

PODEM OS POÇOS TUBULARES PROFUNDOS PROVOCAR ABALOS SÍSMICOS? CASOS ESTUDADOS NO BRASIL

Yamabe, T. H. ¹ & Berrocal, J. ²

Abstract - The seismicity in Nuporanga and Presidente Prudente, in São Paulo State, are the most representative cases of seismic activity induced by groundwater wells in Brazil because they have occurred several times. The seismic activity in Nuporanga began in 1977 soon after a 217 m deep well was drilled. In Presidente Prudente it is observed since 1983 and it is related to an 1800 m deep groundwater well's exploitation. This well was drilled in 1978. The energy liberation in these two localities has been occurred through a large number of small shocks but also through seismic events of larger magnitudes. Understanding the relation between the hydrological environment alteration and the energy liberation process is useful in order to explain the induced seismicity on the Paraná Basin. Trying to find the reason why seismic activity is induced only in some localities in the Paraná Basin even though the high number of hydroelectric power plants and groundwater wells that exist there, the seismic activity on the basin and the presence of sandstone layers inside the basalt were analyzed. In this work some results are presented.

Palavras-chave - poços tubulares, abalos sísmicos induzidos.

1. INTRODUÇÃO

A perfuração de poços tubulares profundos pode provocar abalos sísmicos? Sim, os casos de sismicidade apresentados neste trabalho mostram que sim. Geralmente sismos induzidos estão associados ao enchimento de reservatórios hidrelétricos. A sismicidade

¹ FCT/UNESP, Campus de Presidente Prudente. Rua Roberto Simonsen 305, 19060-900. Tel/Fax: 018-2215388. higashi@prudente.unesp.br

² IAG/USP – Rua do Matão 1226, Cidade Universidade, São Paulo, 05508-900, Tel: 011-8184755, Fax: 011-818 5034. berrocal@iag.usp.br

induzida por reservatórios hidrelétricos, de acordo com Gupta (1992), ocorre em várias regiões da Terra, inclusive no Brasil, nos mais variados ambientes geológicos e sismológicos, sendo o evento induzido de maior magnitude (mb 6,3) o provocado pelo reservatório de Koyna na Índia em 1967, (Gupta et al., 1997).

Também sismos induzidos pela injeção sob pressão de fluidos num poço profundo, ocorreram na década de 60, em Denver, USA, um caso que despertou a comunidade para o problema e foi reportado por Evans (1966), Freeze & Cherry (1979), entre outros. Há também casos de sismos relacionados com a exploração de petróleo. Entretanto, não existem na literatura especializada, casos de sismicidade induzida por poços profundos para extração de água subterrânea.

Atividade sísmica relacionada com poços tubulares na porção norte da Bacia do Paraná tem ocorrido desde a década de 50 (Almeida, 1959, 1960; Torres, 1970, Yamabe & Berrocal, 1994). Essa atividade tem ocorrido na forma de um só evento ou de vários eventos em um único intervalo, ou então, pode ocorrer de forma recorrente em vários intervalos de tempo, como são os casos observados em Nuporanga e Presidente Prudente, que são apresentados neste trabalho. Nestes casos, a liberação de energia tem ocorrido através de um número grande de pequenos tremores de terra mas também na forma de poucos abalos de maiores magnitudes.

O nível da atividade sísmica induzida por poços tubulares, em Nuporanga e em outras localidades, não é de risco, mas esses abalos têm provocado pequenos danos em edificações e assustam a população atingida por não estar acostumada com esses fenômenos.

A geologia da região que abrange o município de Nuporanga apresenta, em termos genéricos, uma camada irregular de arenito do Grupo Bauru, depositada sobre os fluxos de basalto da Formação Serra Geral, que estão assentados sobre as rochas sedimentares dos Grupos São Bento e Passa Dois. Essas formações que fazem parte da Bacia do Paraná, estão depositadas sobre o embasamento Pré-Cambriano.

A Formação Serra Geral representa um dos episódios de vulcanismo continental mais importantes ocorridos na Terra (Melfi et al., 1988), juntamente com os derrames de basalto do Deccan na Índia. O pacote de derrames de basalto da Bacia do Paraná é considerado como resultante de um fluxo calmo de lavas que fluíram de fissuras no embasamento. O processo de resfriamento desses fluxos de lava na Bacia do Paraná tem determinado algumas características estruturais importantes nas camadas de basalto. A atividade sísmica induzida observada em Nuporanga aparentemente ocorre em

profundidades muito rasas, provavelmente dentro do pacote de basalto, tendo em vista as pequenas áreas em que são sentidos esses eventos.

2. ATIVIDADE SÍSMICA INDUZIDA POR POÇOS TUBULARES EM NUPORANGA

A cidade de Nuporanga está localizada em 20,73° S e 47,75° W, na porção nordeste do Estado de São Paulo, próxima à borda nordeste da Bacia do Paraná. Nesta cidade, localizada numa região historicamente assísmica, como é o caso da maior parte da própria Bacia do Paraná, vêm ocorrendo eventos sísmicos de pequena magnitude desde 1977. Estudos geofísicos realizados desde então (Berrocal et al., 1978; Yamabe, 1985; Yamabe & Hamza, 1996), têm mostrado que a atividade sísmica em Nuporanga tem se caracterizado, desde o seu início até recentemente, pela ocorrência de ciclos de pequenos abalos sísmicos, relacionados, na maioria das vezes, com novos poços perfurados na cidade. Outra característica a destacar é a relação entre a quantidade de água bombeada dos poços locais e o nível de sismicidade (maior a quantidade de água bombeada, menor o número de tremores de terra). Essa atividade chegou a provocar pânico na população, principalmente pelo excessivo número de abalos sentidos em algumas oportunidades.

Os sismos induzidos em Nuporanga inicialmente eram de pequena magnitude mas em grande número e atingiram áreas de pequena extensão. Posteriormente, em 1989, após 12 anos do início da sismicidade nessa localidade, ocorreu um sismo com m_b 3,2 que foi seguido de algumas réplicas.

A atividade sísmica em Nuporanga teve início em maio de 1977, logo após concluída a perfuração de um poço (Colaba), com 204 m de profundidade, quando começaram a ocorrer eventos sísmicos de pequena magnitude ($m_b < 1.0$), a maioria deles com intensidade menor do que III MM. Já existia em Nuporanga, antes de 1977, dois poços de menor profundidade que o poço Colaba e que não haviam provocado nenhuma atividade sísmica conhecida.

