



## Petrografia, química mineral e geotermometria dos Enxames de Diques associados ao Batólito Pelotas na região de Piratini e Pinheiro Machado - RS

C. Zanon<sup>1</sup>, L.R. Seixas<sup>2</sup>, R. Machado<sup>1</sup> & R.P. Philipp<sup>3</sup>

1 Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP), e-mail: celizanon@yahoo.com, rmachado@usp.br

2 Instituto de Geociências da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), e-mail: luseixas@degeo.ufop.br

3 Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e-mail: ruy.philipp@ufrgs.br

**Abstract** The Pelotas batholith extends from the northeast segment of the Santa Catarina and Rio Grande do Sul states of Brazil towards Uruguay, including mainly granitoid rocks formed during the Brasiliano cycle. A series of basalts, rhyolites, dacites, trachydacites, latites and trachytes sub-volcanic units outcrops in the Piratini and Pinheiro Machado regions (Rio Grande do Sul). A compositional analysis was done on the feldspar, plagioclase, clinopyroxene, amphibole and biotites from some of these rocks. Thermometric calculations on plagioclase show that felsic and mafic dykes from Pinheiro Machado have higher crystallization temperatures than the ones from Piratini.

**Palavras-chave:** Petrografia, química mineral, geotermometria, diques, Piratini, Pinheiro Machado

**INTRODUÇÃO** A região de Piratini e Pinheiro Machado (RS) está localizada na parte sudeste do estado do Rio Grande do Sul, aproximadamente a 250 km a sul de Porto Alegre, capital (Fig. 1). Durante o ciclo Brasiliano, essa região foi afetada por magmatismo cálcio alcalino a cálcio-alcalino alto K saturados em sílica (Philipp 1998) registrados na grande variedade de rochas ígneas que compõem o Batólito Pelotas. Associados a essas rochas ocorrem diques de caráter ácidos, intermediários e básicos, representando a fase final da evolução magmática na região. Figueiredo Filho & Salgado (1964 *apud* Picada 1969, 1971) denominou Riólitos Asperezas para o enxame de diques localizados na região da Serra das Asperezas, situada a nordeste da cidade de Pinheiro Machado. Os referidos autores identificam uma estreita relação entre os diques ácidos e as rochas graníticas do batólito. Trabalhos posteriores caracterizam diques de composição básica a intermediária e levantam a possibilidade de que os primeiros possam representar o registro de uma contribuição mantélica associada com a evolução do batólito Pelotas. Os modelos tectônicos disponíveis sobre o batólito, consideram os diques como relacionados com a fase final do magmatismo que gerou o batólito (Tessari & Giffoni 1970, Picada 1971, Fragoso Cesar *et al.* 1986). O presente trabalho focaliza a petrografia e química mineral de feldspatos, plagioclásios, clinopiroxênio, anfibólio e biotita dos diques estudados em ambas as regiões.

