CONDIÇÕES DE METAMORFISMO NO COMPLEXO GRANULÍTICO SANTA MARIA CHICO, RS

LEO A. HARTMANN*

ABSTRACT METAMORPHIC CONDITIONS IN THE SANTA MARIA CHICO GRANULITE COMPLEX, RS. Granulite-facies rocks from Western Rio Grande do Sul in southernmost Brazil are bimodal acid and basic in composition, with smaller amounts of intermediate and ultrabasic compositions; supracrustal relics include quartzites, marbles and sillimanite gneisses. The first granulite-facies event is only registered as intensely exsolved megacrysts of pyroxenes, plagioclase and other minerals. A third metamorphic episode was caused by the intrusion of abundant granites, generally containing actinolite, hornblende, clorite and talc from the mafic minerals. Microprobe analyses show the amphiboles as pargasite in the M₂ high-grade event and the plagioclase as andesine, labradorite, bytownite and anorthite. This event was dated at 2.1 Ga by Sm/Nd isofopes and the intrusion of granites occurred at 550 Ma. Temperature and pressure of the M₂ metamorphic event were estimated, using several thermometers and barometers. The temperature is estimated at 800 - 850°C and the pressure at 9.4 kbar.

Keywords: Granulite, geothermobarometry, mineral chemistry.

RESUMO As litologias de fácies granulito ocorrentes no oeste do Rio Grande do Sul são bimodais básicas e ácidas em composição, com volumes menores de rochas intermediárias e ultrabásicas; remanescentes supracrustais incluem quartzitos, mármore e sillimanita gnaisse. O primeiro evento de fácies granulito está registrado somente por megacristais de piroxênio, plagioclásio e outros minerais, sempre com fortes feições de exsolução. Um terceiro episódio metamórfico foi causado pela intrusão de abundantes granitos, gerando actinolita, hornblenda, clorita e talco a partir dos minerais máficos. Análises por microsonda eletrônica mostram que os anfibólios são pargasitas no evento M₂ de alto grau, e que os plagioclásios são andesina, labradorita, bytownita e anorlita. Este evento foi datado em 2,1 Ga por Sm/Nd em minerais separados, ao passo que a intrusão dos granitos ocorreu há 550 Ma. A temperatura e a pressão do evento M₂ foram estimadas utilizando-se vários termômetros e barômetros. A temperatura é estimada em 800 - 850°C e a pressão em 9,4 kbar.

Palavras-chaves: Granulito, geotermobarometria, química mineral.

INTRODUÇÃO O Complexo Granulítico Santa Maria Chico, inicialmente caracterizado por Nardi & Hartmann (1979), ocorre no extremo oeste da área exposta de rochas pré-cambrianas no Rio Grande do Sul. O complexo tem sido mapeado por formandos dos cursos de geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, que caracterizaram as relações geológicas principais. Naumann *et al* (1984) assinalaram as relações geológicas na parte norte do complexo. Revisões regionais foram feitas por Jost & Hartmann (1984) e Santos *et al* (1984). Estudos geocronológicos com utilização de isótopos de Rb/Sr e K/Ar foram realizados por Soliani (1986). Hartmann (1988) avaliou dados de elementos terras raras e apresenta uma seleção de dados de geotermobarometria do complexo. Datação de minerais separados com isótopos de Sm/Nd foi publicada por Hartmann (1987), fornecendo 2,1 Ga para a idade do metamorfismo granulítico mais bem registrado. Figueiredo & Hartmann (1989) compararam o comportamento dos elementos terras raras do complexo com outros terrenos granulíticos do Brasil.

No artigo de Hartmann (1988), são avaliados alguns aspectos geológicos e petrográficos do complexo. Neste trabalho, são apresentados e discutidos dados químicos de minerais e cálculos geotermobarométricos decorrentes. Os dados químicos foram obtidos em microsonda eletrônica Cambridge Instruments da Open University, Inglaterra, em condições de 20 kV, feixe desfocado. Os cálculos de pressão e temperatura foram realizados com a utilização de computador dessa universidade inglesa.

ASPECTOS MINERALÓGICOS A mineralogia presente no complexo é de origem metamórfica, não tendo sido

identificados minerais ou texturas ígneas remanescentes. O evento metamórfico M₁, de fácies granulito, está registrado pela presença de porfiroclastos de piroxênios e plagioclásio. Esses minerais não foram analisados, devido à presença de lamelas de exsolução. A possibilidade de que se trata de remanescentes de mineralogia ígnea não pode no entanto, ser descartada.

O evento M₂, de metamorfismo regional de fácies granulito, está bem desenvolvido, formando a mineralogia dominante, com ortopiroxênio, clinopiroxênio, plagioclásio, hornblenda, biotita, magnetita, ilmenita e pirrotita. Este evento é de natureza sintectônica, com formação de superfícies planares e Kneações minerais. Os minerais analisados são de litologias básicas do complexo.

O evento metamórfico M₃ corresponde à diaforese relacionada à intrusão dos abundantes corpos graníticos há cerca de 550 Ma. Foram formados anfibólios do tipo actinolita, cummingtonita e hornblenda, correspondentes a várias fácies do metamorfismo de contato. O ortopiroxênio foi alterado para talco e o clinopiroxênio foi pouco afetado. O plagioclásio foi pouco afetado; em amostras em que foi recristalizado nesse evento, sua composição permanece semelhante ao cristal de M₂. Neste evento, não foram geradas superfícies penetrativas e nem lineações minerais. É comum encontrar-se, na mesma amostra, os cristais de minerais máficos completamente alterados para um número elevado de pequenos cristais de temperatura baixa, sem orientação, enquanto os minerais anidros de M₂ permanecem inalterados e com a mesma textura granoblástica de M₂. A proximidade e abundância de corpos graníticos intrusivos, mais jovens que o complexo granulítico, e as feições texturais conduzem à hipótese principal de que o evento M₃ seja de natureza térmica de contato.

* Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Avenida Bento Gonçalves, 9500, CEP 91500, Porto Alegre, RS, Brasil

Em fraturas, ocorrem minerais do tipo epidoto, microclínio e clorita, correspondentes a um evento que pode ser designado de M₄. Esses minerais não foram estudados neste trabalho.

QUÍMICA DE MINERAIS Com o objetivo de investigar a química dos minerais e as condições físicas de sua formação, foram determinadas dezenas de pontos analíticos por dispersão de comprimento de onda. Os minerais analisados são ortopiroxênio, clinopiroxênio, plagioclásio, anfibólio, granada, olivina, espinélio e ilmenita, conforme consta das tabelas 1 a 6.

O ortopiroxênio tem composição situada entre "hiperstênio" e "bronzita" (Fig. 1). Os clinopiroxênios têm composição mais restrita, correspondendo na maior parte a salita; duas amostras correspondem a diopsídio e uma a diopsídio cálcico (Tabs. 1 e 2).

O plagioclásio tem composição situada entre andesina e anortita (Fig. 2), não tendo sido identificadas composições mais sódicas. O conteúdo de ortoclásio é muito baixo, em geral (Tab. 3).

Os anfibólios gerados no evento M₂ pertencem à série hastingsita-pargasita (Fig. 3). As linhas que unem a compo-

Tabela 1 - Análise química (% peso) e fórmula estrutural de ortopiroxênios

Table 1 - Chemical analysis (weight %) and structural formula of orthopyroxenes

CGSMC-	1	12	17	25	31	35	36	37	38	39	40		
	a	b						a	b				
SiO ₂	52,38	51,39	51,55	52,26	51,22	51,17	55,04	52,44	52,30	52,37	54,90	51,65	51,72
TiO ₂	0,07	0,09	0,09	0,07	0,12	0,09	0,05	0,07	0,07	0,07	0,18	0,12	0,11
Al ₂ O ₃	1,35	1,02	1,04	1,26	1,87	1,24	3,03	0,99	4,01	4,21	3,11	2,46	1,29
Cr ₂ O ₃	0,03	0,02	0,02	0,00	0,00	0,02	0,10	0,00	0,00	0,00	0,15	0,02	0,00
FeO _T	22,73	29,20	28,70	23,79	25,98	29,12	11,73	25,40	16,39	16,55	10,24	25,37	26,66
NiO	0,03	-	-	0,00	-	-	0,05	0,00	0,00	0,02	0,03	-	-
MnO	0,48	0,68	0,65	0,66	0,67	0,62	0,30	0,73	0,39	0,36	0,25	0,35	0,69
MgO	22,03	17,41	17,55	21,07	19,19	17,17	30,03	20,05	25,96	25,92	30,76	20,31	19,77
CaO	0,49	0,57	0,57	0,49	0,57	0,63	0,42	0,62	0,54	0,48	0,47	0,56	0,57
Na ₂ O	0,04	0,00	0,02	0,05	0,02	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00	0,02	0,02
Total	99,63	100,38	100,19	99,65	99,64	100,08	100,75	100,32	99,68	100,00	100,09	100,86	100,83
Número de cátions na base 6 (0)													
Si	1,9626	1,9727	1,9771	1,9682	1,9516	1,9698	1,9319	1,9767	1,9002	1,8971	1,9271	1,9336	1,9533
Ti	0,0020	0,0025	0,0025	0,0020	0,0035	0,0025	0,0014	0,0020	0,0019	0,0019	0,0048	0,0034	0,0029
Al	0,0598	0,0460	0,0469	0,0561	0,0840	0,0563	0,1252	0,0441	0,1718	0,1798	0,1287	0,1085	0,0574
Cr	0,0009	0,0004	0,0004	0,0000	0,0000	0,0004	0,0027	0,0000	0,0000	0,0000	0,0041	0,0004	0,0000
Fe	0,7122	0,9373	0,9204	0,7494	0,8278	0,9374	0,3442	0,8006	0,4980	0,5014	0,3006	0,7941	0,8419
Ni	0,0009	-	-	0,0000	-	-	0,0012	0,0000	0,0000	0,0004	0,0008	-	-
Mn	0,0151	0,0222	0,0212	0,0210	0,0217	0,0203	0,0087	0,0234	0,0119	0,0109	0,0074	0,0111	0,0219
Mg	1,2302	0,9963	1,0035	1,1828	1,0897	0,9853	1,5711	1,1264	1,4061	1,3997	1,6097	1,1336	1,1130
Ca	0,0198	0,0235	0,0235	0,0198	0,0234	0,0259	0,0156	0,0249	0,0210	0,0187	0,0178	0,0225	0,0232
Na	0,0026	0,0000	0,0014	0,0040	0,0013	0,0014	0,0000	0,0013	0,0011	0,0011	0,0000	0,0013	0,0013
Total	4,0061	4,0009	3,9969	4,0033	4,0030	3,9993	4,0020	3,9994	4,0120	4,0110	4,0010	4,0085	4,0149
Mg	62,2	50,3	51,0	60,0	55,5	50,1	81,0	57,0	72,6	72,5	83,2	57,8	55,6
Fe+Mn	36,8	48,5	47,8	39,0	43,3	48,6	18,2	41,7	26,3	26,5	15,9	41,1	43,2
Ca	1,0	1,2	1,2	1,0	1,2	1,3	0,8	1,3	1,1	1,0	0,9	1,1	1,2