A maior parte dos eventos iniciais, que foram sentidos pela população da zona urbana do município, ocorreu próxima ao poço Colaba. Esses eventos foram catalogados, por iniciativa própria, por uma moradora cuja residência está localizada a menos de 100 m do poço. Esta observadora listou os sismos sentidos em Nuporanga, desde agosto de 1977 até os ocorridos na década de 1990, com uma pequena descrição sobre o tamanho

do evento, dando também uma idéia, para alguns deles, da direção de onde vinham as ondas sísmicas.

Estudos geofísicos efetuados (Berrocal et al., 1978), indicaram que a área de maior frequência e intensidade dos eventos era a que circunvizinha o referido poço. Yamabe (1985), a partir de estudos geotérmicos, concluiu que a atividade sísmica é provavelmente relacionada com movimentos de água subterrânea dentro do poço Colaba. Os tremores são provavelmente causados pela circulação d'água entre um aquífero na profundidade em torno de 30 m e uma cavidade na profundidade aproximada de 175 m, ambos localizados dentro do basalto.

No início da atividade sísmica naquela localidade, o nível de atividade era bastante expressivo, de modo que toda vez que um novo poço tubular era perfurado e não explorado de imediato, ocorria um ciclo intenso de atividade sísmica relacionada, como se mostra na Fig. 1. Inclusive, observe-se na figura a ocorrência do maior número de eventos sentidos em um mesmo dia, mais de cem pequenos tremores, em dezembro de 1977, logo após concluída a perfuração de um novo poço (FM).

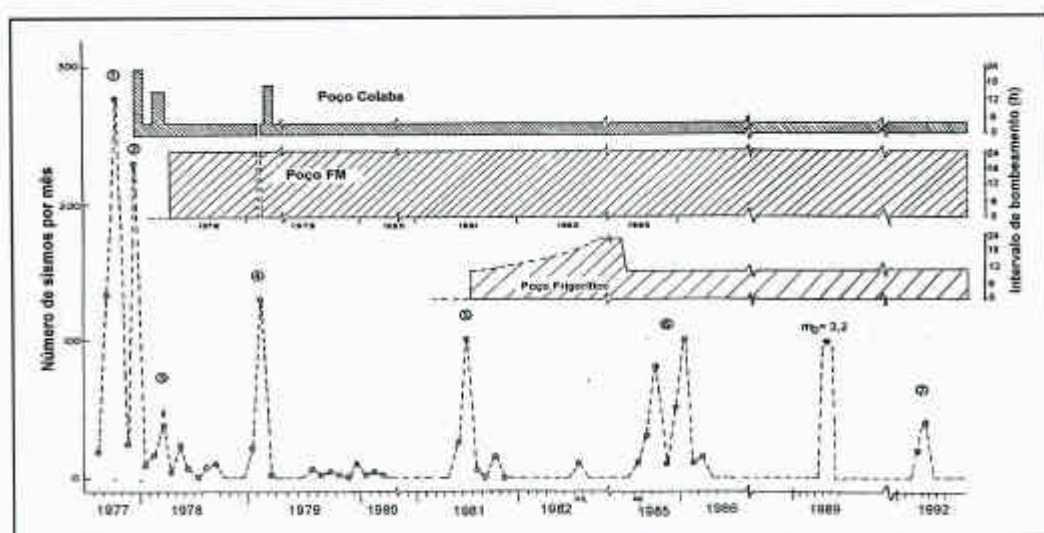


Fig. 1 .Ciclos de atividade sísmica em Nuporanga relacionados com ① Perfuração do poço Colaba; ② Perfuração do poço FM; ③ Menor bombeamento do poço Colaba; ④ Nenhum poço bombeado durante horas ("black-out"); ⑤ Perfuração do poço FR; ⑥ Perfuração do poço PR-3 e menor bombeamento no poço FR; ⑦ Perfuração de mais dois poços (CN e SF). Yamabe, 1999.

Nesse período inicial, a recorrência da atividade sísmica em Nuporanga acontecia também quando era interrompido o bombeamento dos poços por períodos de horas. A

maior correlação entre a atividade sísmica e o bombeamento dos poços, mostrada também na Fig. 1, ocorreu em fevereiro de 1979, quando houve uma interrupção do fornecimento de energia elétrica em todo o município, por cerca de 12 horas e, portanto, todos os poços ficaram sem ser bombeados por esse tempo, provocando imediatamente um número relativamente grande de tremores de terra.

Em 23.05.1989 ocorreu o sismo de maior magnitude em Nuporanga, com m_b 3,2. Este sismo provocou um número significativo de microtremores, alguns deles sentidos nitidamente pela população. Entretanto, esse ciclo não foi induzido, como os anteriores, pela perfuração de poço tubular nessa localidade, mas teria sido, segundo informações existentes, provocado pela paralisação do bombeamento de poços que haviam provocado um número grande de abalos sísmicos quando foram perfurados (FR na Fig. 1).

O sismo de 23.05.1989 foi registrado pela rede sismográfica regional, com estações localizadas até pouco mais de 560 km de distância epicentral. A leitura dos simogramas dessas estações permitiu determinar o hipocentro desse evento. Levantamentos macrossísmicos permitiram determinar a área atingida pelo tremor em torno de 300 km² (raio aproximado de 10 km), e a intensidade máxima de V MM verificou-se em um ponto em torno de 20°44'S e 47°46'W, numa fazenda localizada nas proximidades do trevo de entrada da cidade (Yamabe, 1999).

O nível de atividade sísmica em Nuporanga, relacionada com a perfuração de novos poços e a paralisação do bombeamento dos mesmos, foi diminuindo, de modo que o número de eventos associados a essas ocorrências já não tem sido expressivo como inicialmente. As paralisações de bombeamento necessárias para induzir abalos sísmicos passaram a ser mais prolongadas, da ordem de vários dias e, mesmo assim, provocando uns poucos eventos. O último evento sentido e registrado naquela localidade ocorreu em 1996.