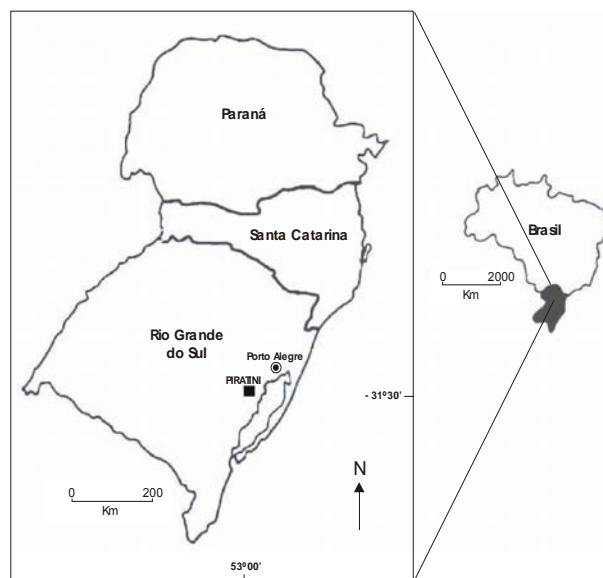


Figura 1. Mapa de localização da região de Piratini e Pinheiro Machado, RS

**Relações de campo e petrografia dos Enxames de Diques** Os diques ácidos, básicos e intermediários da região de Piratini e de Pinheiro Machado ocorrem como corpos tabulares, leucocráticos a mesocráticos, intrudidos em rochas graníticas, com duas direções principais: uma NW-SE e outra próxima de N-S. Apresentam em geral largura variável, centimétrica até métrica, e extensão até quilométrica. Exibem geralmente tons que variam de cinza-claro a cinza-rosada (leucocrático) e cinza-escuro a esverdeado (mesocrático). O estudo dos enxames de diques na região de Piratini permitiu a separação de dois grupos distintos: um ácido e outro básico, ambos

caracterizados pelas composições mineralógicas e feições texturais diferenciadas. Entretanto, em ambos os tipos a matriz é maciça, afanítica/porfírica, com granulação fina, atribuída a processos semelhantes de cristalização durante a ascensão desses diques. Contudo, a região de Pinheiro Machado é caracterizada predominantemente pela presença de diques de caráter ácidos e algumas amostras subordinadas de diques básicos e intermediários. De acordo com a petrografia, os diques ácidos foram classificados de riolitos, traquitos, traquidacito e dacito; os básicos, de basalto e os intermediários, de latito. A assembléia mineralógica essencial dos diques ácidos e intermediário é formada de feldspato alcalino e quartzo, estando os mesmos dispostos em uma matriz fina, microcristalina, formando textura glomeroporfírica e esferulítica. Os cristais de feldspato alcalino desenvolvem, por vezes, bordas de reação de minúsculas “franjas” intercrescidas com cristais de quartzo. Intercrescimentos de quartzo e plagioclásio mostram textura mirmequítica. Os minerais acessórios que compõem a matriz são plagioclásio, minerais opacos, biotita, zircão, apatita, anfibólio e titanita. Os mesmos encontram-se associados com microcristais de quartzo. Os produtos de alteração mais comum são caulinita, clorita, e epidoto, seguido de carbonatos e óxido de ferro. O conjunto de diques básicos caracteriza-se por apresentar plagioclásio e clinopiroxênio como minerais essenciais, seguidos dos acessórios quartzo, feldspato alcalino, anfibólio, biotita, minerais opacos, titanita, sulfetos e apatita, apresentando ainda, como minerais de alteração, carbonatos e saussurita. A matriz geralmente é microcristalina. As principais texturas são ofítica e sub-ofítica. Quando associados com agregados de quartzo, os plagioclásios apresentam mirmequita e quando ocorrem como fenocristais observa-se zonamento normal, inverso e oscilatório. Raros cristais de anfibólio apresentam processo de alteração, sendo substituídos por clinopiroxênio. Presença de minúsculos cristais de quartzo entre ripas de plagioclásio caracteriza textura intersertal em algumas amostras. A nomenclatura de ambos os diques foi obtida por meio de diagramas de classificação química para rochas vulcânicas TAS (Le Maitre, 2002). Os diques ácidos caracterizam-se como riolitos seguidos de traquitos, traquidacitos e dacitos, enquanto os diques básicos ocupam o campo dos basaltos. Diques intermediários foram classificados de latito (Fig. 2).

**QUÍMICA MINERAL** A química mineral dos diferentes minerais foram obtidos no Laboratório de Microsonda Eletrônica marca Jeol, modelo JXA8600 Superprobe, equipado com cinco espectrômetros do Instituto de Geociências da USP. Esse equipamento

está automatizado com um sistema Voyager 3.6.1 da NORAN Instruments. As fases analisadas compreendem feldspato alcalino, plagioclásio, clinopiroxênio, anfibólio e biotita. As análises foram realizadas em seções delgadas polidas, metalizadas com película de carbono  $\approx 25\text{nm}$  em evaporador AUTO 206 da EDWARDS. Análises quantitativas foram realizadas pelo método WDS (*wavelength dispersive spectroscopy*).

