

SISMICIDADE INDUZIDA NO RESERVATÓRIO DE CAPIVARA: RESULTADOS PRELIMINARES SOBRE LOCALIZAÇÃO DE FRATURAS ATIVAS.

Marcelo Assumpção (IAG-USP), Marcus Freire (ON-CNPq), Luís Carlos Ribotta (IPT)

SUMMARY

The Capivara dam is located in the Paranapanema river between the states of São Paulo and Paraná, 60 km SE of Presidente Prudente. The reservoir was impounded in early 1976 and the first induced events were felt by the local populations in the towns of Iepê (SP) and Primeiro de Maio (PR) in mid 1976. Since then, small induced events have been occurring almost continuously with magnitudes up to 3.7 and intensities up to V-VI MM. Instrumental monitoring of the seismicity has been carried out using mainly analog smoked paper seismographs. Since november 1994, digital 3-component stations have been installed to carry out a more detailed study of the seismicity. Preliminary analysis of the digital data, together with the analog data from the period 1991 to 1994, indicate that

- 1) the activity occurs preferentially outside the reservoir, near the towns of Iepê and Primeiro de Maio,
- 2) the events tend to concentrate in several small fractures (probably not more than a few hundred meters), and persist in the same position for extended periods of time. Migration of the activity from one fracture to another has been observed over the years.
- 3) preliminary hypocentral determinations indicate depths in the range 0 to 4 km.
- 4) One of these sources, very close to the macroseismic epicenter of the largest event in 1976, is a NW-SE vertical fracture about $0.5 \times 0.6 \text{ km}^2$.

INTRODUÇÃO

O reservatório de Capivara situa-se no rio Paranapanema (SP/PR), 60 km a SE de Presidente Prudente, numa região onde predominam basaltos da Formação Serra Geral. A sismicidade induzida pelo enchimento do reservatório situa-se preferencialmente às margens do lago, próximo das cidades de Iepê (SP) e Primeiro de Maio (PR), aproximadamente 30 a 40 km a montante da barragem. Nesta área os basaltos apresentam-se bastante fraturados com direções preferenciais de fraturamento de NW-SE e SW-NE (Mioto et al., 1991; Mioto & Ribotta, 1994). Dados de poços estratigráficos da região, entre 50 e 100 km de distância, indicam uma espessura dos basaltos da ordem de 900 a 1200m.

Os abalos sísmicos começaram a ser sentidos três meses após o enchimento, atingindo intensidades VI MM já em 1976 (Berrocal et al., 1984). Os maiores sismos ocorreram em 27.03.1979 e 07.01.1989, ambos com magnitude 3,7. A ocorrência de pequenos eventos persiste até hoje, ocasionalmente ainda sentidos pela população nas áreas epicentrais.

A monitoração da atividade sísmica foi feita de forma descontínua: a Universidade de Brasília, em colaboração com a CESP, instalou duas estações de maio a novembro de 1977, e de abril de 1979 a outubro de 1981. A partir de outubro de 1988, foram instaladas quatro estações pelo IPT/CESP. Todas estas estações eram analógicas, com registro em papel esfumado (MEQ-800), operando apenas com a componente vertical. Devido à baixa resolução dos registradores analógicos, um estudo detalhado sobre os mecanismos dos sismos ainda não tinha sido possível. De novembro de 1994 a maio de 1995, um projeto conjunto IAG-IPT-ON operou uma rede de estações digitais de três componentes (Fig. 1). Foram utilizados sismômetros de período curto (S-13 e Willmore) nas estações CAP09, CAP12 e CAP13, e um sismômetro de banda larga (STS-2) na estação CAPB. Os dados são processados em "dataloggers" Ref-Tek e armazenados em disco rígido de 500MB. Dois modos de disparo funcionam simultaneamente, um para telessismos e sismos regionais com 50 amostras por segundo, e outro para sismos locais com 200 aps. Periodicamente, os dados são copiados em fita DAT de 4mm para análise em estações de trabalho.

Apresentam-se aqui alguns resultados preliminares obtidos com os registros digitais.

PROCESSAMENTO DOS DADOS

Várias etapas são envolvidas na análise dos registros, tais como identificação e classificação dos eventos, eliminação dos disparos falsos (ruído local), agrupamento dos eventos registrados por mais de uma estação, e leitura das chegadas das ondas P e S. Nestas etapas, foram utilizados os programas PQL (Passcal Quick Look) e SAC (Tapley & Tull, 1991).

