

METAMORFISMO TÉRMICO NOS MICAXISTOS SERIDÓ EM TORNO DO BATÓLITO GRANÍTICO DE ACARÍ (RN), NORDESTE DO BRASIL: QUÍMICA MINERAL DE ILMENITAS E TURMALINAS

Laécio Cunha de Souza¹

Jean Michel Legrand¹

Jean Verkaeren²

1 Universidade Federal do Rio Grande do Norte – CCET – Departamento de Geologia,
laecio@geologia.ufrn.br; legrand@geologia.ufrn.br

2 Université Catholique de Louvain, Bélgica, e-mail: verkaeren@geol.ucl.ac.be

RESUMO

Os micaxistos da Formação Seridó, topo do Grupo Seridó, foram intrudidos pelo volumoso magmatismo granítico de Acari, sintectônico a deformação D_2 e de idade brasileira. Dois episódios metamórficos M_1 e M_2 afetaram esses micaxistos. O primeiro em fácies xisto verde (metamorfismo de carga) foi superposto por uma extensa zonação mineralógica M_2 , simultânea ao alojamento do maciço granítico de Acari. Quatro zonas metamórficas foram definidas em torno deste maciço: (1) biotita + clorita + muscovita, (2) biotita + granada, (3) biotita + cordierita + andaluzita $\pm$ estaurolita, (4) biotita + cordierita + sillimanita $\pm$ estaurolita. A ilmenita e a turmalina, presentes como acessórios nas quatro zonas metamórficas, mostraram importantes variações texturais e químicas que envolvem a neoformação e recristalização de granada, cordierita e estaurolita durante M_2 . A ilmenita encontra-se freqüentemente alongada na xistosidade S_2 e associada à biotita, granada e cordierita. Vários microblastos de ilmenita distribuídos nas quatro zonas foram analisados (Cunha de Souza, 1996). Os teores de Mn são variáveis e bastante elevados, entre 1.03 e 4.34% em peso. As razões $Mn/(Mn+Fe)$ são nitidamente inferiores nas zonas de mais altas temperaturas (Cd+And e Cd+Sil) em comparação com àquelas de mais baixas temperaturas (Bt+Chl+Mu e Bt+Grt). Neste contexto, a cristalização e recristalização de granada, cordierita e estaurolita controlam a quantidade de MnO das ilmenitas. Assim, as ilmenitas que se recristalizaram nas zonas de mais alto grau metamórfico tiveram menor quantidade de Mn disponível. Uma parte do Mn foi consumida durante M_2 na formação progressiva de porfiroblastos de granada, cordierita e estaurolita. A turmalina possui distribuição homogênea no micaxisto, sendo encontrada tanto na matriz como na forma de inclusões nos porfiroblastos de cordierita. Para efeito analítico foram consideradas àquelas turmalinas zonadas e homogêneas. Os grãos zonados são caracterizados por substituições entre Al-Fe e Na-Ca e, à medida que nos aproximamos do batólito granítico, as turmalinas tornam-se mais aluminosas e menos sódicas. Estas mudanças químicas no sentido das composições mais aluminosas são compatíveis com os micaxistos portadores de andaluzita e sillimanita.

Palavras-chave: Química mineral, Metamorfismo térmico, Micaxistos, Ilmenita, Turmalina

ABSTRACT

The micaschists of the Seridó Formation, the top of the Seridó Group, Borborema Province, was intruded by syntectonic granitoids related D₂ deformation during the Brasileiro Orogeny. Two metamorphic episodes M₁ and M₂ have been described around the Acari batholith. The former, metamorphosed under conditions green schist facies (burial metamorphism), was overprinted by an extensive mineralogical zonation (M₂) simultaneous with the emplacement of the Acari granitic batholith. Four metamorphic zones were defined: (1) biotite (Bt) + chlorite (Chl) + muscovite (Mu) + ilmenite (Ilm) + tourmaline (Tur), (2) biotite + garnet (Grt) + ilmenite + tourmaline, (3) biotite + cordierite (Cd) + andalusite (And) ± staurolite (St) + ilmenite + tourmaline, (4) biotite + cordierite + sillimanite (Sil) ± staurolite + ilmenite + tourmaline. Ilmenite and tourmaline show important textural and chemical variations following the neoformation and recrystallization of garnet, cordierite and staurolite. The ilmenite is frequently oriented along the schistosity S₂ and associated to biotite, garnet and cordierite. Ilmenite microblasts of the four metamorphic zones were analyzed. Concentrations of Mn are high and vary between 1.03 and 4.34 Wt.%. The ratios Mn/(Mn+Fe) in the higher temperature metamorphic zones (Cd+And and Cd+Sil) are lower compared to those of lower temperature zones (Bt+Chl+Mu and Bt+Grt). In the higher metamorphic facies, the crystallization and recrystallization of garnet, cordierite and staurolite controlled the amount of MnO in the ilmenites during M₂. This may be the reason for the lower Mn content of ilmenite in the higher temperature zones. Tourmalines are found in the rock matrix and as in inclusions in cordierite. Both homogeneous and zoned tourmalines were observed. The zoned ones are characterized by chemical replacement of Al by Fe and Na by Ca, toward the granitic batholith, in such a way they become more aluminous and less sodic.

Keywords: Mineral chemistry, Thermal metamorphism, Micaschists, Ilmenite, Tourmaline

INTRODUÇÃO

No metamorfismo associado com a intrusão de batólitos graníticos são comuns às reações de transferência, troca e hidrólise entre fluidos e minerais (Karlstrom & Williams, 1995). A interação fluido – mineral favorece especialmente as reações de hidrólise, as quais envolvem dissolução e precipitação dos minerais (Bucher & Frey 1994). O sincronismo entre alojamento de corpos magmáticos brasileiros, zonas de cisalhamento e metamorfismo na faixa Seridó tem conduzido Cunha de Souza *et al.* (1991), Legrand *et al.* (1992), Luiz Silva *et al.* (1993), Cunha de Souza *et al.* (1996) e Cunha de Souza (1996) a tratar o metamorfismo como um sistema aberto. Neste contexto, as transformações minerais nos micaxistos, onde freqüentemente associam-se veios de quartzo, mostram que as reações de hidrólise foram predominantes (Cunha de Souza, 1996). Este trabalho apresenta o comportamento químico dos minerais ilme-

nita e turmalina visando mostrar a efetiva participação destes acessórios no balanço químico, envolvendo as transformações metamórficas hidrotermais nos micaxistos Seridó ao longo da auréola térmica, de baixo a alto grau metamórfico, que circunda o batólito granítico de Acari – RN (Fig. 1).