Tabela 2 - Análise química (% peso) e fórmula estrutural de clinopiroxênios

Table 2 - Chemical analysis (weight %) and structural formula of clinopyroxenes

CGSMC-	1	12	17	25	31	34	35	36	37			38	39	40
									a	b	c			
SiO ₂	51,52	52,02	52,53	50,77	50,95	51,07	53,23	52,03	49,68	49,75	49,33	50,73	49,51	51,82
TiO ₂	0,28	0,21	0,17	0,41	0,30	0,39	0,21	0,22	0,45	0,51	0,49	0,70	0,60	0,24
Al ₂ O ₃	2,43	1,82	1,77	3,46	2,42	3,55	3,18	1,92	6,01	6,21	6,62	3,96	4,64	2,23
Cr ₂ O ₃	0,10	0,05	0,00	0,03	0,03	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,02	0,26	0,05	0,02
FeO _T	8,60	11,14	9,20	10,02	11,86	10,71	4,27	10,16	6,18	6,25	6,11	4,25	10,88	10,60
NiO	0,03	-	0,00	-	-	-	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	-	-	-
MnO	0,20	0,27	0,23	0,28	0,25	0,13	0,14	0,31	0,13	0,19	0,11	0,13	0,17	0,31
MgO	13,33	12,03	12,98	12,07	11,60	12,17	15,67	12,65	13,41	13,32	13,16	15,50	11,89	12,54
CaO	22,36	22,14	22,49	21,93	21,23	22,04	24,08	22,78	23,82	23,79	23,85	23,64	21,34	21,75
Na ₂ O	0,48	0,48	0,62	0,50	0,48	0,57	0,20	0,54	0,52	0,47	0,50	0,17	0,74	0,62
Total	99,33	100,16	99,69	99,47	99,12	100,63	101,17	100,61	100,20	100,51	100,19	99,34	100,22	100,13
Número de cátions na base 6 (0)														
Si	1,9372	1,9595	1,9612	1,9168	1,9433	1,9106	1,9278	1,9470	1,8404	1,8376	1,8271	1,8777	1,8770	1,9468
Ti	0,0079	0,0058	0,0047	0,0116	0,0085	0,0110	0,0056	0,0063	0,0126	0,0141	0,0136	0,0195	0,0168	0,0068
Al	0,1077	0,0807	0,0784	0,1538	0,1088	0,1564	0,1358	0,0847	0,2623	0,2702	0,2892	0,1729	0,2057	0,0989
Cr	0,0030	0,0015	0,0000	0,0010	0,0010	0,0000	0,0044	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005	0,0076	0,0015	0,0005
Fe	0,2704	0,3508	0,2887	0,3136	0,3784	0,3350	0,1294	0,3179	0,1915	0,1931	0,1893	0,1314	0,3423	0,3330
Ni	0,0009	-	0,0000	-	-	-	0,0008	0,0000	0,0000	0,0004	0,0000	-	-	-
Mn	0,0064	0,0084	0,0074	0,0090	0,0080	0,0039	0,0043	0,0099	0,0039	0,0059	0,0034	0,0039	0,0054	0,0099
Mg	0,7471	0,6756	0,7265	0,6795	0,6954	0,6786	0,8458	0,7053	0,7407	0,7333	0,7266	0,8552	0,6663	0,7020
Ca	0,9008	0,8935	0,9049	0,8872	0,8676	0,8835	0,9346	0,9134	0,9455	0,9414	0,9463	0,9376	0,8598	0,8756
Na	0,0350	0,0347	0,0448	0,0369	0,0355	0,0415	0,0143	0,390	0,0370	0,0334	0,0358	0,0125	0,0542	0,0454
Total	4,0164	4,0105	4,0166	4,0121	4,0105	4,0205	4,0028	4,0235	4,0339	4,0294	4,0318	4,0183	4,0290	4,0189
Mg	38,8	35,0	37,7	35,9	35,7	35,7	44,2	36,2	39,4	39,1	39,0	44,4	35,6	36,6
Fe+Mn	14,4	18,6	15,4	17,2	19,8	17,8	7,0	16,9	10,4	10,6	10,3	7,0	18,5	17,8
Ca	46,8	46,4	46,9	46,9	44,5	46,5	48,8	46,9	50,2	50,2	50,7	48,6	45,9	45,6

Tabela 3 - Análise química (% peso) e fórmula estrutural de plagioclásios
Table 3 - Chemical analysis (weight %) and structural formula of plagioclase

