la cristallizzazione finale del liquido sono avvenute sotto condizioni di pressione parziale di H₂O relativamente bassa. Numerosi lavori sperimentali (vedere ad esempio MAALOE e WYLLIE, 1975; WYLLIE et al., 1978), infatti, hanno chiaramente mostrato che in liquidi granitici le sequenze di cristallizzazione di fasi dipendono strettamente dal contenuto in acqua negli stessi liquidi. In condizioni di sottosaturazione in H₂O i minerali idrati tendono a ritardare la loro cristallizzazione e, per quanto riguarda la biotite, essa diventa l'ultima fase a cristallizzare quando il contenuto in H₂O nel liquido è minore di 1,2 % in peso.

Molti autori (per es. BERG, 1977; ORMAASEN, 1977) hanno messo in evidenza che la cristallizzazione di liquidi in ambiente di

crosta profonda caratterizzato da condizioni di facies granulitica presenta modalità di frazionamento consistenti con pressioni parziali di H₂O e di fugacità di ossigeno molto ridotte. È d'altra parte molto probabile che simili modalità di frazionamento siano molto comuni per liquidi generati per anatessi di rocce cristalline in quanto è noto che essi tendono ad essere fortemente sottosaturi in H₂O (BROWN e FYFE, 1970; ROBERTSON e WYLLIE, 1971).

Possibili cause del carattere non impoverito di alcune rocce in facies granulitica

L'abbondanza di elementi mobili ed incompatibili nelle rocce del complesso di Jequié se confrontata con il forte impoverimento negli stessi elementi riscontrato dalle rocce di facies granulitica del basamento incassante pone l'interrogativo del perché di queste tendenze geochimiche contrastanti. Simili interrogativi sono stati, d'altra parte, suscitati da dati relativi ad altre aree costituite da terreni di facies granulitica in cui granuliti « non impoverite » si alternano strettamente a granuliti tipicamente impoverite in elementi mobili ed incompatibili (WHITNEY, 1969; COLLERSON, 1975; GRAY, 1977). Ogni possibile interpretazione deve tener conto dell'assunzione, peraltro comunemente accettata, che il carattere « impoverito » di molte granuliti non rispecchia caratteristiche composizionali del materiale premetamorfico ma che sia dovuta ad una perdita di elementi durante il metamorfismo di facies granulitica.

È noto che la rimozione di elementi da rocce di metamorfismo di alto grado può avvenire essenzialmente in due modi:

a) per migrazione in una fase fluida generata da reazioni di disidratazione delle stesse rocce o legata ad un evento globale di degassazione riguardante porzioni definite di mantello superiore. In quest'ultimo caso i fluidi liberati sarebbero capaci di muoversi attraverso la crosta per diffusione;

b) per rimozione di frazioni di liquidi generati per anatessi delle stesse rocce costituenti la crosta inferiore.

Nel primo caso la rimozione sembra riguardare determinati elementi particolarmente solubili in fluidi acquosi di alta temperatura (metalli alcalini, U, etc.) ed esempi classici di tali rimozioni sono rappresentati dalle tendenze geochimiche riscontrate nella transizione gabbro (o basalto)-granulite (CLOUGH e FIELD, 1980) o nel metamorfismo di sedimenti poco reattivi quali quarziti ed arenarie quarzitiche.