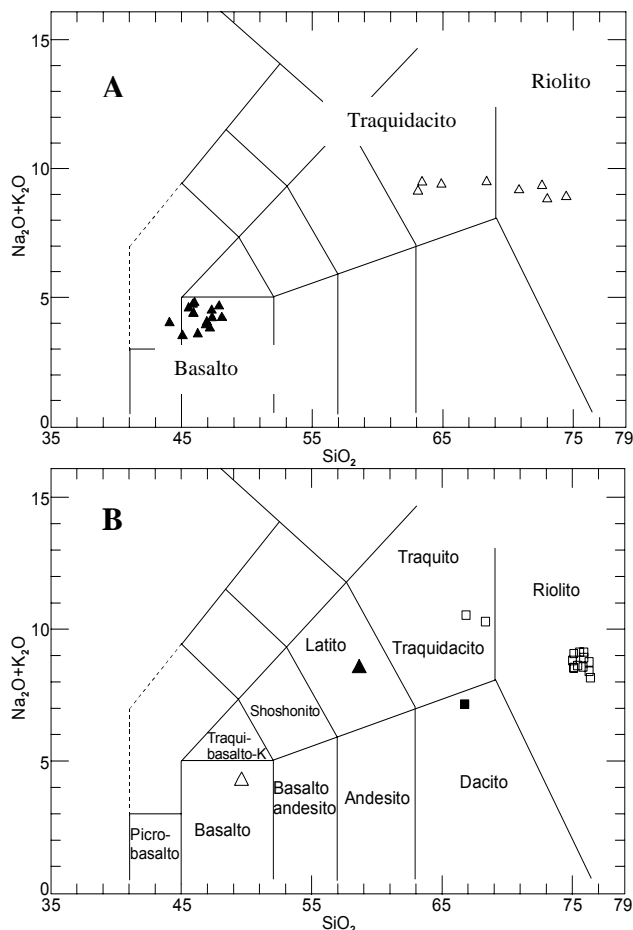


Figura 2. Diagrama de classificação  $\text{SiO}_2$  versus  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  (Le Maitre 2002) para os diques de Piratini (A) e de Pinheiro Machado (B) (RS.).

**Feldspato alcalino** dos diques ácidos de ambas as regiões mostra variação composicional compatível com o zonamento observado em alguns cristais. As análises ocupam a linha Ab-Or, mostrando variações nos teores das moléculas de Or-Ab-Na (não apresentado aqui). A mesma variação química ocorre com feldspatos alcalinos dos diques básicos. Esse tipo de comportamento é observado em minerais de rochas vulcânicas que foram envolvidos por processos de reequilíbrio durante a cristalização magmática (Deer *et al.* 1995). Os diferentes valores obtidos em análises se devem a existência de pequenas exsoluções sódicas no interior de porções mais potássicas. De acordo com Spear (1993), isto pode proporcionar substituições na estrutura do cristal do tipo simples –  $\text{KNa}_{-1} =$



ortoclásio-albita ou dupla –  $\text{NaSiCa}_{-1}\text{Mg}_{-1}$  = albita – anortita.

**Plagioclásio** Os cristais de plagioclásio dos diques básicos apresentam composições de albita, andesina e labradorita e dos diques ácidos, albita e oligoclásio. A principal substituição ocorre no sítio M, entre Na e Ca (*a.f.u.*) com contribuições significativas de Ca. Comparativamente, os fenocristais apresentam teores mais elevados em Ca do que os cristais da matriz. Nesse caso sugere-se que, durante a cristalização magmática, o líquido tornou-se mais empobrecido em cálcio. O *trend* composicional, da solução-sólida centro e borda, tem sido usado como indicativo para avaliação das condições de temperatura de cristalização do magma (MacKenzie 1982). Nesse sentido, os plagioclásios analisados evidenciam a predominância de zonamento inverso, indicando condições iniciais de baixas temperaturas de cristalização. Por outro lado, ocorrem também a existência de zonamento normal, indicativo de altas condições de temperatura de cristalização. Nos diques intermediários, o plagioclásio analisado confere conteúdos de anortita entre  $\text{An}_{53}$  a  $\text{An}_{9,5}$ , caracterizando albita, oligoclásio, andesina e labradorita. Perfis em fenocristais possibilitaram identificar zonamentos do tipo normal, oscilatório e inverso. No diagrama Na versus Ca (*a.f.u.*) observa-se forte correlação negativa, mostrando a troca catiônica no sítio M, além do enriquecimento na componente albita no líquido magmático durante a cristalização.

