

**GEOQUÍMICA DE TERRAS RARAS E GEOTERMOBAROMETRIA  
DE GRANULITOS DE DOM PEDRITO E LUIS ALVES,  
NO EXTREMO SUL DO BRASIL**

L.A. Hartmann

## ABSTRACT

Rare-earth elements were determined on 27 samples from the Santa Maria Chico and the Santa Catarina granulitic complexes from southernmost Brazil. REE patterns on chondrite-normalized diagrams are similar for basic gneisses in both complexes, showing  $Ce_N/Yb_N$  ratios close to one and no Eu anomaly; some of the samples are enriched in LREE. The tonalitic and trondhjemitic gneisses, well represented in Dom Pedrito, show strong fractionation of the REE, with  $Ce_N/Yb_N$  ratios ranging from 50 to 100. The Dom Pedrito gneisses present strong positive Eu anomaly. The acid and intermediate gneisses from Luis Alves show small negative Eu anomaly, which is also present in the pyroxenites from the same area.

Granulites from southernmost Brazil are geochemically similar to the Lewisian granulites from Scotland, both strongly depleted in lithophile elements, including the REE. But they are significantly different of the Jequié granulites from Bahia. The latter are enriched in lithophile elements and present strong negative Eu anomaly. These data, and  $Yb_N \times Ce_N/Yb_N$  diagrams, indicate participation of plagioclase in the generation of the Jequié granulites, as opposed to the participation of garnet and hornblende in the south.

Geothermobarometric calculations on garnet + pyroxene + plagioclase + quartz granulites yield pressures in the order of 9.4 kb for the  $M_2$  event in the Santa Maria Chico Complex. Temperatures are about 800°C. In the Santa Catarina Complex, two-pyroxene thermometers yield about the same temperature of 800°C for the  $M_2$  event. In the Luis Alves area, a third granulite facies event is observed as small crystals of two pyroxenes grown on the border of hornblende. The Dom Pedrito granulites are recrystallized with varying intensity in low and medium grades by the intrusion of granites.

## RESUMO

Foram dosados os elementos terras raras em 27 amostras provenientes dos complexos granulíticos Santa Maria Chico e Santa Catarina, no sul do Brasil. Os padrões de terras raras, normalizados com relação ao condritos, são similares para os gnaisses básicos em ambos os complexos, mostrando razões  $Ce_N/Yb_N$  próximos a um e ausência de anomalia de Eu; algumas das amostras são enriquecidas nas terras raras leves. Os gnaisses tonalíticos e trondhjemíticos, bem representados em Dom Pedrito, mostram forte fracionamento das terras raras, com razões  $Ce_N/Yb_N$  variando de 50 a 100. Os gnaisses de Dom Pedrito apresentam forte anomalia positiva de Eu. Os gnaisses ácidos e intermediários de Luis Alves mostram pequena anomalia negativa de Eu, que também aparece nos piroxenitos da mesma área.

Os granulitos do sul do Brasil são geoquimicamente similares aos granulitos Lewisian, da Escócia, ambos fortemente empobrecidos em elementos litófilos, incluindo as terras raras. No entanto, são significativamente diferentes dos granulitos de Jequié, Bahia. Os últimos são enriquecidos em elementos litófilos e apresentam fortes anomalias negativas de Eu. Estes dados e os diagramas  $Yb_N \times Ce_N/Yb_N$  indicam a participação de plagioclásio na geração dos granulitos de Jequié, em contraste com a participação de granada e hornblenda no sul.

Cálculos geobarométricos nos granada-piroxênio-plagioclásio-quartzo granulitos forneceram pressões da ordem de 9,4 kb para o evento  $M_2$  no Complexo Santa Maria Chico. As temperaturas são de cerca de 800°C. No Complexo Santa Catarina, termômetros a dois piroxênios forneceram a mesma temperatura de 800°C para o evento  $M_2$ . Na área de Luis Alves, um terceiro evento de fácies granulito é caracterizado por pequenos cristais de dois piroxênios crescendo nas bordas da hornblenda. Os granulitos de Dom Pedrito foram recristalizados em intensidade variável (grau baixo a médio) pela intrusão de granitos.

## INTRODUÇÃO

Complexos granulíticos constituem extensas porções dos terrenos pré-cambrianos dos vários continentes. A América do Sul não é exceção, sendo amplamente conhecidas as ocorrências da Bahia, Goiás e Amazônia (Almeida & Hasui, 1984). Complexos de alto grau de metamorfismo são considerados representantes da crosta continental inferior, residindo nesse aspecto grande parte do interesse que despertam. Torna-se, assim, relevante a caracterização dos processos magmáticos e metamórficos atuantes na sua formação.

No extremo sul do Brasil, ocorrem gnaisses granulíticos em Santa Catarina (Albuquerque *et*

*al.*, 1971; Minioli, 1974; Hartmann, 1976; Hartmann *et al.*, 1979; Kaul, 1979; Moreira & Marimon, 1980; Basei, 1985) e no Rio Grande do Sul (Nardi & Hartmann, 1979; Naumann *et al.*, 1984). Revisões regionais recentes foram feitas por Jost & Hartmann (1984) e Santos *et al.* (1984).

No presente trabalho, são apresentados dados e conclusões pertinentes à geoquímica dos elementos terras raras (ETR) e à geotermobarometria dos granulitos de Luis Alves, pertencentes ao Complexo Granulítico de Santa Catarina (CGSC), e de Dom Pedrito, RS, que fazem parte

do Complexo Granulítico Santa Maria Chico (CGSMC). Os trabalhos mencionados contêm mapas e descrições geológicas dessas duas áreas.

## ASPECTOS GEOLÓGICOS DOS COMPLEXOS GRANULÍTICOS

O embasamento pré-Siluriano da região de Dom Pedrito mostra (Nardi & Hartmann, 1979; Naumann, 1984) grande área de rochas graníticas (Hartmann & Nardi, 1982), de idade provável Cambriana, intrusivas no Complexo Granulítico Santa Maria Chico. O Complexo Granítico Santo Afonso tem características de batólito de mezonozona a epizona, a Suite Intrusiva Saibro de epizona e o Dacito Vauthier é sub-vulcânico. As lavas do Platô do Taquarembó são possivelmente cogenéticas com os granitos associados.

Os contatos do complexo granulítico com os granitos são nítidos, apesar de estarem geralmente encobertos por solo. Mesmo mega-xenólitos de vários quilômetros de extensão ou pequenos xenólitos de 1 m de tamanho mantêm muitas características das rochas preexistentes, sem metasomatismo significativo.

O complexo granulítico contém gnaisses poli-deformados de vários tipos, predominando gnaisses básicos e ácidos, e subsidiariamente mármore, gnaisses calcossilicatados, silimanita gnaisses, anortositos, formações ferríferas, piroxenitos e um pequeno corpo de espinélio lherzolito. Os gnaisses ácidos têm composição trondjemítica e tonalítica.

O complexo é polifásico, mostrando em muitos afloramentos evidências de três eventos deformacionais. É uma característica do complexo, no entanto, a presença de uma foliação dominante, com direção N na região ao sul de Suspiro, passando para direção NW no extremo noroeste do complexo; o mergulho é predominantemente subvertical; predominam as direções NW na maior parte do complexo.

Na região de Luis Alves (Hartmann *et al.*, 1979), o Complexo Granulítico de Santa Catarina recobre quase toda a área, sendo saliente a ausência de granitos intrusivos pós-tectônicos. Conglomerados e arenitos do Grupo Itajaí e aluviões recentes cobrem algumas porções. Contrastando com o pampa de Dom Pedrito, as montanhas de Luis Alves permitem boa exposição do complexo e também das extensas zonas de falha (Hartmann *et al.*, 1982). Os cataclastos mostram intensos efeitos retrorretamórficos de baixo grau, conforme observações ao longo dos vales de falha. As montanhas contêm blocos granulíticos bem preservados, sem evidência significativa de cataclase de baixo grau.