Nel secondo caso la rimozione deve riguardare una serie cospicua di elementi principali ed in tracce e l'entità della rimozione per i vari elementi deve essere compatibile con la loro abbondanza in liquidi granitici (SIGHINOLFI e GORGONI, 1978; NESBITT, 1980). Il chimismo strettamente «granitico» delle rocce di Jequié ed il contenuto elevato in elementi mobili in fase fluida (Rb, Y ed anche Au e U, dati non pubblicati) sembrano indicare che nel caso specifico nessuno dei due processi di rimozione precedentemente considerati ha agito. In un recente lavoro (SIGHINOLFI et al., 1981) alcuni di noi hanno suggerito alcune ipotesi alternative per interpretare il peculiare chimismo delle rocce di Jequié dando, in particolare, enfasi alla possibilità di una ri-introduzione di elementi mobili e «granitofili» nelle rocce di facies granulitica in conseguenza di processi secondari (metamorfismo retrogrado, metasomatismo regionale). Nel presente lavoro viene prospettata un'ulteriore ipotesi per spiegare il carattere non impoverito delle rocce di Jequié che considera la natura del materiale premetamorfico, e cioè il carattere igneo e la composizione granitica, come fattori fondamentali. Tale ipotesi si basa sull'osservazione che una rimozione di elementi durante il metamorfismo di facies granulitica diventa realmente effettiva quando le condizioni di P e T e la composizione delle rocce favoriscono:

a) l'esistenza di una fase fluida libera che, per propria natura, tende a migrare attraverso un mezzo sostanzialmente solido;

b) una spinta anatessi con formazione di abbondante liquido parte del quale può mi-

grare in un mezzo a ridotta viscosità per la presenza di una discreta componente fluida.

È universalmente noto da lavori sull'anatessi sperimentale che per determinati valori «crostali» di P e T la quantità di fuso prodotto dipende dalla composizione del materiale e dal suo contenuto in H_2O . Dagli stessi dati sperimentali è lecito dedurre che la transizione gabbro-granulite consiste in un processo di disidratazione e ricristallizzazione essenzialmente allo stato solido non essendo realizzate in esso le condizioni per la produzione di sia pure limitate quantità di liquidi anatettici. Al contrario, è facilmente dimostrabile (vedere ad es. BROWN e FYFE, 1970) che rocce di composizione granitica contenenti sia pure minime quantità di H_2O debbono subire fenomeni di fusione parziale in ambiente di crosta profonda per qualsiasi valore di gradiente geotermico assunto. Nel caso di rocce granitiche di origine ignea, tuttavia, a parità di condizioni di P - T , la quantità di liquido anatettico deve essere notevolmente ridotta se confrontata con quella presente nell'anatessi di materiali di origine sedimentaria (micascisti, gneiss biotitici, etc.) per il ridotto contenuto in fasi idrate.

Per tali ragioni e per l'elevata viscosità dei liquidi prodotti, fortemente sottosaturi in H_2O , gli stessi liquidi non potranno risalire lungo la crosta per normali cause di dinamica crostale ma tenderanno a ricristallizzare in loco in rapporto a variazioni appropriate dei regimi di P e T . In aggiunta, si può ipotizzare che la presenza in ambiente di crosta profonda di liquidi fortemente sottosaturi in H_2O possa agire come «trappola» per i fluidi e per gli elementi in essi contenuti liberati durante la successiva distruzione di fasi idrate stabili a temperature maggiori (per es. orneblenda) o durante processi di disidratazione di formazioni vicine.