Os eventos registrados por três ou mais estações tiveram seus epicentros calculados com o programa HYPO71 (Lee & Lahr, 1971). Neste estudo preliminar usou-se uma razão das velocidades V_p/V_s de 1,76 (determinada com a diagrama de Wadati) e adotou-se um modelo de velocidade de uma camada (V_p 5.0 km/s) de 5 km de espessura sobre um semi-espaco com V_p 6.2 km/s. A primeira camada equivale aos basaltos e arenitos, e o semi-espaco equivale ao embasamento granito-gnássico da bacia. Este modelo é consistente com os dados do poço Taciba da Paulipetro localizado 50 km a NW de Iepê.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Fig. 1 apresenta os epicentros dos sismos registrados por três ou mais estações.

Os eventos de 1991 a 1993 (símbolos pequenos) foram determinados usando-se apenas as leituras de S-P das estações analógicas instaladas nos locais CAP9, CAP11, CAP12 e CAPB. A incerteza nos epicentros deve ser da ordem de ± 1 a 2 km. Os resultados da rede analógica indicam profundidades geralmente entre 0 e 3 km.

Os eventos identificados como "94/95" (losangos) foram determinados com as estações digitais (instaladas em CAP9, CAP12, CAP13 e CAPB) em dezembro de 1994 e janeiro de 1995, tendo sido registrados por pelo menos três das quatro estações. As incertezas nos epicentros são da ordem de $\pm 0,4$ km. As profundidades obtidas variam de 0 a 4 km. A grande maioria dos eventos concentram-se em um foco 8 km ao norte da estação CAPB. Dois eventos localizam-se 3 km a SW de CAP12. Embora não analisados neste trabalho, vários outros eventos menores (registrados por menos de três estações) indicam outros focos de atividade de menor magnitude.

Tanto os dados analógicos como os digitais demonstram que a atividade sísmica situa-se nas camadas acima do embasamento. Além disto, é clara a concentração da atividade em focos bem localizados, principalmente na margem norte do reservatório. Alguns destes focos têm atividade recorrente.

Determinação hypocentral relativa e orientação de fratura

A concentração de eventos "94/95" na Fig. 1 apresenta uma característica importante: todos os eventos têm a forma do sinal muito parecida em cada estação. Isto indica que os eventos têm o mesmo mecanismo focal e que se situam na mesma fratura. A correlação do sinal entre os vários eventos permite uma determinação das chegadas das ondas P e S com uma precisão *relativa* muito maior. Assim, adotou-se um evento como referência e determinaram-se os tempos das ondas P e S de outros eventos correlacionando-se o sinal de cada um com o sinal correspondente do sismo de referência. Desta maneira, embora o erro absoluto na localização dos eventos continue grande, o erro *relativo* entre um evento e outro reduziu-se para $\pm 0,02$ km, e os resíduos médios dos tempos de chegada diminuíram de 0,040 s para 0,004 s.

CONCLUSÕES

O resultado preliminar da determinação hypocentral relativa, efetuada com apenas seis eventos, é mostrada na Fig. 2. Claramente nota-se uma fratura vertical, com orientação N57°W, e dimensões da ordem de $0,6 \times 0,5$ km². Como a incerteza absoluta na profundidade do conjunto de eventos pode chegar a ± 1 km ainda não é possível identificar a camada geológica sismogênica. No entanto, a pequena extensão vertical da parte ativa (0,5 km) é compatível com a hipótese dos sismos estarem confinados inteiramente na camada de basalto, que deve ter espessura entre 900 e 1200 m nesta região. Embora a direção desta fratura seja compatível com uma das direções preferenciais (NW-SE) dos lineamentos interpretados de imagens de radar na região geral do reservatório por Mito et al. (1991), na área específica da Figura 2, não há nenhum lineamento expressivo que possa ser associado ao alinhamento dos epicentros.

É interessante observar também que o primeiro foco de atividade sísmica em 1976, na antiga Fazenda Água da Lebre (intensidades até V-VI MM e magnitude até 3,5 aproximadamente) situa-se muito próximo desta fratura ativa de 1994/95 (Fig. 1). Como a incerteza no epicentro macrossísmico é de alguns quilômetros, é possível que a atividade inicial em 1976 tenha ocorrido nesta mesma fratura ainda ativa em 1994/95.