O complexo granulítico contém predominantemente litologias básicas, e subsidiariamente gnaisses trondjemíticos, calcossilicatados, piroxenitos, anortositos, formações ferríferas, anfíbolitos e quartzitos. Peridotitos ocorrem em Piên, PR. Silimanita gnaisses são conhecidos em um local, 30 km a oeste de Luis Alves.

A foliação principal dos gnaisses polifásicos

tem direção NE, mas apresenta variações locais; o mergulho é subvertical. Estudos estruturais foram realizados por Basei (1985).

## ASPECTOS PETROGRÁFICOS

Os gnaisses das duas áreas apresentam-se inteiramente recristalizados, sem preservação de textura ou mineralogia pré-metamórficas. A ocorrência de paragêneses diagnósticas de fácies granulito é comum nas duas áreas. A evolução textural e metamórfica apresenta aspectos comuns nas duas áreas e outros distintos, e pode ser sumarizada da seguinte forma:

CGSMC	M <sub>1</sub>	Ortopiroxênio + clinopiroxênio + plagioclásio Pré-tectônico
	M <sub>2</sub>	Ortopiroxênio + clinopiroxênio + plagioclásio + hornblenda + biotita + opacos (± quartzo) Sintectônico a pós-tectônico
	M <sub>3</sub>	Anfibólitos + filossilicatos + epidoto Cornubianítico
	M <sub>4</sub>	Epídoto + microclínio + clorita Cataclástico
CGSC	M <sub>1</sub>	Ortopiroxênio + clinopiroxênio + plagioclásio Pré-tectônico
	M <sub>2</sub>	Ortopiroxênio + clinopiroxênio + plagioclásio + hornblenda + biotita + opacos (± quartzo) Sintectônico
	M <sub>3</sub>	Ortopiroxênio + clinopiroxênio + plagioclásio + hornblenda + biotita + opacos (± quartzo) Milonítico
	M <sub>4</sub>	Hornblenda Pós-tectônico
	M <sub>5</sub>	Epídoto + microlínio + clorita Cataclástico

M<sub>1</sub> está registrado através de porfiroclastos, nas duas regiões, sendo freqüente a presença de lamelas de exsolução nos piroxênios e de textura antiperitítica no plagioclásio.

M<sub>2</sub> contém paragêneses semelhantes nas duas áreas. Os minerais deste evento metamórfico não apresentam lamelas de exsolução, mostram feições de desequilíbrio com M<sub>1</sub>, e constituem agregados granoblásticos. Merece destaque a textura da hornblenda, que cresce nas bordas dos piroxênios de M<sub>1</sub>, mas forma contatos triplíceis a 120° com os piroxênios de M<sub>2</sub>. A cristalização em equilíbrio entre hornblenda e piroxênios é especialmente nítida no CGSMC.

Em Dom Pedrito, M<sub>2</sub> é o último evento metamórfico de alto grau observado. A textura granoblástica indica que esse metamorfismo granulítico teve continuidade após o término da deformação. Em Luis Alves, no entanto, as rochas foram afetadas por deformação plástica em alto grau, após M<sub>2</sub>. Com isso, muitas amostras mostram-se milonitizadas, com estiramento dos mine-

rais de M<sub>2</sub>. Durante a milonitização, ocorreu M<sub>3</sub> com as mesmas paragêneses de M<sub>2</sub>. Observam-se, assim, crescimentos de ortopiroxênio nas bordas da hornblenda de M<sub>2</sub>.

Um evento M<sub>4</sub>, de fácies anfíbolito, afetou de forma pouco intensa a área, gerando pequenos cristais de hornblenda pobre em Ti nas bordas do ortopiroxênio.

No CGSMC ocorreu, após M<sub>2</sub>, um evento cornubianítico M<sub>3</sub>, com intensidade e grau variável na área. A intensidade desse evento é bem menor na parte NW do complexo, devido ao pequeno volume de granitos intrusivos. Nenhuma

amostra foi inteiramente recristalizada. O plagioclásio, dentre os minerais maiores, é o menos afetado, e está geralmente bem preservado. O hiperstênio encontra-se consideravelmente alterado para talco e cumingtonita. O diopsídio está transformado parcialmente em actinolita ou hornblenda. A hornblenda de M<sub>2</sub> apenas em algumas amostras encontra-se transformada em hornblenda de M<sub>3</sub>.

Cataclase de baixo grau afetou os dois complexos, gerando microclínio + epidoto + clorita de M<sub>5</sub> em Luis Alves e paragêneses similares de M<sub>4</sub> em Dom Pedrito.

Tabela 1 — Composição química (n.a., não analisado) e fórmula estrutural de minerais de três amostras de granulitos.

	CGSMC-37					CGSMC-39				CGSC-9	
	Opx	Cpx	Gra	Plag	Hb	Opx	Cpx	Gra	Plag	Opx	Cpx
SiO <sub>2</sub>	52,30	49,68	40,77	46,14	41,56	51,65	49,91	39,41	55,98	49,65	50,63
TiO <sub>2</sub>	0,07	0,45	0,05	0,02	1,48	0,12	0,60	0,11	0,02	0,09	0,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,01	6,01	22,80	34,25	15,31	2,46	4,64	21,91	28,12	1,13	1,89
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				n.a.		0,02	0,05	0,02	n.a.	0,02	0,03
NiO				n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
FeOt	16,39	6,18	18,24	0,17	10,08	25,37	10,88	24,55	0,08	32,24	13,55
MnO	0,39	0,13	0,79	n.a.	0,14	0,35	0,17	0,82	n.a.	0,83	0,34
MgO	25,96	13,41	11,79	n.a.	13,61	20,31	11,89	7,55	n.a.	14,60	10,47
CaO	0,54	23,82	7,32	18,06	12,36	0,56	21,54	7,29	10,41	0,58	20,86
Na <sub>2</sub> O	0,02	0,52	0,03	1,44	2,63	0,02	0,74	n.a.	5,78	0,02	0,49
K <sub>2</sub> O	n.a.	n.a.	n.a.		0,23	n.a.	n.a.	n.a.	0,15		
Total	99,68	100,20	101,79	100,08	97,40	100,86	100,22	101,66	100,54	99,16	98,45
	6 (0)	6 (0)	24 (0)	8 (0)	23 (0)	6 (0)	6 (0)	24 (0)	8 (0)	6 (0)	6 (0)
Si	1,9002	1,8404	5,9920	2,1243	6,0819	1,9336	1,8770	5,9850	2,5070	1,9661	1,9602
Ti	0,0019	0,0126	0,0058	0,0006	0,1624	0,0054	0,0168	0,0121	0,0006	0,0025	0,0054
Al	0,1718	0,2623	3,9492	1,8588	2,6406	0,1085	0,2057	3,9224	1,4846	0,0527	0,0861
Cr						0,0004	0,0015	0,0019		0,0004	0,0010
Ni											
Fe	0,4980	0,1915	2,2420	0,0065	1,2332	0,7941	0,3423	3,1179	0,0031	1,0676	0,4386
Mn	0,0119	0,0039	0,0976		0,0173	0,0111	0,0054	0,1061		0,0279	0,0112
Mg	1,4061	0,7407	2,5820		2,9680	1,1336	0,6663	1,7086		0,8614	0,6043
Ca	0,0210	0,9455	1,1528	0,8909	1,9375	0,0225	0,8598	1,1863	0,4995	0,0247	0,8653
Na	0,0011	0,0370	0,0098	0,1284	0,7449	0,0013	0,0542		0,5017	0,0015	0,0367
K					0,0428				0,0087		
Total	4,0120	4,0339	16,0312	5,0095	15,8286	4,0085	4,0290	16,0403	5,0052	4,0048	4,0088