Come risultato finale di tali processi, pertanto, si potranno generare rocce con paragenesi granulitiche paradossalmente arricchite in elementi mobili ed incompatibili.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA F.F.M., DE (1977) - *O Craton do Sao Francisco*. Rev. Bras. Geoc., 7, 349-364.
- BERG J.H. (1977) - *Dry granulite mineral assemblages in the contact aureoles of the Nain complex, Labrador*. Contrib. Mineral. Petrol., 64, 33-52.
- BROWN G.C. e FYFE W.S. (1970) - *The production of granitic melts during ultrametamorphism*. Contrib. Mineral. Petrol., 28, 310-318.
- CLOUGH P.W.L. e FIELD D. (1980) - *Chemical variation in metabasites from a Proterozoic amphibolite-granulite transition zone, South Norway*. Contrib. Mineral. Petrol., 73, 277-286.
- COLLIERSON K.D. (1975) - *Contrasting patterns of K/Rb distribution in Precambrian high grade metamorphic rocks from Central Australia*. J. Geol. Soc. Aust., 22, 145-158.
- COMPTON P. (1978) - *Rare earth evidence for the origin of the Nuk Gneiss Buksefjorden Region, Southern West Greenland*. Contrib. Mineral. Petrol., 66, 283-293.
- CONDIE K.C. e BARAGAR W.R.A. (1974) - *Rare-earth element distributions in volcanic rocks from Archean greenstone belts*. Contrib. Mineral. Petrol., 45, 237-246.
- CONDIE K.C. e HUNTER D.R. (1976) - *Trace element geochemistry of Archean granitic rocks from the Barberton region, South Africa*. Earth Planet. Sci. Lett., 29, 389-400.
- CORDANI U.G. e IYER S.S. (1979) - *Geochronological investigation on the Precambrian granulitic terrain of Bahia, Brazil*. Precam. Res., 9, 255-274.
- DRAKE M.J. (1975) - *The oxidation state of europium as an indication of oxygen fugacity*. Geochim. Cosmochim. Acta, 39, 55-64.
- DRURY S.A. (1973) - *The geochemistry of Precambrian granulite facies rocks from the Lewisian complex of Tiree, Inner Hebrides, Scotland*. Chem. Geol., 11, 167-188.
- FIGUEROA M.C.H. (1980) - *Geochemistry of high grade metamorphic terrains in northeastern Bahia (Brazil)*. Ph. D. Thesis. Univ. of Western Ontario, London, Canada.
- GERASIMOVSKIY V.I., LAKTIONOVA N.V. e GRINEVSKAYA ZH.M. (1975) - *Scandium and yttrium in the volcanic rocks of Iceland*. Geochim. Inter., 12, 25-33.
- GRAY C.M. (1977) - *The geochemistry of central Australian granulites in relation to the chemical and isotopic effects of granulite facies metamorphism*. Contrib. Mineral. Petrol., 65, 79-89.
- HANSON G.N. (1978) - *The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition*. Earth Planet. Sci. Lett., 38, 26-43.
- IRVING A.J. (1978) - *A review of experimental studies of crystal/liquid trace element partitioning*. Geochim. Cosmochim. Acta, 42, 743-770.
- KLIMOV L.V., RAVICH M.G. e SOLOVJEV D.S. (1964) - *East Antarctic charnockites*. Inter. Geol. Congr., 22d, New Delhi, pt. XIII, 79-87.
- KOLJONEN T. e ROSENBERG R.J. (1974) - *Rare earth elements in granitic rocks*. Lithos, 7, 249-261.
- LAMBERT R. ST. J. e HOLLAND J.G. (1974) - *Yttrium geochemistry applied to petrogenesis utilizing calcium-yttrium relationships in mineral and rocks*. Geochim. Cosmochim. Acta, 38, 1393-1414.
- LONG P.E. (1978) - *Experimental determination of partition coefficients for Rb, Sr, and Ba between alkali feldspar and silicate liquid*. Geochim. Cosmochim. Acta, 42, 833-846.
- MAALØE S. e WYLLIE P.J. (1975) - *Water content of a granite magma deduced from the sequence of crystallization determined experimentally with water-undersaturated conditions*. Contrib. Mineral. Petrol., 52, 175-191.
- MCCHARTHY T.S. (1976) - *Chemical interrelationships in a low pressure granulite terrain in Namaqualand, South Africa, and their bearing on granite genesis and the composition of the lower crust*. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 1057-1062.
- MCCHARTHY T.S. e HASTY R.A. (1976) - *Trace element distribution patterns with reference to the crystallization of granitic melts*. Geochim. Cosmochim. Acta, 40, 1351-1358.
- MCCHARTHY T.S. e ROBB L.J. (1978) - *On the relationship between cumulus mineralogy and trace element chemistry in an Archean granite from the Barberton region, South Africa*. Geochim. Cosmochim. Acta, 42, 21-26.
- NESBITT H.W. (1980) - *Genesis of the New Quebec and Adirondack granulites: evidence for their production by partial melting*. Contrib. Mineral. Petrol., 72, 303-310.
- NEUMANN E.R., BRUNFELD A.O. e FINSTAD K.G. (1977) - *Rare earth elements in some igneous rocks in the Oslo rift, Norway*. Lithos, 10, 311-319.
- O'CONNOR J.T. (1965) - *A classification of quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios*. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 525B.
- O'NIONS R.K. e PANKHURST R.J. (1974) - *Rare-earth element distribution in Archean gneisses and anorthosites, Godthåb area, West Greenland*. Earth Planet. Sci. Lett., 22, 328-338.
- ORMAASEN D.E. (1977) - *Petrology of the Hopen mangerite-charnockite intrusion, Lofoten, north Norway*. Lithos, 10, 291-310.
- PARRAS K. (1958) - *On the charnockites in the light of the highly metamorphic rock complex in southwestern Finland*. Bull. Comm. Geol. Finl., 181, 1-137.
- ROBERTSON J.K. e WYLLIE P.J. (1971) - *Experimental studies on rocks from the DeBullie stock, northern Maine, including melting relations in the water-deficient environment*. J. Geol., 79, 549-571.