CGSMC-	1	3			12	17	25	31	32		33			34	36	37		39	40	
		a	b	c					a	b	a	b	c			a	b		a	b
SiO ₂	55,29	46,58	45,48	46,89	51,31	61,14	52,31	55,65	49,15	50,61	60,53	60,32	60,00	55,31	58,43	46,14	44,38	55,98	57,23	57,83
TiO ₂	0,02	-	-	-	-	0,04	-	-	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Al ₂ O ₃	27,77	33,83	34,75	33,54	26,03	24,60	29,63	27,69	31,90	31,32	24,69	24,35	24,54	27,97	26,29	34,25	35,73	28,12	26,74	26,47
FeO _r	0,13	0,07	0,08	0,10	0,11	0,14	0,13	0,11	0,20	0,04	0,03	0,01	0,01	0,15	0,20	0,17	0,00	0,08	0,25	0,13
CaO	10,26	17,64	18,53	17,31	9,04	6,45	12,70	10,30	15,13	14,60	6,23	6,14	6,28	10,72	8,51	18,06	19,87	10,41	8,76	8,53
Na ₂ O	5,45	1,57	1,09	1,69	6,53	7,58	4,30	5,60	3,03	3,57	7,98	7,98	7,89	5,50	6,71	1,44	0,65	5,78	6,67	6,80
K ₂ O	0,32	0,01	0,00	0,00	0,05	0,50	0,08	0,16	0,01	0,01	0,38	0,36	0,42	0,31	0,31	0,00	0,00	0,15	0,18	0,20
Total	99,24	99,70	99,93	99,53	99,07	100,45	99,35	99,59	99,44	100,17	99,86	99,20	99,16	99,98	100,47	100,08	100,65	100,54	99,85	99,98
Número de cátions na base 8 (O)																				
Si	2,5089	2,1484	2,0985	2,1639	2,5933	2,7093	2,3959	2,5151	2,2590	2,3034	2,6987	2,7063	2,6955	2,4963	2,6062	2,1243	2,0420	2,5070	2,5707	2,5923
Ti	0,0006	-	-	-	-	0,0012	-	-	0,0006	0,0006	0,0006	0,0012	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
Al	1,4853	1,8389	1,8901	1,8246	1,3884	1,2851	1,5930	1,4752	1,7284	1,6801	1,2977	1,2876	1,2996	1,4880	1,3823	1,8588	1,9375	1,4846	1,4159	1,3989
Fe	0,0048	0,0027	0,0032	0,0038	0,0042	0,0052	0,0048	0,0042	0,0075	0,0016	0,0010	0,0005	0,0005	0,0058	0,0073	0,0065	0,0000	0,0031	0,0095	0,0047
Ca	0,4990	0,8716	0,9160	0,8560	0,4384	0,3064	0,6207	0,4990	0,7452	0,7121	0,2978	0,2954	0,3020	0,5186	0,4065	0,8909	0,9795	0,4995	0,4214	0,4097
Na	0,4796	0,1402	0,0973	0,1508	0,5730	0,6509	0,3802	0,4979	0,2698	0,3152	0,6900	0,6944	0,6872	0,4816	0,5805	0,1284	0,0577	0,5017	0,5812	0,5908
K	0,0183	0,0006	0,0000	0,0000	0,0027	0,0282	0,0047	0,0095	0,0006	0,0006	0,0216	0,0204	0,0238	0,0176	0,0174	0,0000	0,0000	0,0087	0,0101	0,0114
Total	4,9965	5,0024	5,0051	4,9991	5,0000	4,9863	4,997	5,0009	5,0111	5,0136	5,0074	5,0058	5,0092	5,0085	5,0008	5,0095	5,0173	5,0052	5,0094	5,0084
An	51,5	86,7	90,9	85,8	44,7	32,3	63,1	51,0	74,5	70,5	30,7	30,4	31,0	52,4	41,9	88,0	94,7	50,9	43,0	41,9
Ab	46,6	13,2	9,0	14,2	55,0	64,7	36,4	48,0	25,4	29,4	67,1	67,4	66,5	45,8	56,3	12,0	5,3	48,2	55,9	56,9
Or	1,9	0,1	0,0	0,0	0,0	3,0	0,5	1,0	0,1	0,1	2,2	2,2	2,5	1,8	1,8	0,0	0,0	0,9	1,1	1,2

sição dos anfíbólios aos piroxênios na figura 1 são aproximadamente paralelas, indicando condições próximas ao equilíbrio. Esta conclusão coincide com as observações texturais. Na figura 3, são também mostradas as composições dos anfíbólios cálcicos do evento térmico M₃. As flechas indicam a variação composicional do anfibólio de M₂ para o anfibólio de Ma, na mesma amostra. Uma amostra indica que o anfibólio diaforético corresponde a hornblenda, gerada a partir de uma hornblenda de alto grau; esta última teve sua composição parcialmente afetada pela formação do novo mineral, conforme visto ao microscópio e mostrado na figura 3. Os dados constam da tabela 4.

As granadas analisadas são soluções sólidas almandina-piropo ricas em grossulária (Fig. 4). A zonação dos cristais não é muito acentuada, e corresponde a núcleos mais ricos em

Mg, passando a bordos mais ricos em Fe. As análises constam da tabela 5.

Os espinélios analisados correspondem a magnetita e hercinita, tendo sido analisada ainda ilmenita (Tab. 6).

Na amostra CGSMC-38, foram analisados seis pontos em dois cristais de olivina, fornecendo valores médios de SiO₂ em torno de 40%, Cr₂O₃ em torno de 0%, CaO em torno de 0,03% e Al₂O₃ em torno de 0%. O conteúdo extremamente baixo dos três elementos-traços indica cristalização metamórfica para a olivina deste espinélio lherzolito.