ARCABOUÇO GEOLÓGICO

A área de estudo está situada na faixa Seridó, no nordeste da Província Borborema (Fig. 1), abrangendo uma superfície de 250 km² aproximadamente. O micaxisto Seridó corresponde aos metassedimentos do tipo flysch (Caby 1989) que sofreram metamorfismo durante o Neoproterozóico (Brasiliiano). Estes metassedimentos representam a unidade superior do Grupo de Seridó o qual repousa sobre o embasamento arqueano – paleoproterozóico (Van Schmus *et al.* 1995, Dantas 1997). Os metapelitos do Grupo Seridó registram bem as mudanças nas condições metamórficas e tectônicas da orogê-

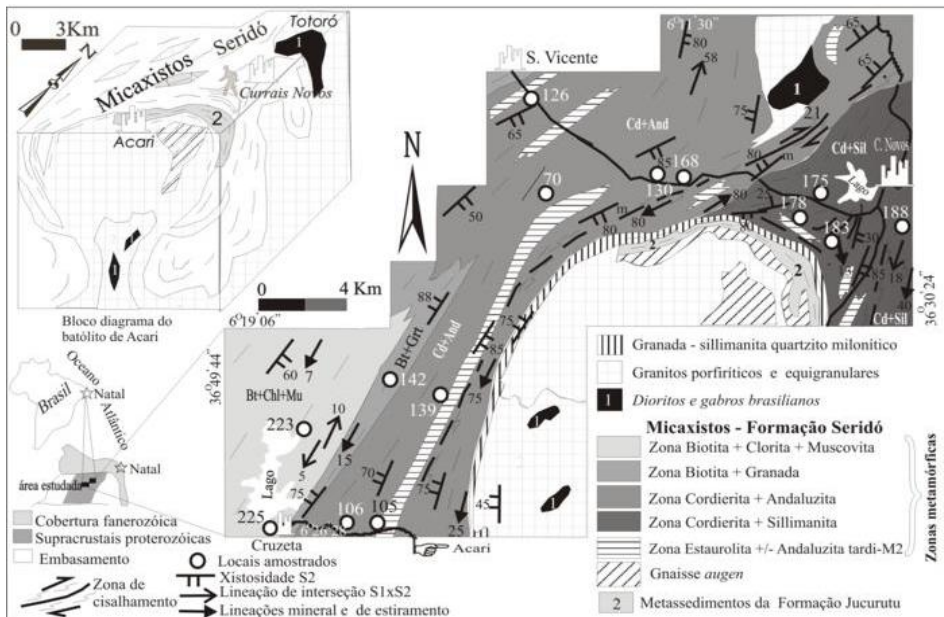


Figura 1 – Mapa da auréola metamórfica em torno do batólito granítico de Acari mostrando as zonas metamórficas e locais de amostragem de ilmenitas e turmalinas

se Brasileira/Pan-africana. O tectonismo brasileiro é caracterizado por zonas de cisalhamento profundas, sob regime transpressivo, as quais serviram de acesso para o alojamento de batólitos sinorogênicos (Archanjo *et al.*, 1992). O maciço granítico de Acari é em grande parte circundado por micaxisto no qual dois episódios metamórficos (M_1 e M_2) podem ser distinguidos. M_1 ocorre em fácies xisto verde e é atribuído a um metamorfismo de carga. M_2 está sobreposto a M_1 e, em torno do maciço de Acari desenvolve uma extensa auréola térmica. A análise textural dos minerais metamórficos, principalmente de M_2 , permitiu o estabelecimento das seguintes zonas metamórficas: (1) biotita + clorita + muscovita – BCM (Fig. 2a, b); (2) biotita + granada – BG (Fig. 3); (3) cordierita + andaluzita – CA (Fig. 4); (4) cordierita + sillimanita – CS (Fig. 5). Além destas as-

sembléias, plagioclasio, quartzo (veios), turmalina, ilmenita e uma fase fluida evoluíram continuamente durante M_2 . Este episódio se desenvolveu sob regime tectônico transpressivo onde a xistosidade principal S_2 , às vezes milonítica, freqüentemente apresenta-se com mergulho forte. As temperaturas de pico durante M_2 (600 a 650°C e 400 a 450°C) foram alcançadas respectivamente nas zonas CS e BCM (Cunha de Souza, 1996). O período sin- a tardi- M_2 foi marcado pela recristalização, sob regime de temperatura decrescente, dos minerais índices (cordierita, andaluzita, sillimanita, estaurolita e granada), além dos acessórios turmalina e ilmenita.

PETROGRAFIA

Os dados petrográficos dos micaxistos resultam das observações de campo e do estudo de aproximadamente 250 seções

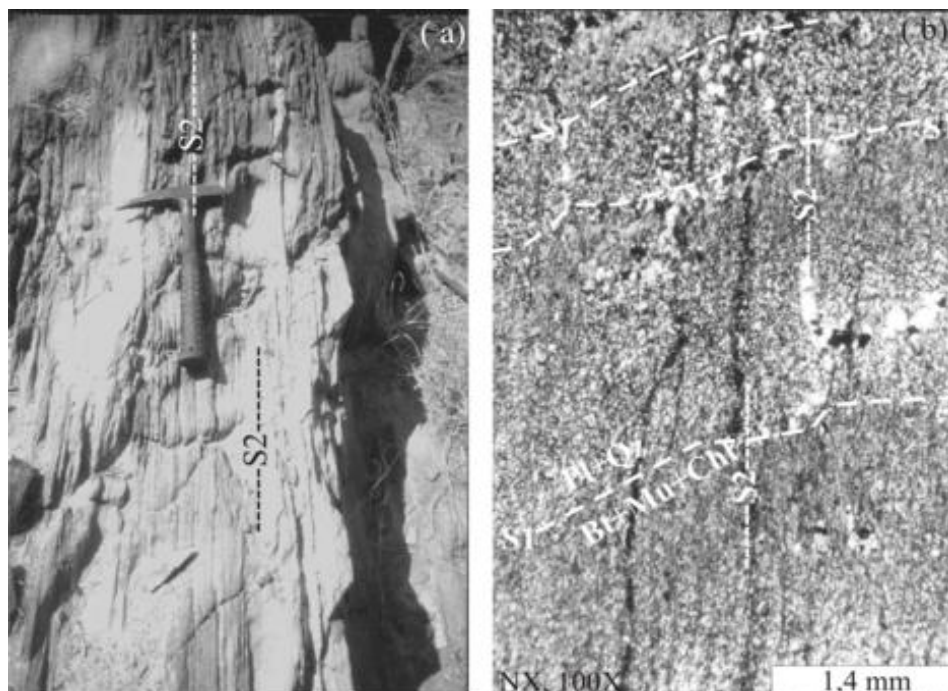


Figura 2a, b – (a) Clorita – muscovita – biotita filito mostrando a foliação S_2 e (b) fotomicrografia no mesmo filito evidenciando alternância de biotita/muscovita/clorita (zona Bt+Mu+Chl) versus plagioclásio/quartzo (Pl+Qz) determinando a foliação S_1 superposta pela foliação principal S_2 (Afloramento LLJ-223).