- SELF S. e GUNN B.M. (1976) - *Petrology, volume and age relations of alkaline and peralkaline volcanics from Terceira, Azores*. Contrib. Mineral. Petrol., 54, 293-313.
- SHAW D.M. (1968) - *A review of K-Rb fractionation trends by covariance analysis*. Geochim. Cosmochim. Acta, 32, 573-585.
- SHAW D.M. (1972) - *The origin of the Apsley gneiss, Ontario*. Can. J. Earth Sci., 5, 561-583.
- SIGHINOLFI G.P. (1970) - *Investigations into the deep levels of the continental crust: petrology and chemistry of the granulite facies terrains of southern Bahia (Brazil)*. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat. Mem., A77, 327-341.
- SIGHINOLFI G.P. (1971) - *Investigations into deep crustal levels: fractionating effects and geochemical trends related to high-grade metamorphism*. Geochim. Cosmochim. Acta, 35, 1005-1021.
- SIGHINOLFI G.P. e CORGONI C. (1978) - *Chemical evolution of high-grade metamorphic rocks - anatexis and remotion of material from granulite terrains*. Chem. Geol., 22, 157-176.
- SIGHINOLFI G.P., FIGUEREDO M.C.H., FYFE W.S., KRONBERG B.I. e TANNER OLIVEIRA M.A.F. (1981) - *Geochemistry and petrology of the Jequié granulitic complex (Brazil): an Archean basement complex*. Contrib. Mineral. Petrol., 78.
- STRONG D.F. e DICKSON W.L. (1978) - *Geochemistry of paleozoic granitoid plutons from contrasting tectonic zones of northeast Newfoundland*. Can. J. Earth Sci., 15, 145-156.
- WEDEPOHL K.H. (1969) - *Handbook of Geochemistry, I*. Editore: K.H. Wedepohl, Berlin, Springer-Verlag.
- WERNIK E. e ALMEIDA F.M., DE (1979) - *The geotectonic environments of the early Precambrian granulites in Brazil*. Precam. Res., 8, 1-17.
- WHITNEY P.R. (1969) - *Variations in K/Rb ratio in migmatitic paragneisses of the Northwest Adirondacks*. Geochim. Cosmochim. Acta, 33, 1203-1211.
- WINDLEY B.F. (1977) - *The evolving continents*. Editori: John Wiley e Sons, 385 p.
- WINKLER H.G.F. (1967) - *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Editore: Springer-Verlag, Berlin, 1967, II ed., 237 p.
- WOOD B.J. e BANNO S. (1973) - *Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems*. Contrib. Mineral. Petrol., 42, 109-124.
- WYLLIE P.J., HUANG W.L., STERN C.R. e MAALØE S. (1976) - *Granitic magmas: possible and impossible sources, water contents, and crystallization sequences*. Can. J. Earth Sci., 13, 1007-1019.
- ZAKRUTKIN V.V. (1970) - *Chemistry of charnockitic granites and their genesis*. Inter. Geol. Rev., 14, 481-487.