3. ATIVIDADE SÍSMICA INDUZIDA POR POÇOS TUBULARES EM PRESIDENTE PRUDENTE.

Presidente Prudente (22,12°S-51,40°W) está localizada na parte central da porção norte da Bacia do Paraná, onde os pacotes de sedimentos e basaltos apresentam-se bastante espessos e o embasamento está em torno de 5000 m de profundidade, numa área que apresenta um baixo nível de atividade sísmica, correspondente ao interior da bacia, em comparação com o nível de sismicidade da região Sudeste. A sismicidade nessa área limita-se principalmente àquela provocada pelo Reservatório Hidrelétrico de

Capivara e aos sismos ocorridos em Presidente Prudente. Existem nessa cidade dois poços tubulares de 1800 m de profundidade, que foram perfurados em 1978 (poço PP-1) e em 1990 (poço PP-2).

A sismicidade de Presidente Prudente teve início em 1983, quando dois pequenos eventos foram sentidos por moradores da cidade mas não foram registrados pela Estação Sismográfica de Valinhos, distante cerca de 500 km, a mais próxima em funcionamento na ocasião. Desde junho de 1987 opera a Estação Sismográfica de Presidente Prudente, (PPD), com a finalidade de possibilitar estudos da atividade sísmica de Presidente Prudente e participar na auscultação da sismicidade regional e mundial.

Centenas de micro tremores foram registrados pela estação PPD numa quantidade crescente, desde a sua instalação até fevereiro de 1988, mês em que ocorreram 36 eventos (ver Fig. 2). Essa atividade diminuiu sensivelmente durante o mês de março, quando ocorreram 7 eventos. No dia 05 de abril ocorreu em Presidente Prudente um sismo de magnitude m_b 3,8. Depois deste sismo a micro atividade novamente aumentou até atingir um máximo de 78 eventos no mês de agosto, após o que, o número desses micro tremores diminuiu exponencialmente. Estes pequenos sismos de magnitude local <1 , distribuídos majoritariamente em distâncias de até 10 km de PPD, não foram registrados por outras estações sismográficas da região e também não foram percebidos pela população.

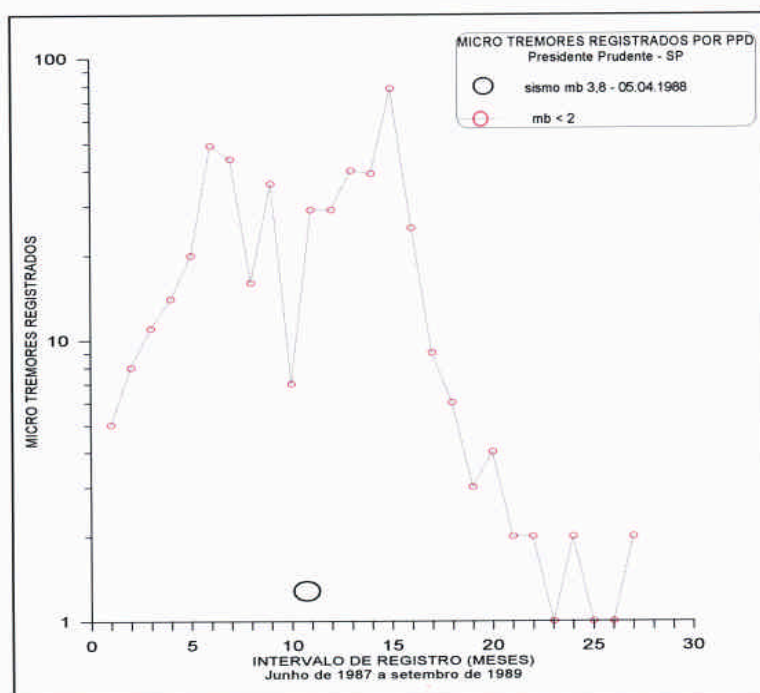


Fig. 2. Micro tremores com distância epicentral <10 km, registrados pela Estação Sismográfica de Presidente Prudente. Yamabe, 1999.

O evento do dia 05.04.1988 de Presidente Prudente teve intensidade estimada em torno de VI MM, num bairro localizado aproximadamente a 5 km W do centro da cidade (Boletim Sísmico Brasileiro N° 10, 1989). Foram observadas várias trincas de parede, afastamento de telhas e queda de objetos instáveis; foi sentido por toda a população que ficou assustada com o tremor. Este sismo foi sentido numa área de aproximadamente 40 km de raio (5000 km²). Das cerca de 30 cidades circunvizinhas a Presidente Prudente, visitadas na ocasião por técnicos do IAG/USP, as que perceberam os maiores efeitos desse sismo estão num raio de 10 a 20 km do epicentro. Uma segunda estação sismográfica, instalada pelo FCT/UNESP e IAG/USP no município de Presidente Prudente, nas proximidades do local de maior intensidade, operou durante quatro semanas após a ocorrência daquele evento, porém não foram registradas, nesse intervalo, réplicas do sismo.

Dentre os abalos sísmicos ocorridos em Presidente Prudente, o de 05.04.1988 foi o primeiro que foi registrado também pelas outras estações sismográficas da região, além de PPD. A hipótese de correlação entre a atividade sísmica local com o poço PP-1 (Yamabe & Berrocal, 1991), foi aventada com base na existência de uma caverna no basalto, detectada durante as operações de manutenção do poço PP-1, em abril de 1988. Esta manutenção tornou-se necessária devido a um decréscimo significativo da vazão de água do poço, observado na mesma época da ocorrência deste sismo.

O poço PP-1 foi perfurado em 1978 para o abastecimento de água da cidade. O poço é revestido apenas nos primeiros 220 m (arenito do Grupo Bauru) e os filtros estão colocados entre 1368 m e 1734 m de profundidade, no aquífero das Formações Botucatu e Pirambóia. Um *intertrap* no basalto, entre 1280 e 1300 m de profundidade, foi detectado durante a perfuração do poço, que não foi revestido nessa ocasião. O poço era jorrante originalmente, com capacidade total de vazão de 500 m³/h e temperatura na boca do poço de 63°C. Devido ao alto teor de flúor da água deste poço (10,5 ppm), ele nunca operou com seu total potencial, pois sua água tem que ser misturada com água sem flúor, de outra procedência.