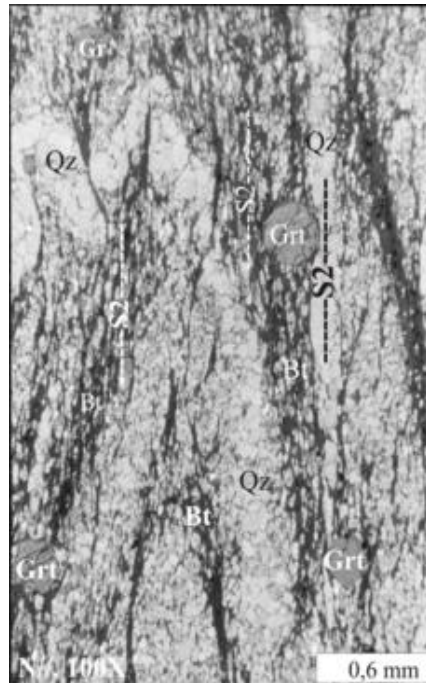


Figura 3 – Fotomicrografia em granada – biotita xisto na zona biotita – granada, com textura granolepidoporfioblástica revelando microporfiroblastos de granada (Grt) tardi- S_2 , exudado de quartzo (Qz) e biotita (Bt), além da penetrativa xistosidade S_2 (Afloramento LLW-142).

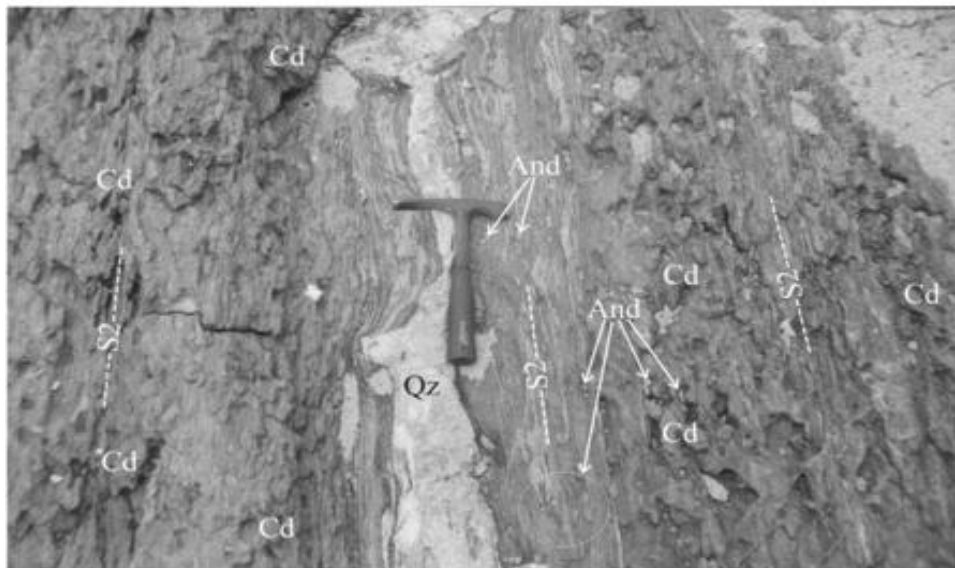


Figura 4 – Andaluzita – cordierita – biotita xisto na zona cordierita (Cd) + andaluzita (And), com textura porfirolepidoblástica, mostrando faixas de cordierita nodular na foliação S_2 e porfiroblastos de andaluzita (ponto esbranquiçados), além de exudado de quartzo (Qz) estirado e encaixado na foliação principal S_2 (Afloramento LLW-168).

delgadas, onde minerais acessórios são representados principalmente pela turmalina (2 a 15%) e ilmenita (<2%). Os biotita xistos mostram proporções variáveis de cordierita, andaluzita, sillimanita, granada, estauroлита, clorita, muscovita, plagioclásio, quartzo, turmalina, ilmenita e epidoto. Os micaxistos apresentam textura lepidoblástica e lepidogranoblástica, embora o arranjo porfirolepidoblástico de certas faixas ricas em megablastos de cordierita e andaluzita ou sillimanita seja freqüente. Às vezes as cordieritas e andaluzitas/sillimanitas podem ser respectivamente cloritizadas e muscovitizadas. Os primeiros atingem 30 cm de comprimento e se apresentam na forma nodular, prismática e fibrosa com granulometria grossa e geralmente acompanhados por venulações de quartzo. Os blastos de estauroлита (< 2cm) estão habitualmente associados com as venulações de quartzo. Regionalmente podem ser mapeadas faixas

ricas em cordierita + andaluzita, cordierita + andaluzita ± estauroлита, cordierita + sillimanita, alternando com faixas ricas em biotita + plagioclásio + quartzo ± granada. A turmalina e ilmenita estão presentes em quase todas essas faixas. Este arranjo em faixas pode ser observado a nível de afloramento ou mesmo em escala regional, longitudinalmente (paralelo à foliação S_2) com vários quilômetros. A formação destas faixas tem sido atribuída aos “corredores hidrotermais”, em que zonas de intensa deformação permitiriam e favoreceriam a circulação de fluidos e calor (Etheridge *et al.* 1983 e 1984, Yardley & Bottrell 1992).

A biotita, com dimensões inferiores a 3,0 mm de comprimento, ocorre geralmente alongada seguindo a xistossidade principal S_2 , ocasionalmente paralela à S_1 . São comuns inclusões de zircão e turmalina. Seu pleocroísmo marrom claro a escuro torna-se progressivamente avermelhado com a proximidade

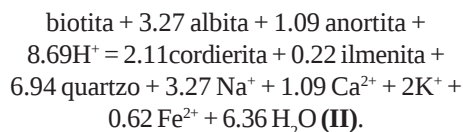
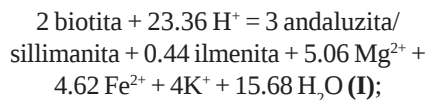


Figura 5 – Sillimanita – cordierita – biotita xisto na zona cordierita (Cd) + sillimanita (Sil), com textura porfirolepidoblástica, enfatizando megablastos de cordierita nodular, syn- a tardi-foliação S_2 e porfiroblastos de sillimanita, além, de exudado de quartzo (Qz) acompanhando a foliação principal S_2 (Afloramento LLW-175).

do maciço granítico. A desestabilização da biotita para clorita, ilmenita e principalmente para cordierita, andaluzita, estauroлита, sillimanita e granada é frequentemente observada (equações R_1 e R_2). O plagioclásio varia de oligoclásio a andesina. Seu tamanho é submilimétrico nas regiões do fácies xisto verde (BCM, BG) e atinge 2 mm nas zonas metamórficas do fácies anfibolito (CA, CS). Ele é encontrado em *fabric* de forma associado com exsudados de quartzo, substituindo a andaluzita e sillimanita e como inclusões reativas em cordierita.

A turmalina pode acompanhar a xistossidade S_1 e se concentrar nas charneira de dobras F_2 e também seguindo S_2 , a qual transpõe S_1 // S_0 , além de formar agregados inclusos em cordierita. Ela se apresenta sob a forma de cristais (<1 mm) hipidiomórficos a idiomórficos com seções triangulares típicas, igualmente sob a forma prismática alongada, às vezes aciculares (Fig. 6a, b, c) e também como uma massa homogênea coloidal.