GEOBAROMETRIA No artigo de Hartmann (1988), foram apresentados os resultados barométricos nas duas amostras estudadas com mais detalhe. As amostras CGSMC-37 e -39 foram selecionadas para estudo por apresentarem as pa-

Tabela 4 - Análise química (% peso) e fórmula estrutural de anfíbólios

Table 4 - Chemical analysis (weight %) and structural formula of amphiboles

CGSMC-	1				3		12			25	
	a	b	c	d	a	b	a	b	c	a	b
SiO ₂	43,23	54,05	52,77	52,47	45,08	45,01	43,08	53,29	49,65	42,97	51,33
TiO ₂	1,76	0,04	0,11	0,06	0,09	0,07	1,74	0,07	0,36	1,59	0,22
Al ₂ O ₃	11,17	2,43	3,72	3,81	13,29	13,29	10,74	1,62	4,86	11,71	3,98
Cr ₂ O ₃	0,23	0,02	0,00	0,02	-	-	-	-	-	-	-
FeO _r	13,07	15,93	15,25	13,02	10,73	11,24	16,83	16,51	17,17	15,52	17,22
MnO	0,12	0,51	0,39	0,34	0,20	0,23	0,20	0,43	0,31	0,19	0,46
MgO	12,58	17,19	16,25	16,20	13,70	13,56	10,06	14,34	11,93	11,05	17,09
CaO	11,81	6,98	8,17	10,75	11,75	11,79	11,38	10,60	11,82	11,78	5,33
Na ₂ O	1,26	0,17	0,33	0,42	1,64	1,63	1,63	0,16	0,57	1,81	0,56
K ₂ O	1,50	0,01	0,09	0,05	0,09	0,10	0,58	0,02	0,15	0,73	0,26
Total	96,73	97,33	97,08	97,14	96,57	96,92	96,24	97,04	96,72	97,35	96,45
Número de cátions na base 23 (O)											
Si	6,4662	7,7937	7,6477	7,5859	6,5787	6,5638	7,8249	7,8249	7,4024	6,4395	7,5338
Ti	0,1980	0,0039	0,0119	0,0059	0,0101	0,0080	0,0080	0,0080	0,0409	0,1788	0,0239
Al	1,9693	0,4129	0,6347	0,6498	2,2864	2,2841	0,2800	0,2800	0,8558	2,0687	0,6890
Cr	0,0277	0,0018	0,0000	0,0019	-	-	-	-	-	-	-
Fe ³⁺	0,4114	-	-	1,2125	0,6620	0,7088	0,4555	1,1510	0,4887	0,4328	-
Fe ²⁺	1,2092	-	-	0,3205	0,6289	0,6410	1,6651	0,8260	1,8328	1,4939	-
Fe	-	1,9208	1,8479	-	-	-	-	-	-	-	2,1136
Mn	0,0157	0,0624	0,0475	0,0419	0,0250	0,0288	0,0259	0,0539	0,0391	0,0235	0,0576
Mg	2,8060	3,6953	3,5100	3,4919	2,9794	2,9480	2,2816	3,1389	2,6569	2,4679	3,7378
Ca	1,8933	1,0783	1,2681	1,6659	1,8373	1,8415	1,8554	1,6681	1,8919	1,8908	0,8380
Na	0,3658	0,0482	0,0918	0,1183	0,4644	0,4617	0,4812	0,0451	0,1648	0,5261	0,1588
K	0,2858	0,0021	0,0171	0,0085	0,0171	0,0192	0,1128	0,0043	0,0283	0,1396	0,0478
Total	15,6625	15,0194	15,0767	15,1448	15,4893	15,5049	14,9904	15,0002	15,4016	15,6616	15,2003

Tabela 4 - Continuação
Table 4 - Continuing

CGSMC-	31			32			34	35	36	37		38	39
	a	b	c	a	b	c				a	b		
SiO ₂	42,12	53,42	54,10	44,84	47,03	48,42	40,63	45,00	43,39	41,56	41,83	43,03	41,58
TiO ₂	2,07	0,11	0,09	0,48	0,39	0,20	2,68	0,74	1,81	1,48	1,49	1,49	2,25
Al ₂ O ₃	11,76	1,86	1,39	12,62	10,71	9,16	12,73	13,20	11,17	15,31	15,10	12,85	13,29
Cr ₂ O ₃	-	-	-	0,12	0,03	0,00	-	0,39	0,00	0,00	0,03	-	-
FeO _r	17,13	13,50	13,80	13,37	12,55	12,04	16,62	7,20	14,93	10,08	9,89	6,30	13,59
MnO	0,17	0,20	0,23	0,20	0,20	0,20	0,06	0,06	0,15	0,14	0,11	0,09	0,08
MgO	9,66	14,98	14,98	12,28	13,30	14,33	9,86	16,30	11,78	13,61	13,93	16,47	11,89
CaO	11,67	12,53	12,58	11,96	12,13	12,11	11,77	12,50	12,16	12,36	12,25	12,82	11,78
Na ₂ O	1,53	0,14	0,12	1,22	1,02	0,92	1,56	2,02	1,27	2,63	2,68	1,90	2,35
K ₂ O	1,44	0,10	0,03	0,32	0,23	0,14	1,92	0,45	1,24	0,23	0,26	0,86	0,91
Total	97,55	96,84	97,32	97,41	97,59	97,52	97,83	97,95	97,90	97,40	97,57	95,81	97,72
Número de cátions na base 23 (O)													
Si	6,3760	7,7905	7,8613	6,5813	6,8351	7,0094	6,1564	6,3652	6,4601	6,0819	6,1020	6,3019	6,1821
Ti	0,2359	0,0121	0,0100	0,0526	0,0422	0,0220	0,3048	0,0785	0,2026	0,1624	0,1640	0,1640	0,2517
Al	2,0983	0,3191	0,2383	2,1830	1,8352	1,5621	2,2744	2,2015	1,9608	2,6406	2,5958	2,2178	2,3286
Cr				0,0135	0,0038	0,0000		0,0435	0,0000	0,0000	0,0039		
Fe ³⁺	0,2865	0,1762	0,1524	0,6389	0,5183	0,5847	0,2667	0,4410	0,4055	0,3629	0,4052	0,2203	0,3474
Fe ²⁺	1,8688	0,4641	1,5171	0,9794	0,9901	0,8543	1,8272	0,4165	1,4373	0,8608	0,7909	0,5477	1,3299
Fe													
Mn	0,0217	0,0249	0,0286	0,0250	0,0248	0,0248	0,0079	0,0070	0,0195	0,0173	0,0134	0,0116	0,0097
Mg	2,1805	3,2576	3,2395	2,6864	2,8811	3,0911	2,2263	3,4410	2,6136	2,9680	3,0296	3,5962	2,6363
Ca	1,8929	1,9582	1,9567	1,8803	1,8897	1,8779	1,9113	1,8921	1,9398	1,9375	1,9150	2,0113	1,8772
Na	0,4485	0,0386	0,0337	0,3474	0,2888	0,2577	0,4571	0,5524	0,3651	0,7449	0,7587	0,5403	0,6773
K	0,2790	0,0192	0,0063	0,0601	0,0426	0,0255	0,3711	0,0810	0,2362	0,0428	0,0491	0,1613	0,1734
Total	15,6881	14,0605	15,0339	15,4710	15,3682	15,3285	15,8149	15,5300	15,6569	15,8286	15,8376	15,7754	15,8267