## GEOTERMOBAROMETRIA

Análises químicas de minerais (Tabela 1) foram obtidas por microsonda eletrônica na Open University, Inglaterra, e forneceram os seguintes resultados geotermobarométricos, para o evento M<sub>2</sub>:

### Complexo Granulítico Santa Maria Chico

*Amostra CGSMC-39*, granada granulito máfico

Paragênese: granada + clinopiroxênio + ortopiroxênio + plagioclásio

Utilizando os dois piroxênios e estipulando a pressão em 9 kb, obtém-se uma temperatura de 871°C pelo termômetro de Wells (1977). A temperatura desse evento situa-se em torno de 810°C, por subtração de 60°C, conforme recomendação de Evans & Trommsdorf (1978). Utilizando 800°C como parâmetro, e empregando granada + clinopiroxênio + plagioclásio, a pressão de M<sub>2</sub> é de 9,4 kb; empregando granada + ortopiro-

xênio + plagioclásio, a pressão é igualmente de 9,4 kb. Os geobarômetros são de Perkins & Newton (1981).

*Amostra CGSMC-37*, espinélio-granada piroxenito

Paragênese: espinélio hercínico + granada + clinopiroxênio + ortopiroxênio + plagioclásio

Utilizando granada + hornblenda, obtém-se a temperatura de 834°C. Estipulando a temperatura em 800°C, e utilizando granada + ortopiroxênio + plagioclásio, obtém-se 9,9 kb; utilizando granada + clinopiroxênio + plagioclásio, obtém-se 9,3 kb; utilizando granada + ortopiroxênio + clinopiroxênio + plagioclásio, obtém-se 9,7 kb.

### Complexo Granulítico de Santa Catarina

*Amostra CGSC-9*, granulito máfico

Paragênese: clinopiroxênio + ortopiroxênio + plagioclásio

Utilizando dois piroxênios, obtém-se uma

temperatura de 853°C para pressão estipulada em 7 kb. Subtraindo 60°C, o valor do evento M<sub>2</sub> é de cerca de 800°C. Diversas outras amostras fornecem valores semelhantes.

A pressão desse evento é fornecida por Girardi & Ulbrich (1980) para a região de Piên, e situa-se em torno de 6,5 kb, portanto abaixo dos valores do CGSMC.

Em resumo, o CGSMC foi metamorfizado aproximadamente a 800°C e 9,4 kb, ao passo que o CGSC apresenta valores de 800°C e 6,5 kb.

### GEOQUÍMICA DE TERRAS RARAS

Os ETR foram determinados por ativação neutrônica na Open University, Inglaterra, em 18 amostras do CGSMC, enquanto que os elementos maiores por fluorescência de raios X, na Universidade de Southampton. Um número de 9 amostras do CGSC teve seu conteúdo de ETR determinado por ICP no King's College, Inglaterra; essas amostras também foram analisadas para elementos maiores e traços por fluorescência de raios X. Os resultados são apresentados nas Tabelas 2 a 5. No presente trabalho, é dada ênfase aos ETR.

Dentre os elementos traços, os ETR são relativamente imóveis face à alteração e metamor-

fismo (Humphris, 1984). Fluidos ricos em CO<sub>2</sub> podem redistribuir esses elementos, principalmente o grupo do Y. No entanto, o grupo do Ce pode ser mobilizado em condições de elevado PCO<sub>2</sub>. No presente estudo, não foi possível demonstrar a mobilidade relativa dos ETR; considera-se, para fins das discussões subsequentes, a exemplo de Weaver & Tarney (1980), que os ETR permaneceram imóveis face ao metamorfismo. Os resultados são, portanto, considerados como representativos do magmatismo básico e ácido precursor dos granulitos das duas áreas estudadas.

O CGSMC é bimodal, com uma moda composicional em torno de 50% SiO<sub>2</sub> e outra em torno de 70% SiO<sub>2</sub> (Fig. 1). O CGSC é predominantemente básico, mas contém litologias trondjemíticas. A bimodalidade composicional de terrenos granulíticos é observada em outros continentes, e parece ser típica de terrenos granito-gnáissicos arqueanos.

A suite básica do CGSMC tem afinidade toleítica, conforme indicado pelo diagrama AFM (Fig. 2) e pelo aumento da razão Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\*/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* + MgO (\*, todo Fe calculado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) com o aumento do teor de SiO<sub>2</sub>, e também pela relação inversa entre essa razão e o teor de Σ ETR

Tabela 2 — Elementos maiores (% em peso) e traços (ppm) de oito amostras de tonalitos e trondjemitos do Complexo Granulítico Santa Maria Chico. Todo Fe expresso como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; análise total soma 100%.

	4	5	6	9	13	14	28	29
SiO <sub>2</sub>	71,04	67,02	75,67	69,21	72,42	69,79	71,96	70,65
TiO <sub>2</sub>	0,36	0,64	0,01	0,57	0,15	0,42	0,20	0,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,92	15,61	15,73	15,41	16,65	16,02	15,68	17,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,76	5,68	0,11	4,10	1,27	3,24	2,07	1,50
MnO	0,03	0,06		0,05	0,02	0,04	0,03	0,03
MgO	1,09	1,26		1,43	0,36	1,12	0,70	0,39
CaO	3,77	5,20	1,99	4,21	3,39	3,86	3,64	3,87
Na <sub>2</sub> O	4,11	4,02	5,53	4,03	4,80	4,90	4,46	5,15
K <sub>2</sub> O	0,76	0,35	0,95	0,83	0,92	0,48	1,18	1,15
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,16	0,17	0,01	0,17	0,02	0,12	0,08	0,04
Ba	856	188	518	710	476	150	424	983
Rb	3	3	5	4	6	5	9	6
Sr	987	370	281	679	363	367	433	715
Y	4	15	2	7	1	6	5	4
Zr	65	192	46	199	85	128	92	147
Nb	2	7	2	5	3	5	3	3
Ga	19	18	15	17	16	19	17	18
Zn	71	58		64	11	58	26	29
Cu	9	7		10	3	7	5	2
Ni	6	9		14		9	6	1
Cr	6	17	24	22	7	19	9	5
V	64	76	2	64	11	47	29	19
Sc		9,67	0,05		1,5	6,2	3,7	2,8
Co		62,4	95,0		83,6	53,0	49,8	85,2
Hf		4,24	1,14		1,58	3,42	1,82	2,77
Ta		0,24			0,06	0,22	0,04	
La		14,1	8,7		11,2	11,0	10,9	39,6
Ce	40	30,5	11,1	8	12,8	18,5	20,4	51,5
Nd		15,3	3,8		2,9	8,2	9,1	12,6
Sm		2,77	0,35		0,30	1,69	1,60	1,39
Eu		1,20	0,63		0,84	0,65	0,70	1,63
Tb		0,38	0,07			0,24	0,21	0,10
Tm		0,20						
Yb		1,20			0,09	0,43	0,33	0,18
Lu		0,20				0,06	0,05	0,03