Quando a bomba hidráulica do poço era desligada, nos primeiros anos de operação do poço, o fluxo de água continuava por um cano de fuga. Entretanto, esta saída natural

de água foi diminuindo até que o poço deixou de ser jorrante, precocemente, em 1983, menos de quatro anos após a sua efetiva utilização.

Um segundo poço em Presidente Prudente, PP-2, teve sua perfuração concluída em 1990, com profundidade de 1795 m. Entretanto, não foi jorrante desde o início, e o potencial hidráulico máximo de vazão medido ficou em torno de 285 m³/h.

Existe a possibilidade de fuga d'água através de falhamento. Esse falhamento estaria evidenciado através do rejeito existente ao longo desses poços, que são distantes apenas cerca de 1500 m um do outro. Esse rejeito é de quase 200 m na base do pacote de basalto, que se encontra na profundidade de 1410m no poço PP-1 e de 1608 m no poço PP-2. O rejeito também existe na camada do *intertrap*, porém, com menor basculamento, de aproximadamente 54m, no mesmo sentido, entre as profundidades de 1280 e 1300 m no poço PP-1 e entre 1334 e 1354 m no poço PP-2. Esse rejeito ainda existe no topo do pacote de basalto, onde é de apenas 12 m no mesmo sentido que os rejeitos anteriores, entre as profundidades de 214 m no poço PP-1 e 226m no poço PP-2. Considerando que as cotas na boca desses poços são iguais (407 m), pode-se concluir que o movimento que provocou esses rejeitos não teria afetado as camadas de sedimentos do Grupo Bauru, que são de idade cretácica.

O poço PP-2 foi encamisado desde a sua boca até pouco mais abaixo da base do basalto. A razão para esse revestimento, segundo a CPRM que perfurou esses poços, foi para tentar eliminar o alto teor de flúor encontrado em Presidente Prudente, considerando que o mesmo fosse originado pela água vinda de fraturas do basalto, o que provou-se ser incorreto, pois o nível de flúor na água nesse poço (10,8 ppm) é tão alto quanto o encontrado no poço PP-1.

A possibilidade de correlação entre a atividade sísmica local e o poço PP-1, foi reforçada após uma análise do seu histórico, incluindo os dados de vazão e nível dinâmico, fornecidos pela SABESP. Todos os fatos observados e as informações existentes permitem associar a atividade sísmica local com as variações das características do poço PP-1, conforme pode-se verificar na Fig. 3. Quedas de vazão acentuadas ocorreram entre 1983 e 1984 e entre 1987 e 1988, acompanhadas de rebaixamento do nível dinâmico do poço, o que pode ser correlacionado com a ocorrência dos primeiros abalos sísmicos sentidos em Presidente Prudente em dezembro de 1983, e com o sismo de maior magnitude ocorrido em abril de 1988, respectivamente.

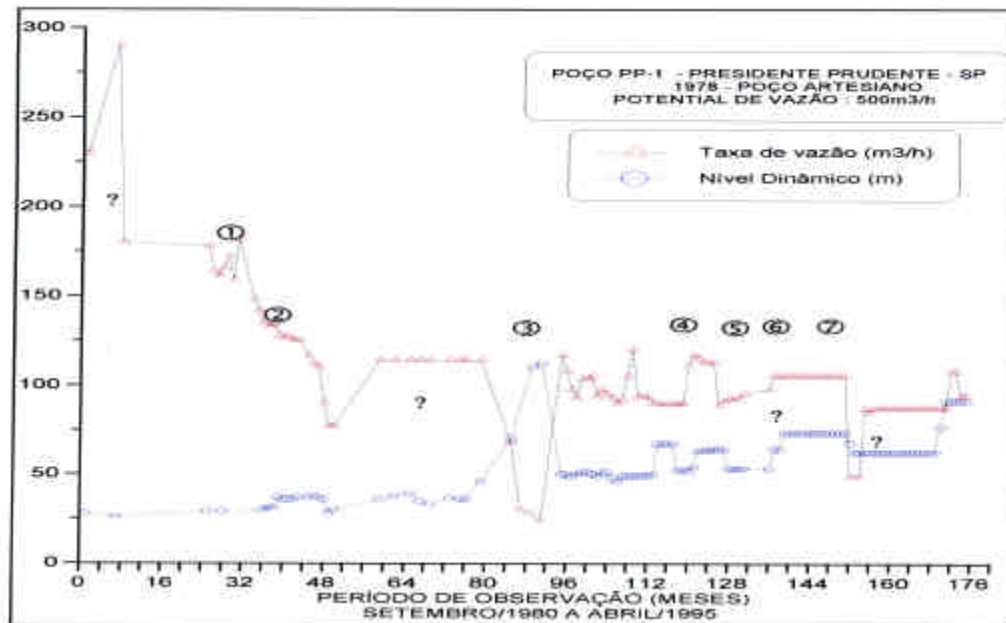


Fig. 3. Variações das características do poço PP-1, relacionadas com os sismos de Presidente Prudente. ① Poço deixa de ser jorrante; ② I=IVMM (05.12.1983); ③ I=VIMM (05.04.1988); ④ 3 eventos I=IV-VMM, $m_b=2,0$ (21-22.03.1991); ⑤ I=IIIMM (15.12.1991); ⑥ I=V-VIMM, $m_b=3,2$ (05.07.1992); ⑦ I=II-IIIMM, $m_b=0,7$ (06.05.1993). Yamabe, 1999.

Entre janeiro a abril de 1988 a vazão do poço diminuiu de mais de $100 \text{ m}^3/\text{h}$ para menos de $24 \text{ m}^3/\text{h}$ no início de abril desse ano. Na manutenção do poço que foi iniciada a seguir, foi detectada uma caverna de cerca de 20 m de espessura, exatamente na profundidade do *intertrap*, observada durante a perfuração desse poço. A extensão horizontal desta caverna não pôde ser avaliada pois as medições pontuais de diâmetro do poço ultrapassaram a capacidade de medição do aparelho (caliper) nesse intervalo de profundidade. Segundo informação da CPRM, essa caverna foi preenchida (cimentação por pressurização) com uma carga de mais de 50 toneladas de concreto, entre julho e agosto de 1988, conseguindo com isso recuperar a vazão de $100 \text{ m}^3/\text{h}$, que vinha sendo obtida nesse poço antes da queda significativa. O fechamento da caverna também provocou uma diminuição rápida do número de micro tremores registrados por PPD (ver Fig. 2), provavelmente devido à interrupção da fuga de água pelo *intertrap*, o que reforça a hipótese que relaciona o poço PP-1 com a atividade sísmica em Presidente Prudente.