**Clinopiroxênio** O piroxênio ocorre essencialmente nos diques básicos, entretanto restícios do mesmo são observados nos diques intermediários. Ocorre associado com apatita, titanita e minerais opacos. A classificação e nomenclatura são de acordo com Morimoto (1988). Foram utilizadas as recomendações de Droop (1987) para o cálculo da relação  $\text{Fe}^{+2}/\text{Fe}^{+3}$  para ser distribuído na fórmula estrutural de cada cristal. Os teores de cálcio são elevados e praticamente constantes com o componente wollastonita entre 38,02 a 47,78 %, caracterizando o clinopiroxênio como augita no diagrama de classificação Wo-En-Fs (Fig. 3). Os dados químicos revelam conteúdos elevados de alumínio, sódio e titânio. Os elevados teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (1,55 a 6,48 %) e  $\text{TiO}_2$  (0,70 a 3,28 %) são característicos de associações magmáticas alcalinas, subsaturadas em sílica, com valores contidos no intervalo muito acima daquelas encontradas em associações toleíticas (Kushiro 1960). O mg# possui valores muito próximos entre o centro, a porção intermediária e a borda e, dessa forma, não exibem variação composicional por meio dos cristais, sugerindo pouca variação da composição global do líquido durante a cristalização dos clinopiroxênios.

Com base na proposta de Spear (1993), sobre os tipos de substituições previstas para os piroxênios, sugere-se que as amostras estudadas apresentam substituições do tipo *tschermackita* na evolução dos piroxênios dos diques básicos, conforme sugerido pelas seguintes substituições de trocas:  $\text{FeMg}_{-1}$ ;  $\text{CaMg}_{-1}$ ;  $\text{Fe}_{+3}\text{Al}_{-1}$ ;  $\text{Al}^{\text{VI}}\text{Al}^{\text{IV}}\text{Mg}_{-1}\text{Si}_{-1}$ .

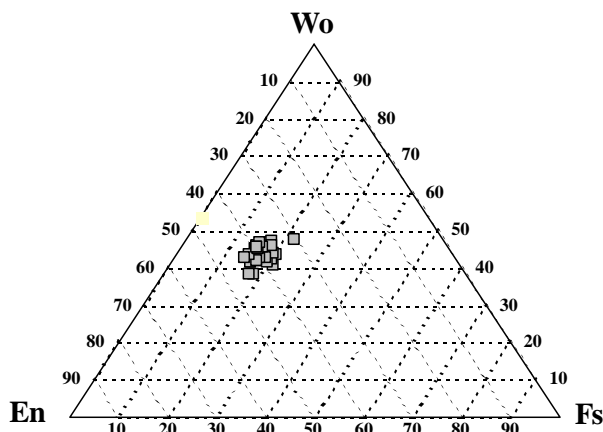


Figura 3. Diagrama (Morimoto 1988) para classificação do clinopiroxênio dos diques básicos da região de Piratini, RS.