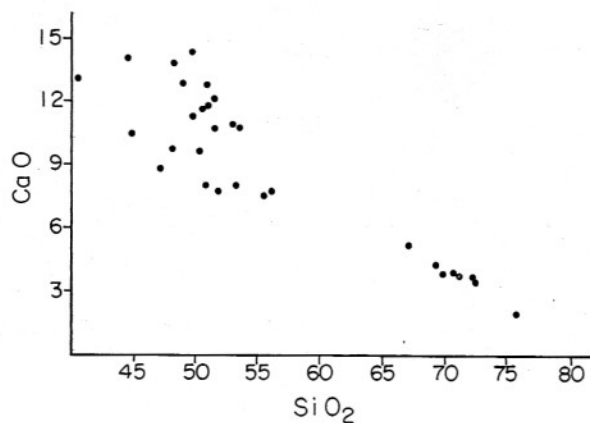


Figura 1 — Diagrama  $\text{SiO}_2 \times \text{CaO}$  indicando a bimodalidade do CGSMC.

e direta entre essa razão e a razão  $\text{Ce}_N/\text{Yb}_N$ . Algumas amostras da suite básica mostram padrões horizontalizados dos ETR (Fig. 3), mas a maioria é enriquecida no grupo do Ce, atingindo desde 7 até 100 vezes o valor condrítico. A razão  $\text{Tb}_N/\text{Yb}_N$  é igual ou levemente superior a 1. O grupo do Y tende a ter valores, nessa suite, concentrados entre 10 e 20 vezes o valor condrítico, mas diversas amostras atingem valores bem infe-

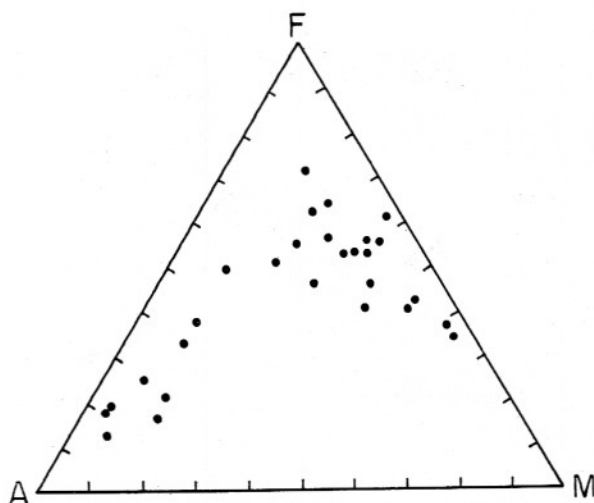


Figura 2 — Diagrama AFM ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} \times \text{FeO} \times \text{MgO}$ ) mostrando a natureza toleítica de enriquecimento em ferro da suite básica do CGSMC.

riores, em torno de 2 a 4 vezes o valor condrítico. Os granulitos básicos deste primeiro grupo não têm anomalia de Eu, ao passo que os do segundo grupo podem apresentar forte anomalia positiva desse elemento. Na suite básica, a diminuição do  $\Sigma$  ETR e do teor ETR pesados, e também o aumento da anomalia positiva de Eu estão

Tabela 3 — Elementos maiores (% em peso) e traços (ppm) de três amostras de anortositos e três de piroxenitos do Complexo Granulítico Santa Maria Chico. Todo Fe expresso como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; análise total soma 100%.

	Anortositos			Piroxenitos		
	2	11	18	21	27	30
$\text{SiO}_2$	53,43	52,94	49,60	49,60	40,39	50,73
$\text{TiO}_2$	0,05	0,10	0,04	3,90	1,26	0,67
$\text{Al}_2\text{O}_3$	29,29	28,19	31,50	3,99	23,72	5,78
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,81	1,71	0,71	18,93	11,94	10,95
MnO	0,01	0,02	0,01	0,13	0,10	0,15
MgO	0,46	1,05	0,68	11,16	7,47	17,77
CaO	10,69	10,89	14,35	11,25	13,15	12,77
$\text{Na}_2\text{O}$	4,82	4,38	2,92	0,58	1,45	0,81
$\text{K}_2\text{O}$	0,43	0,68	0,18	0,16	0,52	0,34
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,01	0,04	0,02	0,30	0,01	0,01
Ba	253	339	66	56	74	51
Rb	8	13	4	2	5	3
Sr	980	913	716	89	27	66
Y		2	2	17	11	19
Zr	51	51	39	169	18	24
Nb	2	2	2	24	3	3
Ga	16	16	15	14	9	7
Zn	6	18	11	55	100	93
Cu	35	136	40	36	3	22
Ni	54	359	25	217	1095	328
Cr	8	19	4	299	2161	767
V	12	23	11	395	137	235
Sc			1,3			52,3
Co			25,2			68,41
Hf						0,87
La			3,7			5,5
Ce		9	5,1	87	2	14,9
Nd			2,4			15,9
Sm			0,34			4,29
Eu			0,37			1,30
Tb			0,05			0,73
Yb			0,10			1,65
Lu						0,25

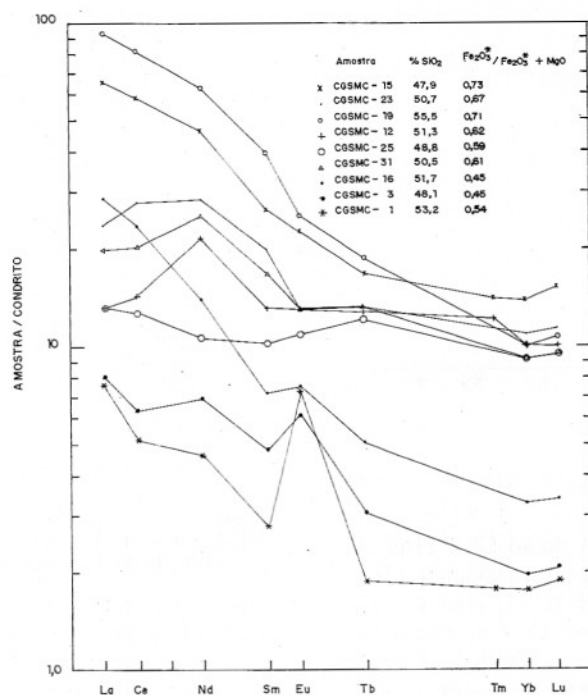


Figura 3 — ETR de amostras da suite básica do CGSMC, normalizadas aos valores condriticos de Nakamura (1974). Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* reúne todo Fe calculado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Tabela 4 — Elementos maiores (% em peso) e traços (ppm) de quinze amostras de granulitos básicos e intermediários do Complexo Granulítico Santa Maria Chico. Todo Fe expresso como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; análise total soma 100%.