A ilmenita é correntemente alongada na matriz dos micaxistos, paralela à xistossidade S_2 e está associada com a biotita e granada. Com frequência encontra-se na matriz e também como inclusões em cordierita (Fig. 7a, b, c). As relações texturais indicam que a maioria das transformações minerais responsáveis pela geração da auréola térmica está associada com desestabilização da biotita e do plagioclásio. Neste contexto, a neoformação da ilmenita estaria ligada principalmente às transformações (I) e (II) seguintes (Cunha de Souza, 1996):



PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

As análises das fases minerais foram obtidas utilizando uma microsonda eletrônica CAMECA SX – 50 do Laboratório de Geologia e Mineralogia da Universidade

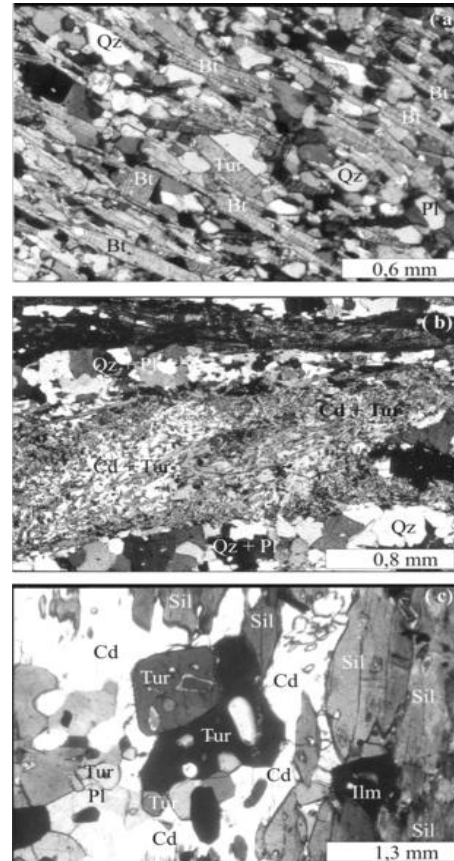


Figura 6 – (a) Fotomicrografia em biotita filito da zona biotita + muscovita + clorita mostrando crescimento de turmalina (Tur) na foliação S_2 definida por biotita (Bt); afloramento LLJ-223, NX, 100X. **(b)** Fotomicrografia em micaxisto da zona cordierita + andaluzita evidenciando cordierita (Cd) poiquiloblástica com inclusões de turmalina (Tur) acicular; Afloramento LLW-70, NX, 100X. **(c)** Fotomicrografia mostrando agregados de turmalinas (Tur) em sillimanita – cordierita – biotita xisto com plagioclásio (Pl) na zona cordierita (Cd) + sillimanita (Sil) e textura granoblástica, além do crescimento de ilmenita (Ilm); Afloramento LLW-175, NX, 40X.

Católica de Louvain – UCL/Bélgica. A tensão de aceleração foi de 15 KeV, corrente de 20 nA e tempo de contagem de 10 segundos. Foi aplicado os padrões sintéticos de faialita para o Si, de safira para o Al, de cromita para o Cr e os padrões naturais de rutilo para o Ti, de hematita para o Fe, de rodonita para o Mn, de wollastonita para o Ca, de olivina para o Mg de oligoclásio para o Na e de leucita para o K.

RESULTADOS

Ilmenitas

Vários microblastos de ilmenita dos micaxistos, selecionados em todas as zonas metamórficas (Fig. 1) foram analisados e calculados na base de 3 oxigênios (Tab. 1). As ilmenitas possuem os teores de Mn variáveis, bastante elevados e situados entre 1.03 e 4.34 % peso. As razões Mn/(Mn + Fe) são mais elevadas naquelas ilmenitas provenientes das zonas metamórficas de mais baixa temperatura definidas pelas paragéneses biotita + clorita + muscovita e biotita + granada. Na região limite entre as zonas da biotita + granada e cordierita + andaluzita (amostra

LLJ106), as ilmenitas mostram valores de Mn/(Mn+Fe) elevados (Fig. 8). O teor de Mn é claramente mais baixo nas ilmenitas das zonas com cordierita + andaluzita e cordierita + sillimanita. Quando encontradas na forma de inclusões em granada, mostram razões Mn/(Mn+Fe) mais elevadas comparadas àquelas da matriz (LLJ142, 106, LLW130, LLJ139). Este comportamento é também válido para aquelas ilmenitas inclusas em estauroлита e cordierita (LLJ105) ou seja, o enriquecimento do Mn (Fig. 8).

Turmalinas

A turmalina é um mineral acessório amplamente distribuído nos micaxistos, tanto na matriz quanto na forma de inclusões nos porfiroblastos, principalmente cordierita. Os grãos são de tamanho submilimétrico e a cristalização/recristalização é mais intensa ao longo das zonas metamórficas com cordierita + andaluzita e cordierita + sillimanita. Às vezes a concentração anômala ao longo das foliações metamórficas So/S_1 e S_2 indica uma mobilização/remobilização intensa do boro, permitindo a formação de ní-

Tabela 1 – Análises químicas (% peso) de ilmenitas das zonas metamórficas nos micaxistos em torno do maciço de Acarí

	Zona Bt+Cl+Mu			Zona Bt+Gr			Zona Cd+And				Zona Cd+Sil				
Amostra	LLJ225c	LLJ225e	LLJ223c	LLJ142incl	LLJ142c	LLJ106c	LW126incl	LLW130c	LW168incl	LLJ139b	LW188	LW188	LW175	LW175	LW178
SiO ₂	0,36	0,06	0,13	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TiO ₂	52,83	52,84	52,66	53,33	54,04	52,58	51,91	53,08	51,76	53,36	53,90	52,97	53,70	53,62	52,21
Al ₂ O ₃	0,06	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,00	0,07	0,07	0,07	0,08	0,02
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,06	0,07	0,09	0,10	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00
FeOtotal	41,23	42,51	40,69	43,32	43,17	42,62	46,35	44,56	47,77	44,28	44,85	45,14	46,36	45,99	47,08
MnO	4,34	4,04	3,51	3,25	2,66	3,23	1,47	1,18	0,56	1,70	2,05	2,62	1,18	1,37	1,07
MgO	0,05	0,00	0,22	0,00	0,00	0,07	0,22	0,20	0,68	0,08	0,01	0,15	0,17	0,20	0,05
CaO	0,04	0,06	0,10	0,00	0,03	0,04	0,03	0,04	0,00	0,01	0,01	0,04	0,03	0,00	0,00
TOTAL	98,91	99,53	97,40	99,97	99,99	98,66	99,98	99,06	100,85	99,47	100,92	100,99	101,52	101,26	100,43
Número de cátions com base em 3 Oxigênios															
Si IV	0,009	0,002	0,003	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Al	0,002	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,002	0,002	0,002	0,003	0,001
Ti VI	1,013	1,008	1,025	1,013	1,028	1,012	0,983	1,017	0,971	1,019	1,009	0,995	1,002	1,002	0,988
Cr	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe +2	0,926	0,921	0,941	0,944	0,970	0,939	0,976	0,983	0,991	0,979	0,933	0,942	0,962	0,956	0,988
Mn	0,094	0,087	0,077	0,070	0,057	0,070	0,031	0,025	0,012	0,037	0,044	0,056	0,025	0,029	0,023
Mg	0,002	0,000	0,008	0,000	0,000	0,003	0,008	0,008	0,025	0,003	0,001	0,006	0,006	0,008	0,002
Ca	0,001	0,002	0,003	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000
Mn/(Mn+Fe)	0,092	0,086	0,076	0,069	0,056	0,069	0,031	0,025	0,012	0,036	0,045	0,056	0,025	0,029	0,023
	b=borda	c=centro do cristal			incl=inclusão em grana da										