REFERÊNCIAS

- Berrocal et al., 1984. Sismicidade do Brasil. IAG-USP/CNEN, 320pp.
- Mito, J.A., L.C. Ribotta & A.C. Verdiani, 1991. Aspectos geológico-estruturais da sismicidade relacionada ao reservatório da Capivara (SP/PR). II Congr. Intern. Soc. Bras. Geofísica, Salvador, vol. I, 513-520.
- Mito, J.A. & L.C. Ribotta, 1994. O fraturamento dos maciços basálticos junto ao reservatório da barragem de Capivara, Rio Paranapanema (SP/PR). I Simp. Bras. Mecânica de Rochas. ABMS, Foz do Iguaçu, Anais, 279-286.
- Lee, W.H.K. & J.C. Lahr, 1975. HYPO71 (revised): a computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes. U.S. Geol. Survey, Open-File Report, 75-311.
- Tapley, W.C. & J.E. Tull, 1991. SAC- Seismic Analysis Code. Lawrence Livermore National Laboratory.

Agradecimentos.

Esta pesquisa está sendo realizada com apoio da CESP, e do PADCT, e com bolsas do CNPq. Agradecemos a Ademir Batista, Jandyr Travassos, José Roberto Barbosa e Luis C. Novaes pela colaboração em trabalhos de campo.