	1	3	7	8	10	12	15	16	19	23	24	25	26	31	32
SiO <sub>2</sub>	53,18	48,08	44,62	44,34	55,97	51,33	47,87	51,68	55,50	50,68	47,04	48,84	50,24	50,50	51,33
TiO <sub>2</sub>	0,28	0,19	1,34	0,61	0,70	0,85	1,70	0,31	0,84	0,82	2,68	0,95	1,10	0,98	0,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,24	20,58	20,21	17,92	18,92	14,47	13,54	11,95	17,39	14,86	14,45	14,57	18,85	14,66	22,24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,25	7,00	14,06	12,74	8,36	11,90	16,94	11,75	9,96	12,07	18,24	11,91	9,19	11,61	5,73
MnO	0,15	0,11	0,16	0,12	0,11	0,16	0,22	0,12	0,14	0,13	0,24	0,16	0,10	0,16	0,08
MgO	8,84	8,67	4,79	8,62	3,22	7,27	6,37	14,41	4,01	6,00	4,15	8,13	5,75	7,29	5,92
CaO	8,00	13,77	10,38	14,11	7,68	10,70	9,78	7,78	7,56	11,73	8,78	12,89	9,67	11,61	12,11
Na <sub>2</sub> O	2,81	1,45	3,45	1,25	4,11	3,07	3,03	1,56	3,34	3,34	2,82	2,17	4,00	2,50	2,22
K <sub>2</sub> O	0,21	0,13	0,27	0,30	0,58	0,20	0,39	0,41	0,89	0,29	0,48	0,24	0,85	0,37	0,26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	0,01	0,73	0,01	0,35	0,05	0,18	0,03	0,37	0,07	1,11	0,14	0,26	0,33	0,01
Ba	219	63	265	78	432	71	241	223	821	127	600	61	325	81	443
Rb	2	3	2	9	5	3	2	16	8	2	12	4	18	2	6
Sr	731	768	1730	660	1147	245	598	545	954	436	566	191	1589	195	766
Y	3	4	21	4	19	21	29	7	25	23	51	19	17	22	5
Zr	41	46	187	39	153	38	84	38	134	65	504	36	115	47	42
Nb	2	2	3	2	7	3	8	2	8	3	23	4	4	4	2
Ga	15	11	25	14	21	15	17	9	19	19	21	15	23	16	14
Zn	80	39	163	57	78	109	159	114	94	97	215	98	80	115	30
Cu	41	27	39	180	21	42	66	6	31	79	36	74	62	86	15
Ni	170	48	9	57	5	136	58	268	5	91	35	235	111	141	79
Cr	293	57	1	239	19	317	146	609	23	215	24	455	129	231	105
V	95	128	233	568	161	246	355	105	195	262	308	271	231	244	146
Sc	23,3	28,7				39,6	39,0	28,0	26,1	41,6		40,5		35,6	29,4
Co	62,4	44,3				60,9	50,5	69,7	34,8	56,4		70,0		58,0	49,8
Hf	0,28	0,4				1,16	1,84	0,3	2,59	1,54		1,03		1,19	
Ta							0,33		0,23			0,1		0,16	
La	2,4	2,5				4,2	20,7	8,9	29,1	7,48		4,1		6,2	
Ce	4,2	5,2	71	8	9	11,6	47,9	19,3	66,7	22,6	162	10,4	40	16,7	
Nd	2,8	4,2				13,1	28,4	8,7	38,1	17,1		6,5		15,2	
Sm	0,55	0,95				2,60	5,20	1,41	7,75	3,91		2,02		3,35	0,45
Eu	0,54	0,46				0,96	1,72	0,56	1,89	0,99		0,82		0,99	0,46
Tb	0,09	0,15				0,61	0,80	0,24	0,90	0,60		0,59		0,64	0,23
Tm						0,40	0,46								
Yb	0,37	0,42				2,14	2,93	0,69	2,15	2,29		1,95		1,97	0,35
Lu	0,06	0,07				0,33	0,50	0,11	0,35	0,37		0,31		0,30	

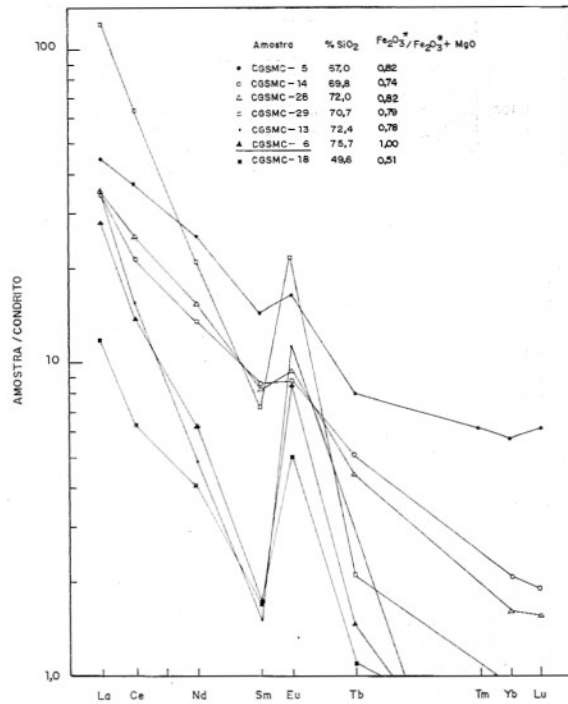


Figura 4 — ETR de amostras da suite tonalítica-trondjemítica do CGSMC, normalizadas aos valores condriticos de Nakamura (1974). A amostra CGSMC-18 é um anortosito.

Tabela 5 — Elementos maiores (% em peso) e traços (ppm) de quatorze amostras do Complexo Granulítico de Santa Catarina. Todo Fe expresso como  $Fe_2O_3$ ; análise total soma 100%.

	Tonalito e trondjemito		Granulitos básicos e intermediários							Piroxenitos				
	4	10	1	5	7	8	9	15	16	2	3	11	13	18
SiO <sub>2</sub>	69,63	75,24	53,47	58,28	54,95	53,14	50,01	60,79	45,80	50,28	51,26	48,56	49,33	52,15
TiO <sub>2</sub>	0,59	0,17	0,79	0,79	0,68	0,77	1,20	0,64	1,07	1,08	0,40	1,11	0,69	0,94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,61	14,17	20,08	18,03	18,71	19,38	13,37	16,31	21,83	4,48	3,79	8,20	6,52	14,62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,37	1,66	8,49	8,22	8,68	9,68	14,68	6,78	12,19	14,96	13,72	14,51	13,85	10,15
MnO	0,15	0,02	0,12	0,11	0,15	0,14	0,23	0,08	0,17	0,26	0,24	0,26	0,23	0,16
MgO	2,10	0,38	3,68	2,80	4,07	4,20	6,48	3,64	4,49	17,56	18,94	14,89	17,46	7,95
CaO	4,25	2,54	8,46	7,05	8,18	8,38	10,78	6,76	11,25	10,26	11,06	10,93	10,91	9,14
Na <sub>2</sub> O	3,21	3,80	3,83	3,65	3,75	3,36	2,59	3,74	2,34	0,69	0,42	0,98	0,79	3,50
K <sub>2</sub> O	0,88	1,98	0,79	0,75	0,55	0,58	0,54	0,96	0,27	0,32	0,14	0,34	0,19	1,18
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,22	0,03	0,29	0,31	0,27	0,36	0,14	0,31	0,60	0,11	0,02	0,22	0,03	0,21
Rb	9	28	6	4	5	5	6	11	4	4	3	5	3	2
Sr	278	718	725	657	696	881	113	744	883	62	74	68	109	84
Y	32	6	27	35	14	23	32	31	31	17	47	59	21	22
Zr	280	170	240	231	109	132	66	238	293	23	122	46	35	58
Nb	16	3	10	9	6	5	6	9	7	2	10	7	3	3
Ga	17	15	23	22	18	21	16	19	25	7	12	12	9	6
Zn	56	24	72	89	74	92	144	66	104	102	187	96	87	229
Cu	20	3	23	13	42	22	41	42	29	167	66	62	77	5
Ni	31	3	20	13	24	19	112	40	8	271	668	227	201	187
Cr	38		22	6	35	23	163	90	2	1282	1411	817	1003	1346
V	51	13	123	108	131	151	268	95	138	137	196	391	280	116
Ba	559	1471	408	649	394	447	85	546	135	90	36	49	52	91
La	78,67	77,35		42,58		28,81	7,34		31,17		3,69	15,00	6,12	
Ce	128,04	133,27	67	89,54	42	57,75	16,11	122	69,08	88	10,51	41,09	16,62	31
Pr	12,22	12,17		10,23		6,42	2,15		8,29		1,73	5,92	2,87	
Nd	48,65	45,11		46,10		29,63	10,74		39,52		9,52	29,62	14,98	
Sm	8,37	5,39		8,97		5,68	3,21		7,74		2,72	8,45	3,89	
Eu	2,22	1,43		2,27		1,87	1,16		2,50		0,74	1,83	1,11	
Gd	7,55	2,82		7,80		4,97	4,21		6,93		2,79	10,07	3,94	
Dy	5,75	0,97		6,00		3,78	5,00		5,39		2,52	9,98	3,29	
Ho	1,13	0,29		1,24		0,93	1,05		1,24		0,51	1,97	0,66	
Er	2,98	0,59		3,16		2,09	3,16		2,99		1,46	5,48	1,81	
Yb	2,31	0,31		2,56		1,78	3,12		2,51		1,14	4,43	1,45	
Lu	0,34	0,05		0,38		0,27	0,51		0,39		0,18	0,65	0,23	