A existência do *intertrap*, e o fato do poço não ter sido revestido nessa profundidade, provocou a formação da caverna, pela movimentação da água ao longo do poço, durante o intervalo de cerca de 10 anos. Foi observado, principalmente antes da diminuição

significativa da vazão em 1988, que a água bombeada desse poço continha uma quantidade elevada de areia, provavelmente proveniente do arenito do *intertrap*, que foi carregada pela água.

A diminuição da vazão desse poço poderia indicar que teria havido uma fuga de água através da caverna-*intertrap*. Esse fluxo de água continuaria no *intertrap* até alcançar as fraturas no basalto, que normalmente existem no topo dos derrames. Desse modo, o fluxo de água chegaria a atingir porções no basalto que de outra forma não seriam afetadas, provocando, assim, nos locais em que existisse acúmulo suficiente de tensões, a liberação de energia elástica na forma de abalos sísmicos, pela diminuição da resistência específica causada pela presença de água. Desde a percolação da água a partir do *intertrap* até as zonas fraturadas, onde possivelmente se deu a liberação de energia dos sismos de Presidente Prudente, o tempo transcorrido seria de alguns anos, provavelmente da ordem de cinco anos para os primeiros eventos.

A consequência mais evidente do efeito da cimentação da caverna, do ponto de vista sismológico, foi a rápida diminuição do número de micro tremores até a sua extinção, após um intervalo de 12 meses da cimentação (agosto de 1989). Entretanto, outros eventos ainda ocorreram vários anos após a cimentação da caverna do poço PP-1 em diferentes locais da área da cidade. Mesmo considerando que a cimentação tenha de fato fechado a caverna, os sismos posteriores podem ainda ser relacionados com o fluxo residual de água que estaria atingindo porções fraturadas do basalto. Existem evidências de que sismos induzidos têm continuidade mesmo após a suspensão do processo que provocou a sismicidade (Healey et al., 1968).

Data	Magnitude	Intensidade (MM)	Área atingida (km ²)
①- 05.12.1983		IV	>10
②- 05.04.1988	3,8	VI	~5000
③- 21.03.1991	2,0 e 2,2	IV	~60
22.03.1991	2,4	V	~65
④ - 15.12.1991	<1	III	<10
⑤ - 05.07.1992	3,2	V	~1300
⑥ - 07.05.1993	0,7	II-III	<10
⑦ - 24.10.1993			
⑧ - 29.09.1996			

Tabela 2. Sismos ocorridos em Presidente Prudente

4. DISCUSSÃO SOBRE A PROVÁVEL INDUÇÃO DOS SISMOS DE NUPORANGA E PRESIDENTE PRUDENTE

O caso mais conhecido e documentado de atividade sísmica induzida foi o ocorrido em Rock Mountain Arsenal, Denver, USA, nos anos 60, pela injeção de fluidos sob pressão em furos de profundidade maior do que 3000m (Freeze & Cherry, 1979), quando se teve a confirmação da influência da pressão elevada de fluidos nos poros das rochas, sobre a indução de sismos. Evans (1966) mostrou que a atividade sísmica registrada na área aumentou significativamente após o início da injeção de fluidos e apresentou uma forte correlação com a quantidade de fluidos injetados. Nesse caso, foi observado (Healey et al., 1968) que sismos induzidos podem continuar ocorrendo, mesmo após o processo que provocou a sismicidade tenha sido suspenso.

Acredita-se também que a sismicidade induzida pelos reservatórios hidrelétricos é devida, principalmente, à percolação natural de água através de fraturas superficiais e da própria porosidade das rochas existentes sob os reservatórios, que, quando atinge regiões de rochas deformadas possibilita a liberação de energia pela diminuição da resistência efetiva dessas rochas (Simpson, 1976). Vários reservatórios hidrelétricos no Brasil têm apresentado sismicidade induzida, provavelmente relacionada à falhamentos pré-existentes ou à zonas de deformação, que teriam sido ativados com a presença do reservatório, conforme mostram Ferreira (1997), Assumpção et al. (1995), Mito & Ribota (1995), Takeya et al. (1995), Veloso et al. (1987) e Mendigurem (1979), entre outros.

Na Bacia do Paraná existem dois casos de sismicidade induzida por reservatórios hidrelétricos um em Volta Grande-Porto Colômbia, no Rio Grande (SP-MG) e o outro em Capivara, no Rio Paranapanema (SP-PR). Embora ambas as atividades sejam induzidas por reservatórios, o regime sismotectônico, aparentemente, é diferente nessas duas áreas sísmicas. Em Volta Grande-Porto Colômbia o ciclo de atividades teve duração de apenas uma semana após o sismo principal de 24.02.1974, o qual teve magnitude m_b 4,2. Também foi observada uma atividade prémonitória de pequenos abalos sentidos três meses antes do principal. Após esse ciclo, nunca mais ocorreram sismos nessa área. Por outro lado, no caso de Capivara, a atividade sísmica, que teve início em 1976, tem-se repetido em ciclos de atividade com os maiores eventos ocorridos em 1979 e 1989, os quais são acompanhados por inúmeras réplicas, de modo que constantemente existe um nível de atividade sísmica nessa área.

Na área do reservatório de Capivara os focos sísmicos podem estar acontecendo dentro do pacote de basalto. Sobre a área do reservatório de Volta Grande não existem estudos específicos para determinar a profundidade focal; entretanto, pode-se inferir uma profundidade focal pequena pelo tamanho da área atingida, apesar de ter uma intensidade epicentral significativa (VI-VII MM).

Os estudos sobre sismicidade induzida, relacionada com movimentos de fluidos subterrâneos, têm concluído que ela ocorre somente em certas condições geológicas e tectônicas específicas, como a presença de falhas ou zonas de fraqueza crustais. Segundo Doser (1992), a atividade sísmica em campos de exploração de petróleo está, usualmente, relacionada tanto com a injeção de fluidos em alta pressão como com a redução da pressão dos reservatórios, mas existem, segundo esse autor, características estruturais similares nos campos de óleo que apresentam sismicidade.