b=borda

c=centro do cristal

incl=inclusão em granada

veis de espessura centimétrica de “turmalinitos”. Assim, os grãos de turmalina poderiam representar relictos detríticos (Pettijohn *et al.*, 1973; Michailidis *et al.*, 1996) recristalizados e/ou minerais neoformados durante M_1 e M_2 . A maioria dos grãos são homogêneos e alguns cristais exibem zonação ótica.

A Tabela 2 mostra as análises químicas das turmalinas das zonas metamórficas BCM, CA e CS. Dois grupos de turmalinas foram observados: (A) As turmalinas zonadas menos freqüentes encontradas na matriz; (B) As turmalinas homogêneas, as mais amplamente distribuídas, encontram-se tanto na matriz quanto como inclusões, principalmente na cordierita. Estes dois tipos podem coexistir numa mesma seção delgada, e os sobrecrecimentos à partir de turmalinas preexistentes/detríticas durante os episódios metamórficos M_1 e M_2 são possíveis.

Dois grãos de turmalina do grupo A foram analisados, um pertencente a zona BCM (LLJ223) e outro a zona CA (LLJ106) (Fig. 9). O perfil de composições da turmalina LLJ223 mostra o aumento de Al acompanhado pela diminuição de Fe (Fig. 9a,b). Uma diminuição de Na está associada com um ligeiro aumento do Ca (Fig. 9c). A variação da razão $Mg/(Mg+Fe)$ é mais acentuada nas turmalinas LLJ223 e LLJ106 e essa razão acompanha a variação dos teores de Al (Fig. 9d). O cristal analisado do afloramento LLJ106 não mostra uma zonação sistemática e, as mudanças nas concentrações de Al, Si, Fe, Na e na razão $Mg/(Mg+Fe)$ são evidentes e oscilatórias (Fig. 9a,b,c,d).

As análises de turmalinas dos micaxistos Seridó quando comparadas à química das turmalinas e suas afinidades litológicas (Henry e Guidotti 1985), indicam composições de metapelitos e metapsamitos pobres em Al para os micaxistos das zonas metamórficas BCM e BG (Fig. 10, campo E) e, de metapelitos e metapsamitos aluminosos para os micaxistos das zonas metamór-

ficas CA e CS (Fig. 10, campo D). Essa mudança química no sentido das composições aluminosas é compatível com os micaxistos portadores de aluminossilicatos tais como andaluzita e sillimanita.

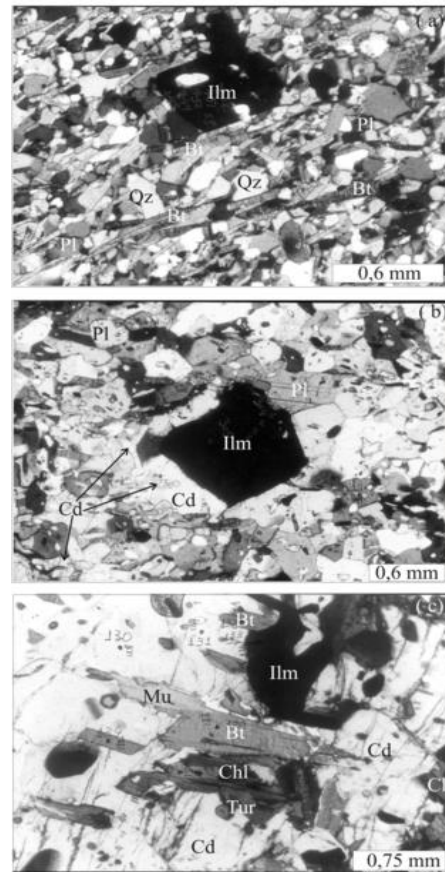


Figura 7 – Fotomicrografia em biotita filito na zona biotita + muscovita + clorita evidenciando blastese de ilmenita (Ilm) na matriz de quartzo (Qz) e plagioclásio (Pl), e foliação S_2 definida por biotita (Bt); Afloramento LLJ-223, NX, 100X. (b) Fotomicrografia em micaxisto da zona cordierita (Cd) + andaluzita (And) mostrando blasto de ilmenita (Ilm); Afloramento LLW-168, NX, 100X. (c) Fotomicrografia caracterizando o crescimento de ilmenita (Ilm) preenchendo microfissuras em cordierita-biotita xisto, com biotita (Bt), muscovita (Mu), clorita (Chl) e turmalina (Tur) da zona cordierita + sillimanita (Sil) e textura granoblástica; Afloramento LLW-175, NX, 100X.

Metamorfismo térmico nos micaxistos seridó em torno do batólito granítico de Acará (RN)...

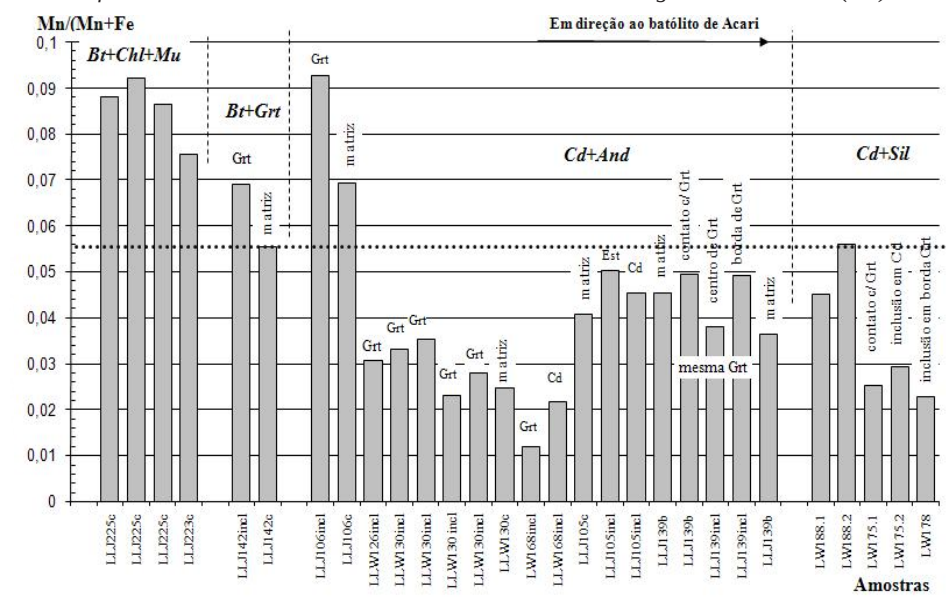


Figura 8 – Variação da razão Mn/(Mn+Fe) das ilmenitas das zonas metamórficas dos micaxistos em torno do maciço de Acará. Em geral o teor de manganês é claramente mais baixo naquelas ilmenitas das rochas de grau metamórfico mais elevado. Bt – biotita, And – andaluzita, Sil – sillimanita, incl=inclusão de ilmenita em granada (Grt), cordierita (Cd) ou estauroлита (Est); b=borda; c=centro do grão