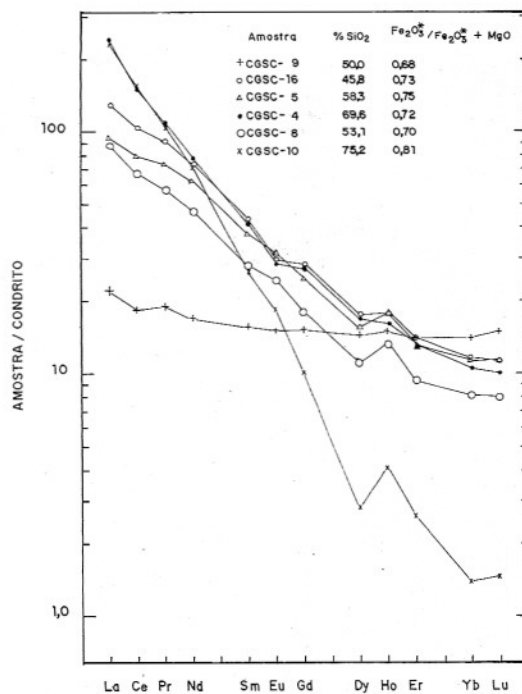


Figura 5 — ETR de amostras de gnaisses de amplo espectro composicional do CGSC, normalizadas aos valores de Nakamura (1974). As anomalias de Ho são aparentes e devidas ao método analítico (ICP).

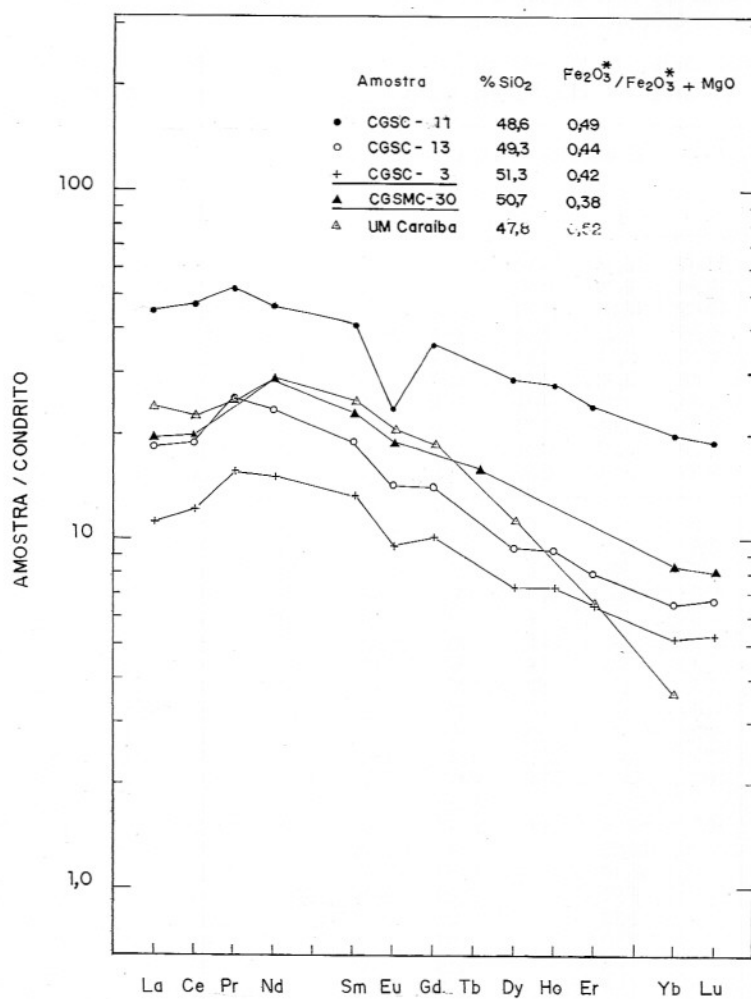


Figura 6 — ETR de amostras de piroxenitos do CGSMC e do CGSC, comparadas com uma amostra de piroxenito do Complexo Jequié (Figueiredo, 1982). Valores condriticos de Nakamura (1974).