**Anfibólio** Foram analisados anfibólios de diques básicos e intermediários. Ambos mostram  $\text{Cab} \geq 1,50$  ( $(\text{Na} + \text{K})_{\text{A}} < 0,50$ ), sendo classificados como anfibólio cálcico. Para a classificação adotaram-se os critérios de Leake (1997) de acordo com os limites dos campos estabelecidos. Os critérios utilizados estão fundamentados em alguns parâmetros propostos. O anfibólio dos diques básicos ocupa preferencialmente o campo *ferro-hornblenda*, cuja fórmula estrutural apresenta os intervalos:  
 $(\text{Na}_{0,023-0,101}\text{K}_{0,050-0,140})(\text{Ca}_{1,564-1,807}\text{Na}_{0,193-0,436})(\text{Al}^{\text{VI}}_{0,000-0,080}\text{Ti}_{0,070-0,101}\text{Fe}^{+3}_{0,651-1,107}\text{Fe}^{+2}_{3,055-3,470}\text{Mn}_{0,095-0,169}\text{Mg}_{0,391-0,968})(\text{Si}_{7,014-7,213}\text{Al}^{\text{IV}}_{0,777-0,929}\text{Fe}^{+3}_{0,000-0,085})_{22}(\text{OH})_2$  (Fig. 4A).

O anfibólio do latito apresenta um *trend* de composição *magnésio-hornblenda-tschermakita* e a fórmula *magnésio-hornblenda* com os intervalos:  
 $(\text{Na}_{0,000-0,150}\text{K}_{0,052-0,091})(\text{Ca}_{1,851-1,923}\text{Na}_{0,077-0,144})(\text{Al}^{\text{VI}}_{0,000-0,160}\text{Ti}_{0,021-0,037}\text{Fe}^{+3}_{0,447-0,719}\text{Fe}^{+2}_{1,065-1,411}\text{Mn}_{0,086-0,099}\text{Mg}_{2,869-3,171})(\text{Si}_{7,173-7,407}\text{Al}^{\text{IV}}_{0,593-0,827})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$  e  
 $(\text{Na}_{0,060-0,269}\text{K}_{0,064-0,094})(\text{Ca}_{1,552-1,763}\text{Na}_{0,237-0,448})(\text{Al}^{\text{VI}}_{0,000-0,077}\text{Ti}_{0,198-0,253}\text{Fe}^{+3}_{0,720-1,164}\text{Fe}^{+2}_{0,625-1,002}\text{Mn}_{0,036-0,048}\text{Mg}_{2,955-2,995})(\text{Si}_{6,589-6,782}\text{Al}^{\text{IV}}_{1,218-1,411})\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ .

A *tschermakita* apresenta os intervalos:  
 $(\text{Na}_{0,171-0,413}\text{K}_{0,087-0,118})(\text{Ca}_{1,583-1,777}\text{Na}_{0,223-0,417})(\text{Al}^{\text{VI}}_{0,013-0,082}\text{Ti}_{0,252-0,373}\text{Fe}^{+3}_{0,538-1,374}\text{Fe}^{+2}_{0,205-0,909}\text{Mn}_{0,027-0,032}\text{Mg}_{3,058-3,287})(\text{Si}_{6,173-6,412}\text{Al}^{\text{IV}}_{1,588-1,827})$  (Fig. 4B).

O anfibólio analisado apresenta teores médio de MgO de 2,46 % e FeO de 31,08 %. Projetando-se os teores de Si versus Na+K+Ca (*a.f.u.*) (Leake 1971) os dados analíticos situam-se no limite entre o campo de



anfíbólios magmáticos e não magmáticos. Os conteúdos de Ca e Ti (*a.f.u.*) dos anfíbólios do basalto e do latito sugerem fases de cristalização em condições de baixa  $fO_2$  (Helz 1982).