Tabela 2 – Análises químicas (% peso) de turmalinas das zonas metamórficas nos micaxistos em torno do maciço de Acará

	Zona Bt + Cl + Mu				Zona Cd + And				Zona Cd + Sil						
Amostra	LJ1225	LJ1225int	LJ1225int	LJ1225c	LJ1225b	LJ106c	LJ106int	LJ106int	LJ106b	LLW188	LLW188	LLW188	LLW175	LLW175	LLW178
SiO ₂	36,90	36,65	36,56	37,07	36,88	36,88	39,45	36,86	36,78	34,78	35,01	35,03	34,85	34,05	35,35
TiO ₂	1,38	1,47	0,43	0,13	0,78	0,72	0,27	0,62	0,63	0,98	0,99	0,90	0,84	1,07	0,48
Al ₂ O ₃	29,63	31,08	29,76	31,84	33,07	31,08	31,76	33,84	33,93	33,66	34,11	34,40	34,32	34,24	32,84
Cr ₂ O ₃	0,03	0,09	0,07	0,16	0,15	0,15	0,01	0,23	0,19	0,09	0,05	0,06	0,05	0,12	0,11
FeO	9,88	9,08	11,27	9,11	6,57	8,05	8,07	6,91	6,48	6,04	6,10	6,15	6,57	6,24	7,04
MnO	0,04	0,01	0,03	0,10	0,12	0,10	0,04	0,08	0,04	0,07	0,07	0,02	0,02	0,04	0,01
MgO	6,96	6,48	6,35	6,50	7,10	6,68	6,47	6,63	6,60	6,36	6,37	6,32	6,34	6,28	7,09
CaO	0,52	0,06	0,08	0,04	0,64	0,14	0,07	0,73	0,73	0,55	0,68	0,58	0,99	1,04	0,82
Na ₂ O	2,39	2,47	2,53	2,53	1,94	2,53	2,36	1,71	1,66	1,67	1,77	1,84	1,91	1,81	1,86
K ₂ O	0,04	0,00	0,00	0,01	0,05	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,04	0,02	0,04	0,02	0,02
B ₂ O ₃	10,61	10,63	10,54	10,69	10,75	10,54	10,84	10,79	10,74	10,41	10,51	10,53	10,54	10,42	10,54
Total	98,38	98,02	97,63	98,20	98,05	96,89	99,36	98,42	97,81	94,63	95,70	95,85	96,47	95,33	96,16
Cálculo com base em 15 cátions*, admitindo 3 boros															
Si IV	6,045	5,992	6,030	6,030	5,965	6,082	6,327	5,937	5,951	5,806	5,792	5,781	5,748	5,680	5,828
Al IV	0,000	0,008	0,000	0,000	0,035	0,000	0,000	0,063	0,049	0,194	0,208	0,219	0,252	0,320	0,172
Total IV	6,045	6,000	6,030	6,030	6,000	6,082	6,327	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Al Z	5,721	5,992	5,787	6,104	6,305	6,043	6,006	6,425	6,474	6,624	6,654	6,693	6,674	6,733	6,382
Al Z	5,721	5,984	5,787	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Ti	0,171	0,016	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Cr	0,004	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total site Z	5,896	6,000	5,850	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Al Y	0,000	0,000	0,000	0,104	0,270	0,043	0,006	0,362	0,424	0,430	0,446	0,474	0,422	0,413	0,210
Ti	0,000	0,165	0,000	0,016	0,095	0,089	0,032	0,075	0,077	0,123	0,123	0,112	0,104	0,134	0,060
Cr	0,000	0,011	0,000	0,021	0,019	0,019	0,002	0,030	0,024	0,012	0,007	0,008	0,007	0,016	0,014
Fe	1,354	1,242	1,555	1,239	0,889	1,111	1,082	0,931	0,877	0,843	0,844	0,849	0,906	0,870	0,971
Mn	0,005	0,002	0,004	0,014	0,016	0,014	0,005	0,011	0,005	0,010	0,010	0,003	0,003	0,006	0,001
Mg	1,700	1,580	1,561	1,576	1,711	1,642	1,546	1,592	1,582	1,571	1,554	1,558	1,561	1,742	1,742
Total site Y	3,059	3,000	3,119	2,970	3,000	2,918	2,673	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000	2,998
Ca	0,091	0,010	0,015	0,007	0,112	0,025	0,012	0,126	0,126	0,098	0,121	0,103	0,175	0,186	0,145
Na	0,758	0,782	0,810	0,799	0,609	0,810	0,734	0,535	0,520	0,541	0,568	0,589	0,611	0,585	0,595
Total site X	0,856	0,792	0,825	0,809	0,730	0,838	0,751	0,663	0,651	0,643	0,697	0,696	0,794	0,776	0,744
*O procedimento do cálculo considera Ca, Na e K os únicos cátions ocupantes em X: [XY ₃ Z ₆ (Si ₆ O ₁₈)(BO ₃) ₃] (OH, O) ₄															
Mg/Mg+Fe	0,357	0,360	0,301	0,360	0,358	0,397	0,388	0,631	0,645	0,652	0,650	0,647	0,632	0,642	0,642
Mg/Mg+Fe+Al	0,194	0,179	0,175	0,177	0,192	0,187	0,179	0,178	0,178	0,175	0,173	0,171	0,171	0,170	0,192
Al/(Al+Fe+Mg)	0,652	0,680	0,650	0,684	0,708	0,687	0,696	0,718	0,724	0,732	0,734	0,736	0,730	0,735	0,702
b= borda do cristal int= interior do cristal c= centro do cristal															

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dois grupos maiores de ilmenita podem ser individualizados considerando o teor de Mn: (1) O primeiro envolve as ilmenitas provenientes das rochas sob condições metamórficas com temperaturas mais baixas, onde as razões $Mn/(Mn + Fe)$ atingem os valores mais elevados (0.092 e 0.093); (2) O segundo grupo se caracteriza pelas ilmenitas originadas dos micaxistos sob metamorfismo de mais altas temperaturas, onde a cristalização e recristalização de granada, cordierita e estauroлита controlam a quantidade de MnO nas ilmenitas. Assim, as ilmenitas que se cristalizaram nas zonas metamórficas definidas por cordierita + andaluzita e cordierita + sillimanita tiveram a seu dispor um baixo teor de Mn. Uma parte deste Mn foi consumida pela neoformação progressiva dos porfiroblastos de granada, cordierita e estauroлита.