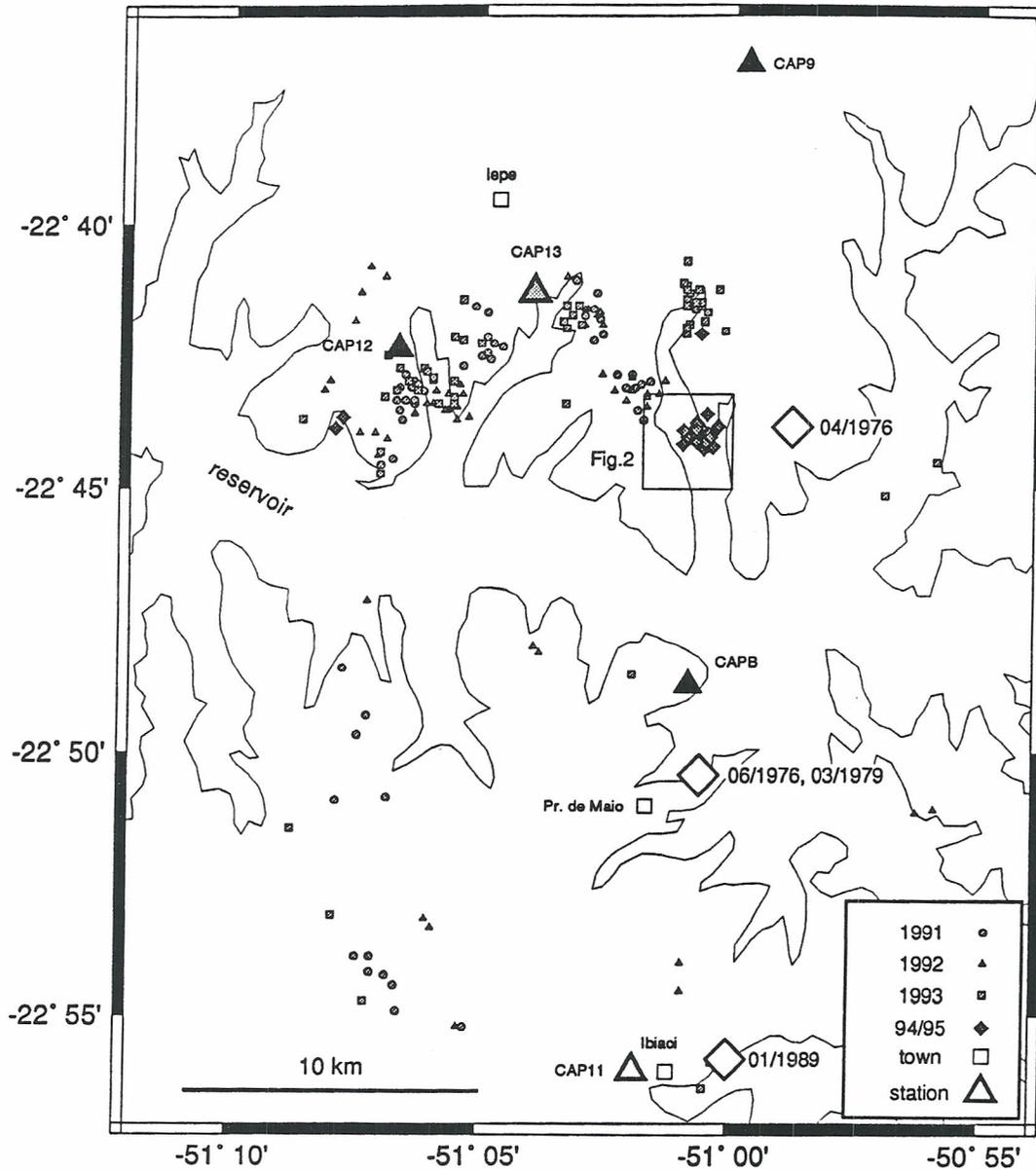


Fig. 1 Induced seismicity at Capivara reservoir

Triangles denote the four seismographic stations. Small gray symbols (circles, triangles and squares) are epicenters from 1991 to 1993 determined with the four analog stations at CAPB, CAP9, CAP11 and CAP12. Diamonds are epicenters determined with digital stations at CAPB, CAP9, CAP12 and CAP13 in December 1994 and January 1995. Solid triangles are permanent digital 3-component stations operating from December 1994 to May 1995; gray triangle is a temporary digital station. Uncertainties of the digitally recorded epicenters are ± 0.4 km. The large empty diamonds denote macroseismic epicenters of the four major events (magnitudes from 3.5 to 3.7) occurred since impoundment of the lake in January 1976.

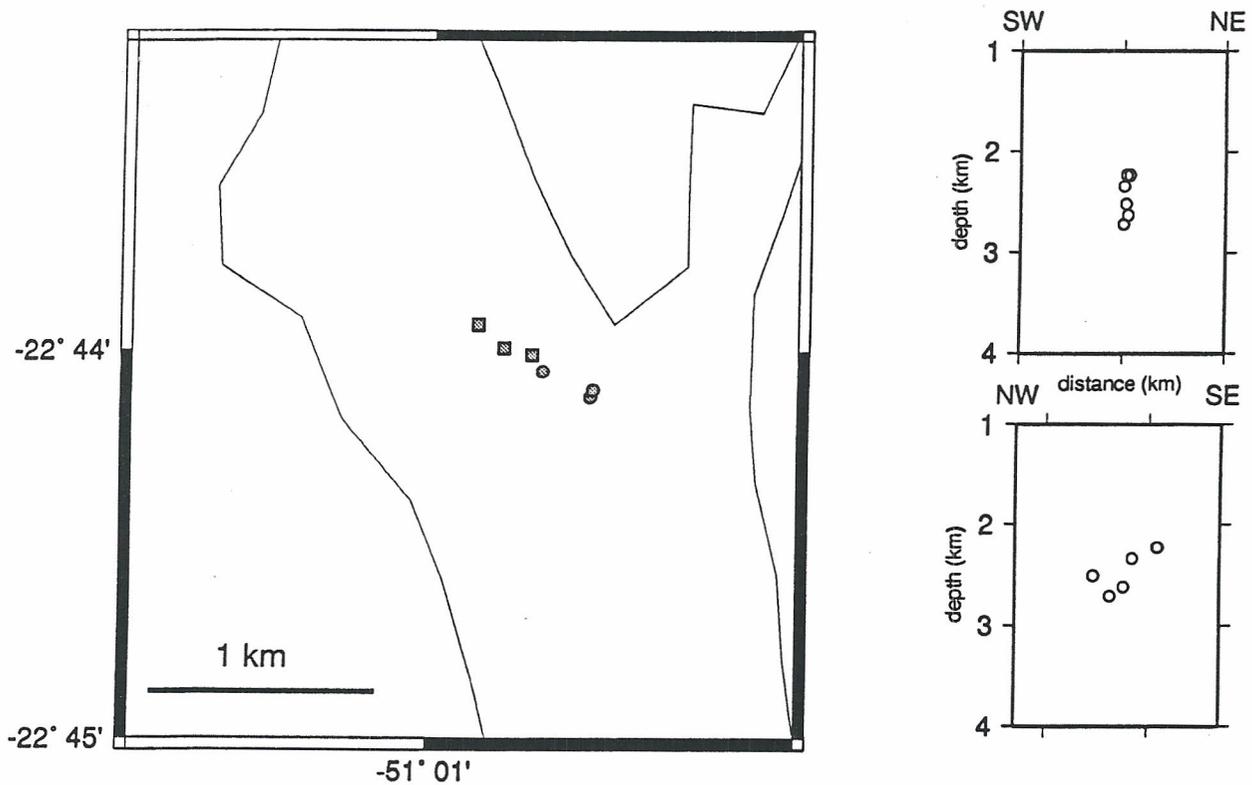


Fig. 2 Relative Hypocenter Determination.

Hypocenters determined by correlating the P and S signals from different events recorded at the same station. Relative hypocentral errors are about ± 0.03 km. The two plots on the right are projections of the hypocenters onto a vertical plane striking N33E (top) and N123E (bottom) indicating that the active part of the fracture is only about 0.6×0.5 km².