Tabela 5 - Análise química (% peso) e fórmula estrutural de granadas
Table 5 - Chemical analysis (weight %) and structural formula of garnets

CGSMC-	33			34		37		39
	a	b	c	a	b	a	b	
SiO ₂	39,59	39,90	39,53	39,04	39,10	40,77	40,14	39,41
TiO ₂	0,04	0,05	0,07	0,09	0,07	0,05	0,04	0,11
Al ₂ O ₃	22,50	22,59	22,58	21,55	21,56	22,80	22,63	21,91
Cr ₂ O ₃	0,08	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
FeO _r	26,60	26,45	26,43	27,58	27,94	18,24	19,42	24,55
MnO	0,37	0,35	0,38	0,85	0,97	0,79	1,21	0,82
MgO	10,94	11,03	11,09	6,06	5,67	11,79	10,40	7,55
CaO	1,13	1,13	1,10	6,66	6,70	7,32	7,40	7,29
Total	101,13	101,56	101,24	101,83	102,01	101,79	101,26	101,66
Número de cátions na base 24 (O)								
Si	5,9689	5,9864	5,9553	5,9954	6,0058	5,9920	5,9814	5,9850
Ti	0,0039	0,0059	0,0079	0,0101	0,0080	0,0058	0,0040	0,0121
Al	3,9981	3,9944	4,0104	3,9012	3,9032	3,9492	3,9740	3,9224
Cr	0,0092	0,0073	0,0074	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0019
Fe	3,3541	3,3195	3,3298	3,5427	3,5888	2,2420	2,4204	3,1179
Mn	0,0466	0,0445	0,0486	0,1108	0,1264	0,0976	0,1532	0,1061
Mg	2,4590	2,4661	2,4897	1,3865	1,2988	2,5820	2,3102	1,7086
Ca	0,1829	0,1821	0,1783	1,0968	1,1028	1,1528	1,1810	1,1863
Total	16,0227	16,0062	16,0274	16,0435	16,0376	16,0312	16,0292	16,0403
	núcleo	intermediário	borda			núcleo	borda

Figura 1 - Composição de piroxênio, hornblenda e granada
Figure 1 - Composition of pyroxenes, hornblende and garnet

ragênese e texturas mais adequadas para estudos barométricos. A pressão obtida é da ordem de 9,4 kbar para o evento M₂. Na amostra -37, foram analisados ainda cristais pequenos

de granada, clinopiroxênio e plagioclásio, sendo obtida uma pressão de 8,4 kbar, para uma temperatura estipulada era 700°C. Nos mesmos cristais, obtém-se uma pressão de 8,1 kbar, ao serem empregados granada, ortopiroxênio e plagioclásio. Este evento granulítico de pressão mais baixa, em torno de 8,2 kbar, somente foi observado nesta amostra, e é considerado como um reajuste local a condições declinantes de metamorfismo. A amostra parece corresponder a um metasedimento, pois os teores de Cr e Ni são muito baixos, tanto na amostra quanto nos minerais máficos.

As moléculas de jadeíta e tschermakita foram calculadas pelo método de Cawthorn & Collerson (1974) em clinopiroxênio de duas amostras. Estas moléculas são geralmente consideradas como bons indicadores de condições de pressão. Os valores obtidos na amostra CGSMC-34 são de 4,1 para jadeíta e 4,6 para tschermakita, e na amostra -39 de 5,4 e 5,8. Estes valores são altos, indicando condições de alta pressão para a

Tabela 6 - Análises químicas (% peso) e fórmula estrutural de espinélio e ilmenita: mag = magnetita; ilm = ilmenita; her = hercynita; pie = "picotita" (= espinélio com Cr)

Table 6 - Chemical analysis (weight %) and structural formula of spinels and ilmenite: mag - magnetite; ilm - ilmenite; her - hercynite; pie - "picotite" (chromial spinel)