A literatura especializada não apresenta, entretanto, nenhum caso de poços perfurados para petróleo ou água subterrânea que tenham iniciado atividade sísmica pelo fluxo de fluidos do próprio poço nas rochas circunvizinhas, como parece ocorrer com os poços tubulares em Nuporanga, segundo Yamabe (1985) e em Presidente Prudente, segundo Yamabe & Berrocal (1991).

Com a finalidade de mapear a presença de *intertraps*, cavidades ou vesículas significativas nos derrames de basalto, foi efetuado um levantamento do perfil litológico de poços profundos perfurados na porção norte da Bacia do Paraná, em regiões restritas aos Estados de São Paulo, norte do Paraná e Mato Grosso do Sul, (ver Fig. 4). Entre os perfis litológicos a que se teve acesso, foi verificada a presença de *intertrap* s de espessuras

comparáveis à encontrada em Presidente Prudente, como em Taciba (22°12'01,8" S - 51°20'48,0" W) com 22,5 m, Cornélio Procópio (23°10'49,2" S - 50°39'17,5" W) com 30 m e Cuiabá Paulista (22°18'11,9" S - 52°12'21,6" W) com 18 m, entre outras, ou até maiores como em Marília (22°18'8,7" S - 50°02'30,9" W) com 50 m. Por outro lado, em alguns poços não consta a presença de *intertraps*, como os de Araçatuba (21°07'47" S - 50°21'55" W) e Fernandópolis (20°16'54,1" S - 50°14'53,2" W).

O objetivo de se mapear os poços que apresentem *intertraps*, cavidades ou vesículas de tamanho significativo nos derrames de basalto foi verificar se nas localidades onde encontram-se esses poços teria ocorrido atividade sísmica, que seria provavelmente induzida pelo poço. Unicamente em Paraguaçu Paulista, onde existe um poço de 3663 m de profundidade e ocorreram três abalos sísmicos que foram sentidos em uma área de aproximadamente 6 km², não foi possível conseguir o perfil litológico detalhado e consequentemente não se pôde verificar a existência do *intertrap* neste poço. Entretanto, pela proximidade de outros poços com *intertraps* espessos (ver Fig. 4), pode-se assumir que exista nesse poço um *intertrap* de espessura compatível, que provavelmente teria provocado esses sismos.

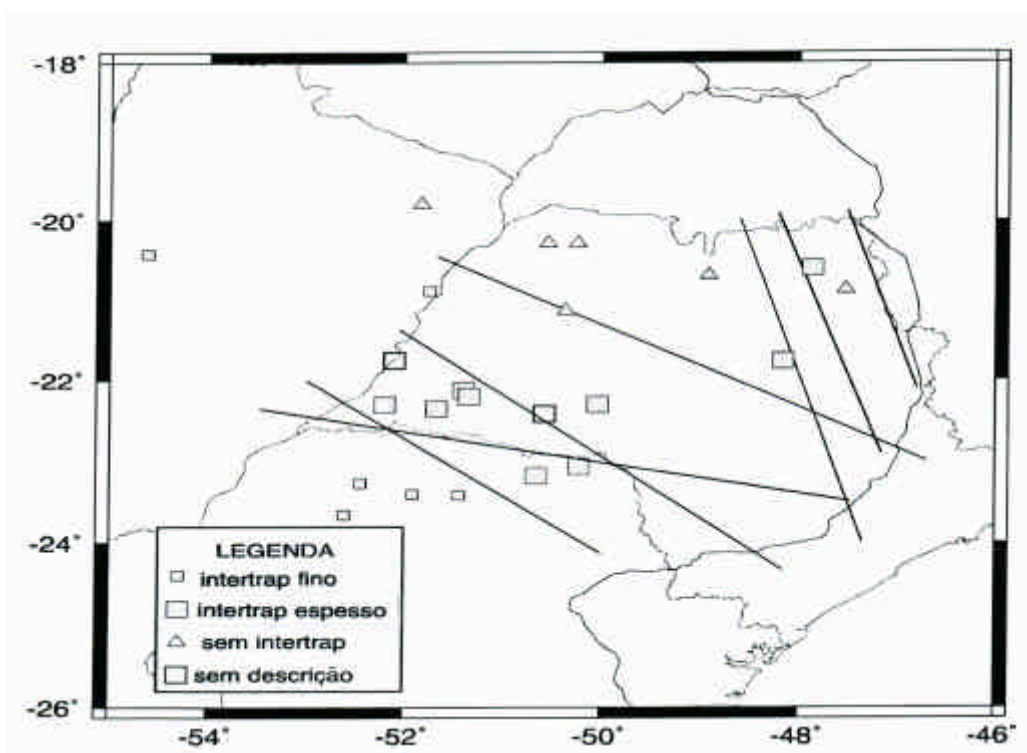


Fig. 4. Poços pesquisados na porção norte da Bacia do Paraná, com presença ou não de *intertraps* no basalto. (São mostrados também os principais alinhamentos estruturais, Riccomini, 1997 – Melfi et al., 1998). Yamabe, 1999.

Nas localidades onde encontram-se os outros poços analisados, de grandes profundidades e que apresentam a existência de *intertraps* de maior espessura, não se tem notícias de abalos sísmicos sentidos. Estes poços foram perfurados para a prospecção de petróleo e, segundo informações, a Petrobrás costuma vedar camadas de arenito que não são de seu interesse. Por esta razão, embora apresentem a existência de *intertraps* de grande espessura no basalto, dificilmente poderiam provocar a indução de abalos sísmicos, porque eles são revestidos nos horizontes sedimentares no basalto e os que constituem aquíferos. Mesmo quando eles são utilizados para captação de água do aquífero Botucatu, sem que nenhum encamisamento extra tenha sido feito, como os poços de Três Lagoas e o de Presidente Epitácio, não têm provocado abalos sísmicos.

Desse modo, a ausência de abalos sísmicos nessas localidades, provavelmente se deva à vedação das camadas de arenito e, conseqüentemente, à não exposição dos *intertraps* ao fluxo de água.