A origem da turmalina é ainda especulativa. Em todo caso, algumas considerações podem ser feitas: (1) As turmalinas são amplamente distribuídas nos micaxistos ao longo de todas as zonas metamórficas. A concentração de turmalina nas foliações S_1 e S_2 poderia representar a liberação do Boro à partir de sedimentos argilo-grauváquicos originais (Ethier & Campbell, 1977), face a sua cristalização por M_1 e recristalização por M_2 . Esta possível liberação de Boro através de uma fase fluida intergranular (Henry & Guidotti, 1985) permitiria sua interação com os minerais metamórficos tais como biotita, plagioclásio e cordierita; (2) Os núcleos dessas turmalinas zonadas poderiam representar um testemunho de fragmentos detríticos, onde as suas bordas registraram o crescimento secundário por efeito do metamorfismo. Esta hipótese é igualmente defendida por Michailidis *et al.* (1996); (3) A zonação observada não é tão simples e a turmalina

do afloramento LLJ223 mostra que a região de borda se desenvolveu sob condições de mais baixa temperatura, no final de M_2 , do que a parte central/núcleo onde a razão $Mg/(Mg+Fe)$ é mais elevada (Fig. 10d). Isto é uma evolução semelhante àquela mostrada por Lima (1986). Além do mais, as turmalinas zonadas são caracterizadas pelas substituições entre Al – Fe e Na – Ca, e na medida em que nos aproximamos do maciço granítico, especialmente nas zonas metamórficas a cordierita + andaluzita e cordierita + sillimanita, essas turmalinas tornam-se mais aluminosas e menos sódicas.

Enfim, os dados apresentados indicam a efetiva participação das turmalinas e ilmenitas no balanço químico das transformações minerais concernentes à instalação da auréola térmica sobre os metapelitos envolvendo o batólito granítico de Acari.

Agradecimentos

Expressamos nosso apreço particularmente a J. Wautier, que colaborou durante o processo analítico no Laboratório de Microssonda da Universidade Católica de Louvain/Bélgica.

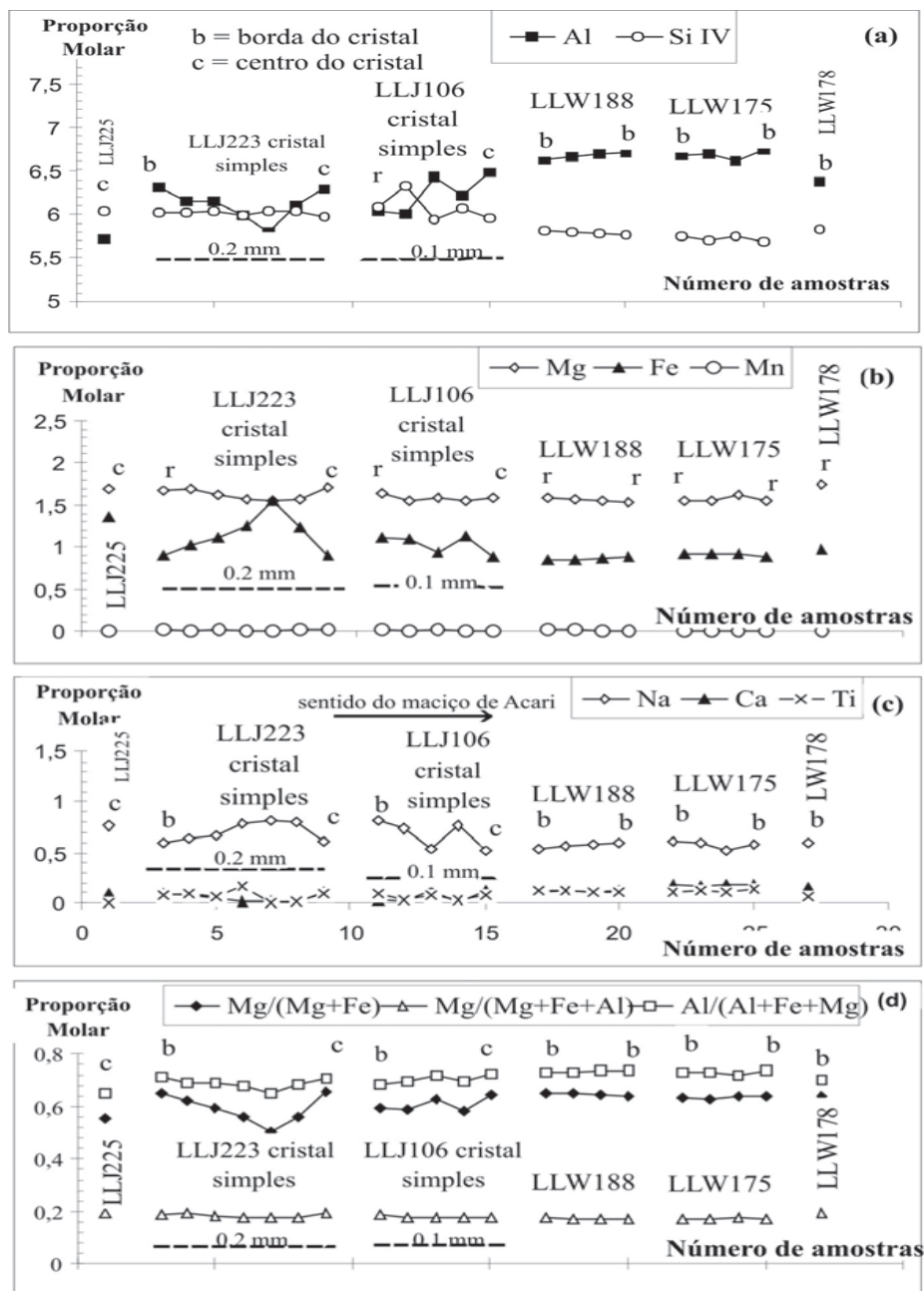


Figura 9 – Composição química de turmalinas (a, b e c) e as razões $Mg/(Mg+Fe)$, $Mg/(Mg+Fe+Al)$ e $Al/(Al+Fe+Mg)$ (d) nos micaxistos nas zonas Bt+Chl+Mu (LLJ225 e 223), Cd+And (LLJ106) e Cd+Sil (LLW188, 175 e 178). A zonação química é evidenciada pelas amostras LLJ223 e 106.