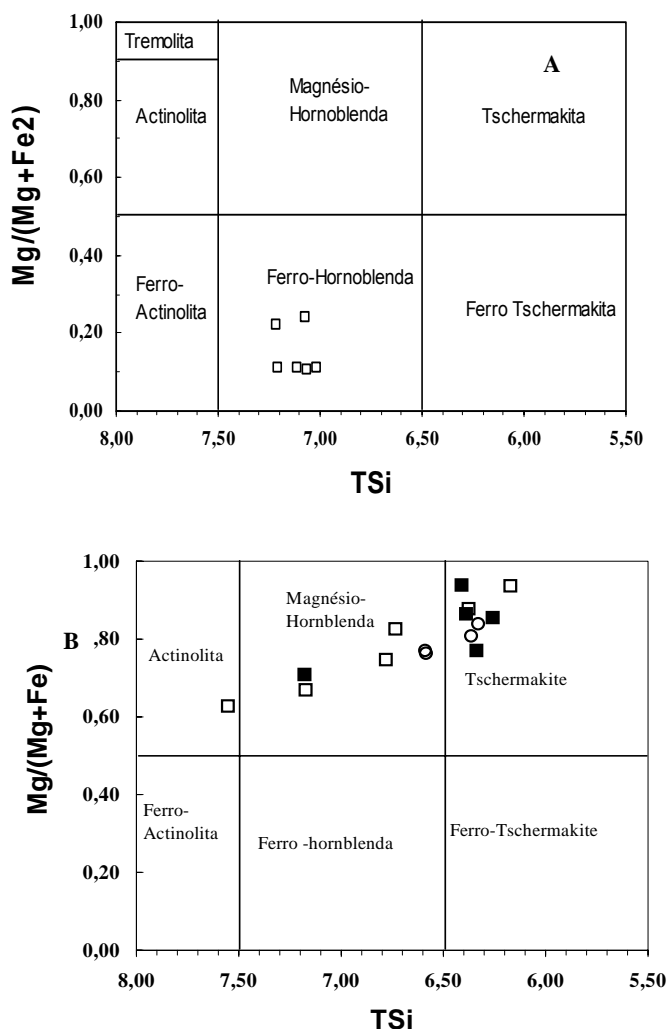


Figura 4. Diagrama de classificação dos anfíbólios (Leake 1997) dos diques básicos da região de Piratini em A; em B intermediários da região de Pinheiro Machado. Simbologia: ■ = núcleo; ○ = borda; □ = porção intermediária.

**Biotita** Foram analisados cristais de biotita do traquito, riolito e latito. O procedimento analítico foi de acordo com as recomendações do IMA - International Mineralogical Association - (Rieder 1999) cuja fórmula geral é  $IM_{2-3} \cdot 1-0 \cdot T_4 \cdot O_{10} \cdot A_2$ . As análises ocupam a parte central do diagrama  $Al^{IV}$  versus  $Fe/(Fe+Mg)$ , campo das biotitas verdadeiras (Deer *et al.* 1978). O  $mg\#$  versus  $fe\#$  mostra correlação negativa, refletindo magmas evoluídos. Nos diagramas de troca catiônica (não apresentado aqui) observam-se trocas significativas entre o  $Al^{IV}$  versus Si (*a.f.u.*) (sítio tetraédrico) e  $Fe^{total}$  versus Mg (*a.f.u.*) (sítio octaédrico). No diagrama  $FeO^{total}$  versus  $Al_2O_3$  (%) (Abdel-Rahman 1994), a biotita do traquito

e riolito ocupa o campo das suítes alcalina e peraluminosa, sendo que a biotita do latito situa-se no limite entre os campos peraluminosos e cálcioalcalinos (Figs. 5 e 6). De acordo com Naschit *et al.* (1986), a biotita analisada mostra evolução completa, com a formação de biotita magmática e tardimagmática.

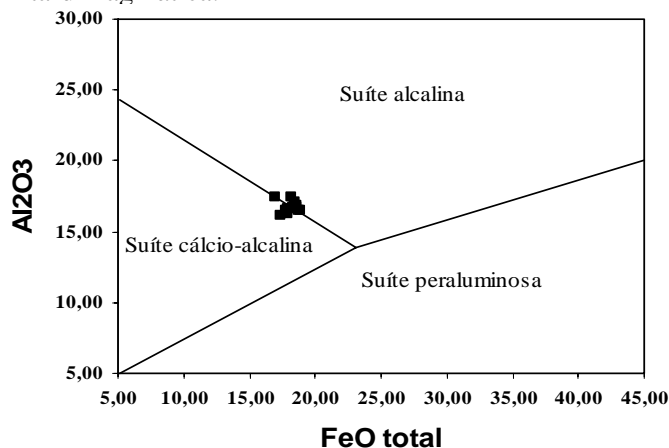


Figura 5. Diagrama  $FeO^{total}$  versus  $Al_2O_3$  (%) (Abdel-Rahman 1994) discriminante de biotita para o latito da região de Pinheiro Machado, RS.