Entre os poços analisados, os de Cornélio Procópio e Presidente Prudente (PP-1 e PP-2), foram perfurados com a finalidade de exploração de água subterrânea. Entretanto, no caso de Cornélio Procópio, o poço foi perfurado para fins de exploração de água quente por uma empresa de café solúvel, na elaboração do seu produto e, portanto, foram tomadas várias providências para esse fim, entre as quais o revestimento do *intertrap* (30 m) existente nesse poço, antes de iniciar o bombeamento. Não houve notícia de abalos sísmicos nessa localidade, desde a sua perfuração até o presente.

No caso de Presidente Prudente, como já foi exposto, o poço PP-1 teve a camada de *intertrap* cimentada apenas em agosto de 1988, depois da ocorrência de vários abalos sísmicos após a sua perfuração em 1977-1978 e do sismo local de maior magnitude (m_b 3,8) em abril de 1988. O poço PP-2, perfurado em 1990, foi encamisado desde a sua boca até pouco mais abaixo da base do basalto e, aparentemente, não tem influência no nível de sismicidade dessa localidade, embora, como se expõe acima, vários abalos sísmicos tenham ocorrido em Presidente Prudente, depois de 1990.

Atualmente, os poços perfurados para a exploração de água subterrânea na porção da Bacia do Paraná nos Estados do Mato Grosso do Sul e Paraná estão sendo encamisados, principalmente os perfurados pela companhias de saneamento desses estados, mesmo sabendo que as espessuras dos *intertraps*, na maioria desses poços, são da ordem de alguns metros, iguais aos de Nuporanga quanto a esse aspecto. Provavelmente, porque estão sendo encamisados, esses poços não apresentaram sismicidade induzida até o presente.

O número de poços analisados é relativamente pequeno e não permite uma conclusão definitiva sobre a existência de *intertraps* e a ocorrência de sismos relacionados com esses poços. Entretanto, pode-se afirmar que os poços tubulares profundos que atravessam as camadas de basalto até profundidades maiores, onde se encontram *intertraps* de espessura significativa, 2 m em Nuporanga e de 20 m em Presidente Prudente, e que não são revestidos, podem apresentar casos de sismicidade provocados pelo fluxo de água através dos *intertraps*.

Contudo, devem existir localidades com poços tubulares que tenham atravessado prováveis *intertraps* que, talvez, não tenham sido revestidos e, no entanto, não provocaram atividade sísmica com a exploração da água. Nestes casos, é provável que as condições tectônicas e hidrogeológicas locais não sejam propícias para provocar fenômenos sísmicos. Segundo Yamabe (1999), possivelmente exista uma relação entre a atividade sísmica na porção norte da Bacia do Paraná com os alinhamentos estruturais sugeridos por Riccomini (1997), e interpretados por Soares et al., (1981) como sendo representativos de zonas de fraqueza do embasamento.

A cidade de Presidente Prudente, assim como o reservatório hidrelétrico de Capivara, estão localizados na área sísmica da porção sudoeste do Estado de São Paulo, entre os alinhamentos do Rio Paranapanema e Guapiara, enquanto que, aparentemente, os *intertraps* de maiores espessuras encontram-se nas proximidades do alinhamento estrutural Guapiara e entre este e o alinhamento de São Jerônimo-Curiuva. Semelhantemente, a cidade de Nuporanga, e o reservatório hidrelétrico de Volta Grande-Porto Colômbia, estão localizados na área sísmica da porção nordeste desse Estado, entre os alinhamentos do Rio Moji-Guaçu e Rifaina, onde encontram-se os interderrames mais espessos da região Nordeste do Estado de São Paulo (São Joaquim da Barra -18 m e Araraquara - 40 m).

5. CONCLUSÃO

A análise da sismicidade da porção norte da Bacia do Paraná, onde estão localizados Nuporanga e Presidente Prudente, apontou uma concentração de sismos induzidos em regiões localizadas entre os lineamentos estruturais mais marcantes. Os estudos sobre sismicidade induzida, relacionada com movimentos de fluidos subterrâneos, têm concluído que essa atividade ocorre somente em certas condições geológicas e tectônicas específicas, como a presença de falhas ou zonas de fraqueza crustal. Entretanto, para que essas feições sejam ativadas, é necessária a presença dos

fluidos que vão diminuir a sua resistência específica e liberar as tensões acumuladas. Nos casos da atividade sísmica induzida por poços tubulares, que foram estudados neste trabalho, o meio condutor do fluido para atingir essas feições são os *intertraps* no pacote do basalto.

Feições geológicas como cavidades, *intertraps* e falhas de pequenas extensões são comuns no basalto pela própria dinâmica de resfriamento e solidificação dos fluxos de lavas. Um levantamento sobre poços tubulares na porção norte da Bacia do Paraná mostrou a existência de camadas de arenito *intertrap* de espessuras variando de menos de 1 m até 50 m. É possível dizer que as maiores espessuras dessas camadas estão localizadas em áreas onde estão mapeados fortes lineamentos estruturais.

Contudo, não existem notícias de abalos sísmicos sentidos nas localidades onde estão localizados esses poços. Deve-se destacar, entretanto, que os *intertraps* existentes, na maioria dos poços, foram vedados e, em consequência, tiveram as camadas de arenito que não são de interesse, revestidas. Poços tubulares perfurados atualmente têm sido revestidos. Esta talvez seja a razão pela qual esses poços não apresentaram fenômenos sísmicos associados até o presente. Entretanto, pode-se inferir que poços tubulares profundos, que atravessam as camadas de basalto até profundidades onde se encontram *intertraps*, como em Nuporanga, 180 m de profundidade (*intertraps* de 2 m de espessura) e em Presidente Prudente 1280 m (20 m de espessura), e que não são revestidos, podem apresentar casos de sismicidade provocados pelo fluxo de água através dos *intertraps*.

O processo de deposição dos arenitos e basalto, que formam a bacia, aparentemente, foi influenciado pelas estruturas pré existentes, porém também foi afetado pelo tectonismo posterior à deposição do basalto. Em Presidente Prudente, além da camada de *intertrap* de 20 m de espessura, foi observado um basculamento de ~150m na base do pacote do basalto, que também é observado no *intertrap* detectado nos poços PP-1 e PP-2 e no topo desse pacote, indicando a existência de falhamento posterior à ocorrência dos derrames de lava. Estas falhas poderiam estar relacionadas ao lineamento Guapiara, que atravessa a região.