CGSMC-	17		34	35	36	37		38		39	40
	a	b				a	b	a	b		
SiO ₂	0,11	0,05	2,64	0,13	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,34
TiO ₂	0,21	46,77	52,61	0,16	49,71	0,03	0,02	0,07	0,08	51,04	49,84
Al ₂ O ₃	0,16	0,00	0,18	1,47	0,02	62,63	63,29	48,69	48,92	0,02	0,07
Cr ₂ O ₃	0,10	0,00	0,02	7,12	0,02	0,05	0,06	12,84	12,09	0,03	0,00
FeO _r	91,51	49,48	40,02	83,87	48,83	25,61	24,04	24,15	25,15	46,98	46,82
NiO	-	-	-	-	-	0,09	0,09	-	-	-	-
MnO	0,03	1,82	1,46	0,39	0,58	0,18	0,20	0,22	0,24	0,29	1,26
MgO	0,00	0,00	0,00	0,40	0,92	13,04	13,34	14,20	13,84	1,34	0,34
CaO	0,00	0,04	2,68	0,04	0,02	0,01	0,04	0,01	0,01	0,02	0,02
Total	92,14	98,16	99,61	93,58	100,17	101,70	101,14	100,24	100,39	99,79	98,69
Número de cátions na base 32 (O)											
Si	0,0438	0,0139	0,6917	0,0512	0,0201	0,0128	0,0128	0,0131	0,0132	0,0199	0,0946
Ti	0,0643	9,9244	10,3484	0,0478	10,1624	0,0055	0,0027	0,0113	0,0142	10,3596	10,2929
Al	0,0761	0,0000	0,0569	0,6712	0,0076	15,5352	15,6641	12,8329	12,9072	0,0075	0,0229
Cr	0,0341	0,0000	0,0032	2,1801	0,0032	0,0077	0,0103	2,2701	2,1398	0,0065	0,0000
Fe ³⁺	21,0408			17,3984		0,5853	0,4137	1,1636	1,2344		
Fe ²⁺	10,5548			9,7486		3,9222	3,8083	3,3531	3,4747		
Fe		11,6758	8,7539		11,1008					10,6039	10,7516
Ni						0,0150	0,0150				
Mn	0,0097	0,4345	0,3230	0,1281	0,1342	0,0324	0,0351	0,0425	0,0454	0,0065	0,2920
Mg	0,0000	0,0000	0,0000	0,2326	0,3743	4,0914	4,1762	4,7345	4,6174	0,5401	0,1378
Ca	0,0110	0,0108	0,7503	0,0155	0,0069	0,0031	0,0094	0,0032	0,0032	0,0069	0,0070
Total	31,8346	22,0594	20,9274	30,4735	21,8095	24,2106	24,2106	24,4243	24,4495	21,6112	21,5988
	mag	ilm	ilm	mag-Cr	ilm	her	her	pie	pie	ilm	ilm

Figura 2 - Composição de plagioclásios
Figure 2 - Composition of plagioclase

cristalização dos piroxênios, em concordância com os cálculos barométricos.

A amostra CGSMC-33 contém a paragênese sillimanita, granada, plagioclásio, rutilo, quartzo e grafita. O plagioclásio e a sillimanita estão intensamente alterados para muscovita. O geobarômetro granada-plagioclásio (Newton & Haselton 1981), em temperatura estipulada em 800°C, forneceu pressão de 4,5 a 6,9 kbar. Estes valores não são concordantes com aqueles obtidos nos granulitos máficos, e seguem a tendência dos metassedimentos de fácies granulito de apresentarem resultados barométricos incorretos e baixos.

GEOTERMOMETRIA Os estudos termométricos realizados foram baseados nas paragêneses ortopiroxênio-clinopiroxênio, granada-clinopiroxênio e granada-hornblenda.

Figura 3 - Composição de anfíbios
Figure 3 - Composition of amphiboles

Pares de piroxênios coexistentes foram analisados em várias amostras. Foram selecionados cristais em contato, per-

Figura 4 - Composição de granadas. A linha reta representa o limite entre granadas mais ferrosas de terrenos de baixa pressão de outras regiões do mundo e granadas mais cálcio-magnesianas provenientes de terrenos granulíticos de altas pressões. As três amostras de granadas de granulitos básicos do Complexo Granulítico Santa Maria Chico caem no campo de alta pressão; uma amostra de granada de metapelite cai no outro campo

Figure 4 - Composition of garnets. Garnets from basic granulites from low-pressure granulite terrains from other parts of the world fall above the line (towards the iron-rich corner); those from high-pressure terrains fall below the line towards compositions more calcic-magnesian. The three samples of garnet from basic granulites from the Santa Maria Chico Granulite Complex fall in the high-pressure field; one sample of garnet from a metapelite falls in the other field

tendendo a maioria ao evento M₂; os cristais analisados na amostra CGSMC-37 são pequenos, podendo corresponder a um evento posterior a M₂. Na tabela 7, são apresentados os resultados dos cálculos termométricos, para um erro estimado de 5% no conteúdo de Ca do ortopiroxênio. Os termômetros a dois piroxênios indicam que o evento M₂ ocorreu a cerca de 800°C, mas o desvio padrão dos dados é muito elevado. A falta de consistência do termômetro torna sua validade restrita, podendo o resultado ser considerado apenas uma aproximação. A amostra CGSMC-37 indica uma temperatura da ordem de 700°C

O par granada-clinopiroxênio ocorre na amostra CGSMC-39, fornecendo os resultados da tabela 8. Este termômetro indica temperaturas da ordem de 800°C para o evento M₂, principalmente quando se considera o termômetro desenvolvido por Ellis & Green (1979).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAWTHORN, R.G. & COLLIERSON, K.D. 1974. The recalculation of pyroxene end-member parameters and the estimation of ferrous and ferric iron content from electron microprobe analyses. *Am. Mineral.*, 59:1203-1208.
- DAHL, P.S. 1980. The thermal-compositional dependence of Fe²⁺/Mg distributions between coexisting garnets and pyroxenes: applications to geothermometry. *Am. Mineral.*, 65:852-866.
- ELLIS, E.J. & GREEN, D.H. 1979. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 71:13-22.
- FIGUEIREDO, M.C.H. & HARTMANN, L.A. 1989. Geoquímica dos elementos terras raras em granulitos e charnockitos do Brasil. In: FORMOSO, M.L.L.; NARDI, L.V.S. & HARTMANN, L.A. *Geoquímica dos Elementos Terras Raras no Brasil*. SBGq/DNPM/CPRM. p. 99-105.