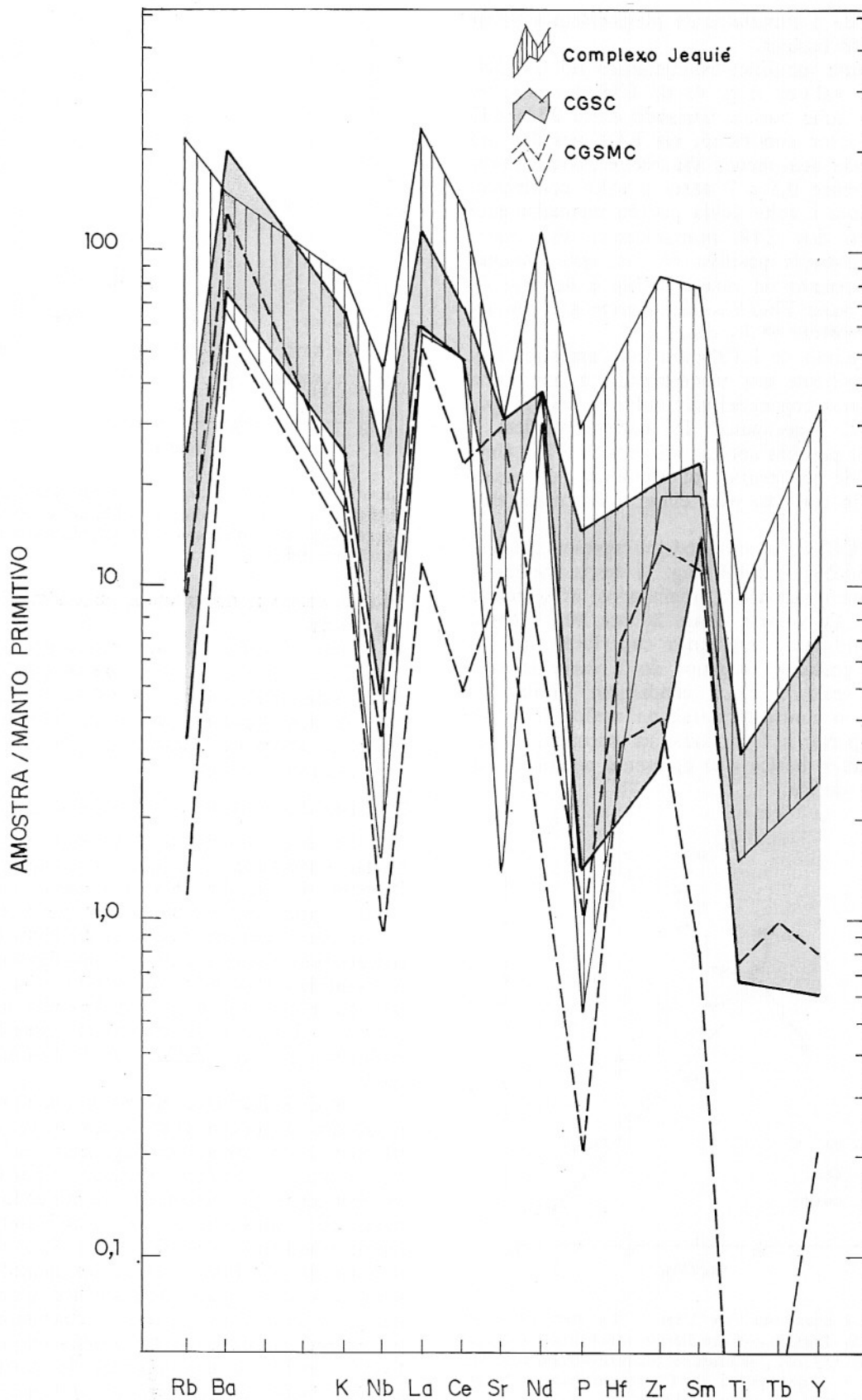


Figura 7 — Comparação de teores de elementos incompatíveis do CGSMC, CGSC e Complexo Jequié (Sighinolfi *et al.*, 1981). Composição do manto primitivo de Wood *et al.* (1981).

diretamente ligados ao aumento do teor de plagioclásio na amostra. É provável que o grupo

sem anomalia de Eu corresponda a composições de líquidos e que o grupo com anomalia positiva

corresponda a cumulos de plagioclásio a partir de líquidos básicos.

A suite tonalítica-trondjemítica do CGSMC apresenta valores (Fig. 4) de ETR leves semelhantes à suite básica, variando entre 20 e 150 vezes o valor condrítico. Os ETR pesados, no entanto, são bem menos abundantes, com valores situados entre 0,1 e 7 vezes o valor condrítico. Isso fornece à suite ácida padrão marcadamente fracionado dos ETR normalizados. Essa suite mostra anomalia positiva de Eu, que aumenta com o aumento da razão Fe/Mg e do teor de SiO<sub>2</sub>. A razão Tb<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> é superior a 1 em todas as amostras analisadas.

O padrão de ETR para uma amostra (Fig. 4) é semelhante aos trondjemitos, o que torna possível uma cogeneticidade entre os dois grupos litológicos. Amortositos de maciços tendem a apresentar padrões horizontalizados de ETR. Uma amostra de piroxenito foi analisada, e mostra um padrão convexo para cima, típico desse tipo litológico.

No CGSC, a suite básica apresenta igualmente padrões de ETR (Fig. 5) desde horizontalizados até nitidamente fracionados, atingindo o grupo do Ce valores desde 20 até 200 vezes o valor condrítico, um tanto superiores aos do SGSMC, portanto. O grupo do Y varia desde 8 até 20 vezes o valor condrítico, similar ao CGSMC; o contraste reside na razão Tb<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub>, que é superior a 1 em todas as amostras, exceto uma. A suite básica não apresenta anomalia significativa de Eu.

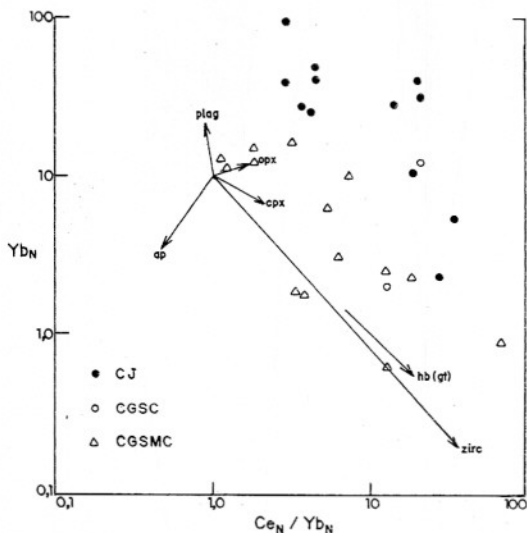


Figura 8 — Diagrama Ce<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> × Yb<sub>N</sub> para amostras de granulitos básicos, intermediários, tonalíticos e trondjemíticos do CGSMC, granulitos tonalítico-trondjemíticos do CGSC e charnoquitos do Complexo Jequié (Sighinolfi *et al.*, 1981; Figueiredo, 1982).

Uma amostra de granulito ácido do CGSC foi analisada, e apresenta, de maneira similar ao CGSMC, significativo fracionamento dos ETR, atingindo a razão Ce<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> em torno de 100.

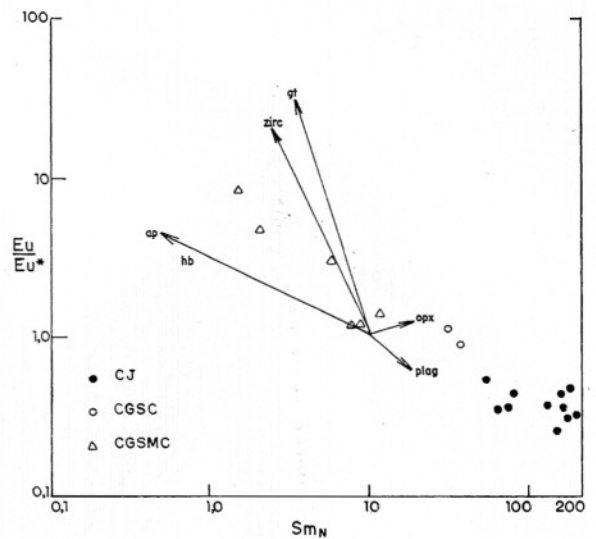


Figura 9 — Diagrama Sm<sub>N</sub> × Eu/Eu\* para granulitos tonalíticos e trondjemíticos do CGSMC e do CGSC e charnoquitos do Complexo Jequié (Sighinolfi *et al.*, 1981; Figueiredo, 1982).

Não se observa, no entanto, anomalia significativa de Eu.

Três amostras de piroxenito do CGSC e uma do CGSMC (Fig. 6) mostram valores levemente superiores a 1 da razão Ce<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> e forma convexa para cima do padrão de ETR normalizados. A anomalia negativa de Eu é significativa nas três amostras.

## DISCUSSÃO DOS DADOS GEOQUÍMICOS

Os dois complexos estudados apresentam muitas semelhanças litológicas e composicionais. Do ponto de vista dos ETR, no entanto, o CGSMC é mais empobrecido. Esse aspecto pode ser igualmente observado em diagrama de elementos incompatíveis, normalizados à composição do manto primitivo (Wood *et al.*, 1981) (Fig. 7). Os dois complexos são mais empobrecidos em ETR e outros elementos incompatíveis, quando comparados com dados publicados do Complexo Jequié.

Os ETR permitem comparar modelos de geração dos complexos granulíticos do sul do Brasil com os da Bahia. Os diagramas Ce<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> × Yb<sub>N</sub> e Sm<sub>N</sub> × Eu/Eu\* indicam a participação de granada e provavelmente hornblenda na geração dos complexos do sul, principalmente na fração trondjemítica (Figs. 8 e 9). Esta pode ter-se formado por fusão parcial dos granulitos básicos, que apresentam efetivamente granada como acessório. Esta situação é particularmente bem caracterizada para o CGSMC, enquanto no CGSC persiste a possibilidade de participação adicionalmente de plagioclásio. O Complexo Jequié parece ter evoluído com nítida participação de plagioclásio. A interpretação resultante é de que o Complexo Jequié provavelmente relete processos crustais menos profundos, sem interferência direta do manto, ao passo que o CGSC

já mostra características de um complexo de base de crosta. Os protólitos do CGSMC teriam sido formados por geração de magmas básicos no manto. Os granulitos básicos decorrentes podem ter sido fundidos parcialmente na base da crosta, gerando líquidos trondjemíticos.