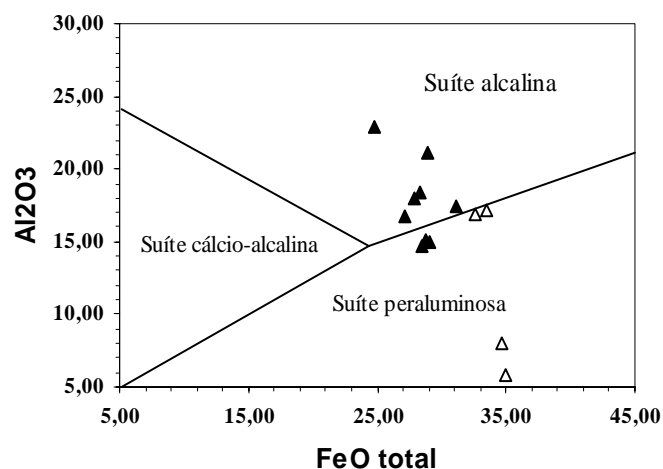


Figura 6. Diagrama  $FeO^{total}$  versus  $Al_2O_3$  (%) (Abdel-Rahman 1994) discriminante de biotita dos diques ácidos da região de Piratini, RS. Simbologia: ▲ = riolito; Δ = traquito.

**GEOTERMOMETRIA** Com os dados de química mineral foi possível realizar estudos de geotermometria nas fases plagioclásio. As fórmulas obtidas, bem como a determinação das temperaturas dos estágios de cristalização, tiveram como base os geotermômetros de Kudo & Weill (1970) e Mathez (1973), assumindo condições anídras. Os valores das temperaturas das amostras, em graus centígrados ( $^{\circ}C$ ), estão contidos nas Tabelas 1 e 2.





| Diques da região de Pinheiro Machado | Fase                   | Geotermômetro (°C)            |                     |
|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------|
| Diques ácidos                        |                        | T <sub>Kudo &amp; Weill</sub> | T <sub>Mathez</sub> |
| RC – 102<br>Riolito                  | N (C=1)<br>B (B=1)     | 1071<br>1018                  | 1056<br>1012        |
| RC – 111<br>Dacito                   | N (C=1)<br>B (B=1)     | 1291<br>1154                  | 1218<br>1129        |
| Média                                | N (n = 2)<br>B (n = 2) | 1181<br>1086                  | 1137<br>1070        |
| <b>Dique Básico</b>                  |                        |                               |                     |
| RC – 118B<br>Basalto                 | N (C=1)<br>B (B=1)     | 1384<br>1222                  | 1335<br>1197        |

Tabela 1. Geotermometria dos diques ácidos e básicos da região de Pinheiro Machado (RS).

| Diques da região de Piratini | Fase                   | Geotermômetro (°C)            |                     |
|------------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------|
| Diques Ácidos                |                        | T <sub>Kudo &amp; Weill</sub> | T <sub>Mathez</sub> |
| RC – 18E –<br>Riolito        | N (C=1)                | 1193                          | 1155                |
| RC – 55 –<br>Riolito         | N (C=6)                | 1102                          | 1090                |
| Média                        | N (n=2)                | 1147                          | 1122                |
| <b>Diques Básicos</b>        |                        |                               |                     |
| RC-50<br>Basalto             | N (C=1)<br>B (B=1)     | 1365<br>1398                  | 1316<br>1347        |
| RC-20B<br>Basalto            | N (C=1)<br>B (B=1)     | 1311<br>1331                  | 1268<br>1293        |
| RC-9 Basalto                 | N (C=1)<br>B (B=1)     | 1311<br>1305                  | 1268<br>1270        |
| Média                        | N (n = 3)<br>B (n = 3) | 1329<br>1344                  | 1284<br>1303        |

Tabela 2. Geotermometria dos diques ácidos e básicos da região de Piratini. N = número de análises; C= núcleo do cristal; B= borda do cristal.