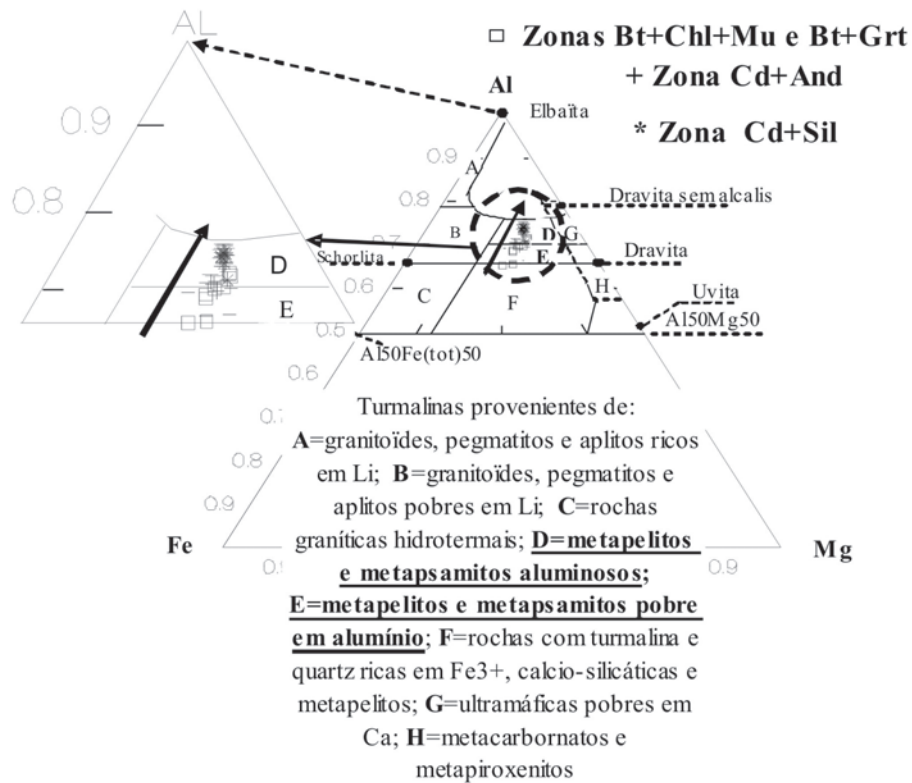


Figura 10 – Diagrama ternário Al - Fe -Mg para as turmalinas dos micaxistos em torno do maciço de Acari (campos D e E). A divisão dos campos de composições de turmalinas (A, B, C, D, E, F, G e H) foi definida por Henry & Guidotti (1985). A seta indica a variação composicional das turmalinas dos micaxistos Seridó.

REFERÊNCIAS

- Archanjo, C.J.; Olivier, Ph. & Boucher, J.L. 1992. Plútons granitiques du Seridó (NE Brésil) écoulement magmatique parallèle à la chaîne révéle para leur anisotropie magnétique. *Bull. Soc. Géol. France*, 4:509-520.
- Bucher, K. & Frey, M. 1994. *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Springer-Verlag, Berlin, 6th Ed., 318p.
- Caby, R. 1989. Precambrian terranes of Benin-Nigeria and northeast Brazil and late proterozoic South Atlantic fit. *Geological Society of America*, Special Paper, 145-158.
- Cunha de Souza, L. 1996. *Zonéographie métamorphique, chimie des minéraux, pétrochimie, géochronologie 40Ar/39Ar et histoire P-T-t des micaschistes englobant le massif gabbro-granitique d'Acari (Brasilião), ceinture mobile du Seridó (NE du Brésil)*. Thèse de doctorat, Laboratoire de minéralogie et géologie, Université Catholique de Louvain, Belgique, 345p.

- Cunha de Souza, L., Silva, W.L., Legrand, J.M. 1991. Zoneamento metamórfico provocado pelo maciço granítico de Acari (RN): dados preliminares. In: XIV Simp. Geol. Nordeste, Recife, Brasil, 250-253.
- Cunha de Souza, L., Verkaeren, J., Legrand, J.M., Sonnet, Ph. 1996. Le métamorphisme et la participation des fluides dans les micaschistes entourant le batholite gabbro-granitique d'Acari – NE du Brésil: Transfert de chaleur et dynamique des transformations. In: XVI RST, Dynamique de la Lithosphère – Transfert par les fluides lithosphériques, Orléans, France, p. 98.
- Dantas, E. L. 1997. Geocronologia U-Pb e Sm-Nd de terrenos arqueanos e paleoproterozóicos do maciço Caldas Brandão, NE do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UNESP, Rio Claro – SP, 218p.
- Etheridge, M.A., Wall, V.J., Vernon, R.H. 1983. The role of the fluid phase during regional metamorphism and deformation. *Journal of Metamorphic Geology*, 1:205-226.
- Etheridge, M.A., Wall, V.J., Cox, S.F., Vernon, R.H. 1984. High fluid pressures during regional metamorphism and deformation: Implications for mass transport and deformation mechanisms. *Journal of Geophysical Research*, 89:4344-4358.
- Ethier, V.G. & Campbell, F.A. 1977. Tourmaline concentrations in Proterozoic sediments of the southern Cordillera of Canada and their economic significance. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14:2348-2363.
- Henry, D.J. & Guidotti, C.V. 1985. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite – grade metapelites of NW Maine. *American Mineralogist*, 70:1-15.
- Karlstrom, K.E. & Williams, M.L. 1995. The case for simultaneous deformation, metamorphism and plutonism: an example from Proterozoic rocks in central Arizona. *Journal of Structural Geology*, 17(1):59-81.
- Legrand, J.M., Almeida, H.L., Cunha de Souza, L. 1992. Metamorfismo aloquímico: caso dos canais térmicos dos micaxistos Seridó-RN. XXXVII Cong. Bras. Geol., SBG, São Paulo, Brasil, 429-430.
- Lima, E.S. 1986. *Metamorphism and tectonic evolution in the Serido region, Northeastern Brazil*. Ph.D Thesis, University of California, California, EUA, 208p.
- Luiz Silva, W.L., Legrand, J.M., Cunha de Souza, L. 1993. Evidências microtexturais da influência hidrotermal na cristalização de tipomórficos nos micaschistes Seridó (RN). In: XV Simp. Geol. do Nordeste, SBG, Natal (RN), Brasil, 13:120-123.
- Michailidis, K., Kassoli-Fournaraki, A., Dietrich, R.V. 1996. Origin of zoned tourmalines in graphite – rich metasedimentary rocks from Macedonia, northern Greece. *European Journal of Mineralogy* 8: 393-404.
- Pettijohn, F.J., Potter, P.E., Siever, R. 1973. Sand and sandstone. Springer-Verlag, Berlin, 617p.
- Van Schmus, W.R., Brito Neves, B. B., Hackspacker, P.C., Babinski, M., Fetter, A., Dantas, E. 1995. Neoproterozoic and late mesoproterozoic sedimentary and volcanic sequences in the Borborema Province, NE Brazil. In: XVI Simp. Geol. Nordeste, Recife, Brazil, 391-393.
- Yardley, B.W.D. & Bottrell, S.H. 1992. Silica mobility and fluid movement during metamorphism of Connemara schists, Ireland. *Journal of Metamorphic Geology*, 10:453-464.