Lembrando as pesquisas de McLennan & Taylor (1984), cabe destacar que os dados geoquímicos obtidos para as amostras do CGSMC e do CGSC poderiam igualmente corresponder a sedimentos arqueanos metamorfizados. Mostra esse autor que os gnaisses básicos e quartzo-feldspáticos, típicos de terrenos arqueanos em vários continentes, podem ser gerados por misturas dos vários tipos de rochas sedimentares analisados. Acredita-se, no entanto, que as interpretações feitas no presente trabalho mantêm sua validade devido à mobilidade relativamente baixa dos elementos terras raras.

### OBSERVAÇÃO FINAL

Os complexos granulíticos encontrados no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina fazem parte do agrupamento de granulitos empobrecidos em elementos incompatíveis, semelhantes aos do Lewisian da Escócia e de outras regiões. O Complexo Jequié faz parte dos complexos granulíticos não empobrecidos nesses elementos (Sighinolfi *et al.*, 1981). O presente trabalho demonstra igualmente que há gradações de abundância de elementos incompatíveis, conforme visto na comparação entre o Complexo Granulítico Santa Maria Chico e o Complexo Granulítico de Santa Catarina. Pressões confinantes da ordem de 10 kb estão associadas a um maior empobrecimento, e é provável que a composição dos fluidos, principalmente a elevada relação  $PCO_2/PH_2O$ , esteja relacionada à extração mais eficiente dos elementos incompatíveis.

### AGRADECIMENTOS

Os trabalhos analíticos foram realizados pelo autor nos laboratórios da Universidade de Southampton, Inglaterra, como Professor Visitante, com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — CNPq (Proc. n.º 20.2453/83-GC), do qual o autor é pesquisador. Discussões com Lauro V. S. Nardi, no campo e no laboratório da UFRGS, tornaram mais qualificado o presente trabalho.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, L.F.F.; ARIOLI, E.E.; DIAS, A.A.; KIRCHNER, C.A. (1971) Geologia das quadriculas de Blumenau e Joinville. Porto Alegre, DNPM/CPRM. Rel. Final.

ALMEIDA, F.F.M. & HASUI, Y. (coord.) (1984) O Pré-cambriano do Brasil. Ed. Edgard Blücher Ltda.

BASEI, M.A.S. (1985) O Cinturão Dom Feliciano em Santa Catarina. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo [inédito].

EVANS, B.W. & TROMMSDORF, V. (1978) Petrogenesis of garnet lherzolite, Cima di Gagnone, Lepontine Alps. Earth Planet. Sci. Lett., **40**:333-348.

FIGUEIREDO, M.C.H. (1982) Geochemistry of high-grade complexes of Bahia State, Brazil. Rev. Bras. Geoc., **12**(1-3):307-312.

GIRARDI, V.A.V. & ULBRICH, H.H.G.J. (1980) Origin and evolution of the Piên Mafic-ultramafic Complex, Southern Brazil. Jour. Geol., **88**(3):251-269.

HARTMANN, L.A. (1976) Ocorrência de granulitos em Luis Alves, SC. XXIX Congr. Bras. Geol., Belo Horizonte. Resumos.

HARTMANN, L.A. & NARDI, L.V.S. (1982) Os Granitos Santo Afonso, Saibro e Vauthier da região de Dom Pedrito, RS: geologia, petrografia e geoquímica de elementos maiores, com interpretação geotectônica. Acta Geol. Leop., **12**:153-178.

HARTMANN, L.A.; SILVA, L.C.; ORLANDI, V. (1979) O Complexo Granulítico de Santa Catarina. Acta Geol. Leop., **6**:94-112.

HUMPHRIS, S.E. (1984) The mobility of the rare earth elements in the crust. In: P. Henderson (ed.) Rare earth element geochemistry. Amsterdam, Elsevier, p. 317-342.

JOST, H. & HARTMANN, L.A. (1984) Província Mantiqueira — Setor Meridional. In: F.F.M. Almeida & Y. Hasui (coords.) O Pré-cambriano do Brasil. São Paulo, Edgard Blücher, p. 345-368.

KAUL, P.F.T. (1979) Pré-Cambriano e Eo-Paleozóico do nordeste de Santa Catarina e leste do Paraná: reavaliação de dados e correlações com a África. II Simp. Reg. Geol., Rio Claro, Anais, **1**:1-15.

MCLENNAN, S.M. & TAYLOR, S.R. (1984) Archaean sedimentary rocks and their relation to the composition of the Archaean continental crust. In: A. Kröner, G.N. Hanson, A.M. Goodwin (eds.) Archaean geochemistry. Berlin, Springer-Verlag, p. 47-72.

MINIOLLI, B. (1972) Aspectos geológicos da região litorânea Piçarras-Barra Velha, SC. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo [inédito].

MOREIRA, M.L.O. & MARIMON, M.P. (1980) Ensaio petrográfico e petroquímico das rochas da fácies granulito, Complexo Granulítico de Santa Catarina, Folha SG.22-ZB. XXXI Congr. Bras. Geol., Camboriú, Anais, **4**:2119-2133.

NAKAMURA, N. (1974) Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. Geochim. Cosmochim. Acta, **38**:757-775.

NARDI, L.V.S. & HARTMANN, L.A. (1979) O Complexo Granulítico Santa Maria Chico do Escudo Sul-riograndense. Acta Geol. Leop., **6**:45-75.

NAUMANN, M.P.; HARTMANN, L.A.; KOPPE, J.C.; CHEMALE, F. (1984) Sequências supra-crustais, gnaisses graníticos, granulitos e granitos intrusivos da região de Ibaré-Palma, RS: geologia, aspectos estratigráficos e considerações geotectônicas. XXXIII Congr. Bras. Geol., Rio de Janeiro, Anais, p. 2417-2425.

PERKINS, D. & NEWTON, R.C. (1981) Charnockite geobarometers based on coexisting garnet-pyroxene-plagioclase-quartz. Nature, **292**:144-146.

SANTOS, E.L.; SILVA, L.C.; ORLANDI, V.; COUTINHO, M.G.N.; ROISENBERG, A.; RAMALHO, R.; HARTMANN, L.A. (1984) Os Escudos Sul-riograndense e Catarinense e a Bacia do Paraná. In: C. Schobbenhaus, D. Campos, G.R. Derze, H.E. Asmus (coords.) Geologia do Brasil. DNPM.

SIGHINOLFI, G.P.; FIGUEIREDO, M.C.H.; FYFE, W. S.; KRONBERG, B.I.; OLIVEIRA, M.A.F.T. (1981) Geochemistry and petrology of the Jequié granulitic complex (Brasil): an Archaean granitic basement complex. Contr. Min. Petrol., **78**:263-271.

WEAVER, B.L. & TARNEY, J. (1980) Rare earth geochemistry of Lewisian granulite-facies gneisses, Northwest Scotland: implications for the petrogenesis of the Archean Lower continental crust. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **51**:279-296.

WELLS, P.R.A. (1977) Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **62**: 123-139.

WOOD, D.A.; TARNEY, J.; WEAVER, B.L. (1981) Trace element variation in Atlantic Ocean basalts and Proterozoic dykes from northwest Scotland: their bearing upon the nature and geochemical evolution of the upper mantle. *Tectonophysics*, **75**:91-112.