**Agradecimentos** C. Zanon agradece à CAPES pelo auxílio concedido à bolsa de pós-graduação.

## Referências

- ABDEL-RAHMAN A.F.M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas. *J. Petrol.*, **35**:525-541.
- DEER W.A., HOWIE R.A., ZUSSMANN J. 1978. *An Introduction of Rocks-Forming Minerals*. Second Edition. Longman Scientific & Technical, 696p.
- DEER W.A., HOWIE, R.A. & ZUSSMANN J. 1995. *An Introduction of the Rocks-Forming Minerals*. Second Edition. London. Longman, 560p.
- DROOP G.T.R. 1987. A general equation for estimating Fe<sup>+3</sup> concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine*, **51**: 431-435.
- FRAGOSO-CESAR A.R.S., FIGUEIREDO M.C.H., SOLIANI E., FACCINI U.F. 1986. O Batólito Pelotas (Proterozóico Superior/Eo-Paleozóico) no Escudo do Rio Grande do Sul. *Congresso Bras. Geolog.*, 34, Goiânia, **3**:1322-1343.
- HELZ R.T. 1982. Phase relations and compositions of amphiboles produced in studies of melting behavior of rocks. *Min. Soc. Am. Rev. Min.*, **9**(B):279-346.
- KUDO A.M., WEILL D.F. 1970. An igneous plagioclase geotermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Berlin, **25**:52-65.
- KUSHIRO I. 1971. Effect of water on the composition of magmas formed at high pressures. *Journal of Petrology*, **13**:311-334.
- LEAKE B.E. 1971. On aluminous edenitic and hornblendes. *Mineral. Mag.*, **42**: 389-407.
- LEAKE B.E. 1971. On aluminous edenitic and hornblendes. *Mineral. Mag.*, **38**: 389-407.
- LEAKE B.E., WOOLEY A.R., ARPS C.E.S., BIRCH W.D., GILBERT M.C.; GRICE J.D., HAWTHORNE C., KATO A., KISCH H.J., KRIVOVICHEV V.G., LINTHOUT K., LAIRD J., MANDARINO J., MARESCH W.V., NICKEL E.H., ROCK N.M.S. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association. Commission on New Minerals and Mineral Names. *J. Mineral.* **9**: 623.
- LE MAITRE R.W. 2002. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*. Cambridge University Press. 2ª edição.
- MACKENZIE W.S., DONALDSON C.H., GUILFORD C. 1982. *Atlas of igneous rocks and their textures*.
- MATHEZ E.A. 1973. Refinement of the Kudo-Weill plagioclase thermometer and its application to basaltic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Berlin, **41**: 61-72.
- MORIMOTO N. 1988. Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogical Magazine*, **52**: 535-550.
- PICADA R.S. 1969. Faixa de granitos sincinemáticos no escudo Sul-Riograndense. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 22, n. 86, 1969, Salvador. *Resumos das Comunicações*.
- PICADA R.S. 1971. Ensaio sobre a Tectônica do Escudo Sulriograndense. Caracterização dos sistemas de Falhas. *Cong. Bras. Geolog.*, 25, S. Paulo 1:167-191.
- RIEDER M. 1999. (chairman). Nomenclature of the micas. *Minerl. Mag.*, **63**(2): 267-279.
- SPEEAR F.S. 1993. *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure – Temperature – Time Paths*. Michigan, Chelsea, 799p.
- PHILIPP R.P. 1998. *A Evolução Geológica e Tectônica do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em geoquímica e Geotectônica-Universidade de São Paulo-SP.
- UGS – Internacional Union of Geological Sciences (IUGS). *Subcommission of the Systematics of Igneous Rocks*.



***XLIII Congresso Brasileiro de Geologia***  
Aracaju, 3 a 8 de setembro de 2006

TESSARI R., GIFFONI L.E. 1970. Geologia da região de Piratini, Pinheiro Machado e Bagé, R. G. Sul. *Bol. Div.*

*Geol.*, DNPM, número 246 - Rio de Janeiro.