O exposto acima sugere que as feições tectônicas no basalto, associadas com os alinhamentos estruturais, que são capazes de acumular e liberar tensões elásticas, podem ser a condição de ordem tectônica e hidrogeológica que provoca atividade sísmica, quando são alcançadas pelo fluxo de água subterrânea trazida através dos *intertraps*, não revestidos, e que são atravessados por poços tubulares.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Almeida, F.F.M. 1959. Investigação sobre a natureza dos abalos observados na cidade de Fernando Prestes em abril e maio de 1959. Relatório não publicado.
- Almeida, F.F.M. 1960. Relatório dirigido ao magnífico Reitor da Universidade de São Paulo sobre a atividade sísmica de Fernando Prestes. Não publicado.
- Assumpção, M.; Freire, M. & Ribotta L.C. 1995. Sismicidade induzida no Reservatório de Capivara: resultados preliminares sobre localização de fraturas ativas. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 4., Rio de Janeiro. Resumos Expandidos. Rio de Janeiro : SBG. v. 2, p. 961-964.
- Berrocal, J; Hamza, V.M.; Antezana, R. 1978. Sismicidade induzida por poços artesianos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Salvador. Anais. p.229.
- Doser, D.I.; Baker, M.R.; Luo, M.; Marroquin, P.; Ballesteros, L.; Kingwell, J.; Diaz, H.L. & Kaip, G. 1992. The not so simple relationship between seismicity and oil production in the Permian Basin, West Texas. *PAGEOPHY.*, v. 139, n. 3-4.
- Evans, D.M. 1966. The Denver area earthquakes and the Rocky Mountain arsenal disposal well. *Mountain Geologist*, v. 3, p. 23-6.
- Ferreira, J.M. 1997. Sismicidade e esforços no Nordeste do Brasil. São Paulo. Tese (Doutorado) – Depto. de Geofísica, IAG-USP.
- Freeze, A. & Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. New Jersey : Prentice Hall. 604 p.
- Gupta, H.K. 1992. *Reservoir - Induced Earthquakes*. Elsevier.
- Gupta, H.K.; Rastogi, B.K.; Chadha, R.K.; Mandal, P. & Sarma, S.P. 1997. Enhanced reservoir-induced earthquakes in Koyna region, India, during 1993-95. *Journal of Seismology*, v. 1, p. 47-53.
- Healey, J.H.; Rubey, W.W.; Griggs, D.T. & Raleigh, C.B. 1968. The Denver Earthquakes. *Science*, v. 161, p. 1301-1310.
- Melfi, A. J.; Piccirillo, E. M. & Nardy, A. J. R. 1988. Geological and magmatism aspects of the Paraná basin - an introduction. In: PICCIRILLO, E.M. & MELFI, A.J. (Eds.) *The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo : Instituto Astronômico e Geofísico - Universidade de São Paulo. p. 1-13.
- Mendiguren, J.A. 1979. Estudos sobre sismicidade induzida desenvolvidos na Universidade de Brasília. In: SIMPÓSIO SOBRE SISMICIDADE INDUZIDA, 1979, São Paulo. Atas. São Paulo : ABGE. p. 48-67.

- Mioto, J.A. & Ribotta, L.C. 1995. Atividade sísmica nas proximidades do Reservatório da Barragem de Jaguari, Rio Jaguari (SP). In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 4., 1995, Rio de Janeiro. Resumos Expandidos. Rio de Janeiro : SBGf. v. 2, p. 983-986.
- Riccomini, C. 1997. Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, v. 27, n. 2, p. 153-162.
- Simpson, D.W. 1976. Seismicity changes associated with reservoir loading. In: Milne, W.G. (Ed.). Induced Seismicity. Eng. Geol., v. 10, n. 2-4, p. 123-150.
- Soares, P.C.; Mattos, J.T.; Baliero, M.G.; Barcellos, P.E.; Menezes, P.R.; Guerra, S.M.S. & Csordas, S.M. 1981. Análise Morfoestrutural Regional com Imagens de Radar e Landsat na Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3., 1981, Curitiba. Anais. Curitiba : SBG. v. 1, p. 201-216.
- Takeya, M.; Ferreira, J.M.; Assumpção, M.; Pearce, R.G. & Oliveira, R.T. 1995. Correlation of seismicity with a mapped fault in the Açú Reservoir. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 4., 1995, Rio de Janeiro. Resumos Expandidos. Rio de Janeiro : SBGf. v. 2, p. 980-982.
- Torres, C.C. 1970. Relatório apresentado ao Governador do Estado de São Paulo sobre fenômenos sísmicos ocorridos na cidade de Herculândia. IGG. Não publicado.
- Veloso, J.A.V.; Gonçalves, E.S.; Reis, J.C.; Duarte, V.M.; Mota, C.G.B. 1987. Registro de sismicidade induzida em reservatórios da Cemig e de Furnas. In: CONGR. BRAS. DE GEOL. DE ENG., 5., 1987, São Paulo. Anais. São Paulo: ABGE. v. 1, p. 135-146.
- Yamabe, T.Y. 1985. Investigações geotérmicas em uma região de atividade sísmica: parte nordeste do Estado de São Paulo. São Paulo. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Geofísica, IAG-USP.
- Yamabe, T.H. & Berrocal, J. 1991. A origem da atividade sísmica de Presidente Prudente (SP): induzida ou natural? In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 2., 1991, Salvador. Resumos Expandidos. Salvador : SBGf. v. 2, p. 521-528.
- Yamabe, T.H. & Berrocal, J. 1994. Induced Seismicity by deep ground water wells. In: REGIONAL SEISMOLOGICAL ASSEMBLY IN SOUTH AMERICA, Brasília.

- Yamabe, T. H. & Hamza, V. M. 1996. Geothermal investigations in an area of induced seismic activity, northern São Paulo state, Brazil. *Tectonophysics*, v. 253, p. 209-225.
- Yamabe, T. H. 1999. Estudos geofísicos para explicar a sismicidade induzida e orientar a exploração de água subterrânea em Nuporanga – SP”, São Paulo. Tese (Doutorado) – Departamento de Geofísica, IAG/USP.