Tabela 7 - Temperatura de recristalização do M₂, com base em dois piroxênios. A amostra CGSMC-37 corresponde a M₃

Table 7 - M₂ recrystallization temperatures, based on two pyroxenes. An M₃ crystal was analysed on sample CGSMC-37

Amostra CGSMC-	1	17	25	31	35	36	37	39	40
Pressão estipulada, kbar	9,4	9,4	10	10	9,4	9,4	9,4	10	9,4
Temperatura calculada, °C									
Wells (1977)	829	782	835	940	822	764	696	871	845
Wood & Banno (1973)	826	786	813	871	892	766	761	844	822

Tabela 8 - Temperatura de M₂, calculada a partir de granada e clinopiroxênio na amostra CGSMC-39

Table 8 - M₂ temperatures, calculated from garnet and clinopyroxene in sample CGSMC-39

Pressão estipulada, kbar	9,4	8	7
Temperatura calculada, °C			
Saxena (1979)	947	939	934
Ellis & Green (1979)	815	810	806
Dahl (1980)	863	852	846

Graham & Powell (1984) desenvolveram o termômetro granada-hornblenda pela comparação empírica com outros termômetros, e indicam sua utilização para rochas de alto grau. O par foi avaliado na amostra CGSMC-37, fornecendo a temperatura de 830°C para o evento M₂. Este resultado está próximo ao obtido nos outros termômetros.

As temperaturas obtidas com o par magnetita-ilmenita foram muito baixas, da ordem de 500°C, e devem corresponder ao reequilíbrio de baixo grau.

CONCLUSÕES A composição química dos minerais fornece informações significativas para a evolução do complexo. A composição cálcica do plagioclásio indica uma geração das litologias a partir de magmas básicos diferenciados, conforme já indicado pela geoquímica de rocha total.

Alguns dos resultados geotermobarométricos apresentam inconsistências, como a pressão obtida de granada-sillimanita-plagioclásio e a ampla variação de temperaturas obtida a partir de dois piroxênios. Mesmo assim, é possível concluir que o evento M₂ atingiu aproximadamente condições de 9,4 kbar e 800°C no Complexo Granulítico Santa Maria Chico. O reajuste local do equilíbrio mineralógico parece ter ocorrido a cerca de 8 kbar e 700°C, possivelmente durante a ascensão epirogênica do complexo.

Agradecimentos O trabalho analítico e cálculos foram realizados na Open University, Inglaterra, em 1985, encontrando-se o autor nessa oportunidade na condição de professor visitante na Universidade de Southampton. O apoio financeiro foi dado pelo Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico do qual o autor é pesquisador.

- GRAHAM, C.M. & POWELL, R. 1984. A garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing and application to the Pelona Schist, Southern California. *J. Metamorphic Geol.*, 2:13-31.
- HARTMANN, L.A. 1987. Isócrona Sm-Nd de 2,1 Ga em minerais de duas amostras do Complexo Granulítico Santa Maria Chico, RS. In: CONGR. BRAS. GEOQ., 1. Porto Alegre, 1987. *Anais...* Rio de Janeiro, SBGq. v. 1, p. 105-111.
- HARTMANN, L.A. 1988. Geoquímica de terras raras e geotermobarometria de granulitos de Dom Pedrito e Luís Alves, no extremo sul do Brasil. *Geoch. Bros.*, 2(1): 1-14.
- JOST, H. & HARTMANN, L.A. 1984. Província Mantiqueira - Setor Meridional. In: ALMEIDA, F.F.M. & HASUI, Y. (coords.). *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo, Edgard Blücher. p. 345-368.
- 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. In: CONGR. BRAS. GEOL., 33. Rio de Janeiro, 1984. *Anais...* Rio de Janeiro, SBG. p. 2417-2425.
- NEWTON, R.C. & HASELTON, H.J. 1981. Thermodynamics of the garnet-plagioclase-AhSiO₃ quartz geobaromet.». In: NEWTONS, R.C.; NAVROTSKY, A.; WOOD, B.J. eds. *Thermodynamics of Minerals and Melts*. New York, Springer-Verlag. p. 125-145.
- 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: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E. (coofds.). *Geologia do Brasil*. DNPM.
- SAXENA, S.K. 1979. Garnet-clinopyroxene geothermometer. *Contrib. Mineral. Petroi.*, 70:229-235.
- SOLIANI, E., Jr. 1986. *Os dados geocronológicos do Escudo Sul-Riograndense e suas implicações de ordem geotectônica*. São Paulo. 388 p. (Tese de Doutorado, IG/USP).
- WELLS, P.R.A. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petroi.*, 62:129-139.
- WOOD, B.J. & BANNO, W. 1973. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petroi.*, 42:109-124.

MANUSCRITO A656

Recebido em 27 de abril de 1990

Revisão do autor em 05 de abril de 1991

Revisão aceita em 27 de junho de 1991