

NOTA BREVE DE PESQUISA  
*SHORT RESEARCH NOTE*

## SUBSIDÊNCIA NA REGIÃO DE GRANDES BARRAGENS

Camil Gemael & Pedro Luis Faggion

Existem muitos exemplos na literatura mostrando as relações entre represas e atividades sísmicas. A “Represa de Segredo” (Rio Iguaçu, Paraná), com 145 metros de altura, é considerada potencialmente sismogênica. Para detectar possíveis deformações verticais da crosta da Terra na vizinhança da represa, a UFPR realizou nivelamento de primeira ordem ao longo de um circuito de 38 km antes e após o enchimento da represa. São mostrados os resultados de ambos os nivelamentos e a subsidência detectada, que foi acima de 20 mm. O desvio do Rio Jordão em março deste ano aumentará o volume de água do lago artificial; por esta razão, a investigação irá continuar com um nivelamento de precisão e posicionamento geodésico com GPS. Duas novas linhas serão incluídas além do circuito primitivo. Também a gravidade será medida sobre as referências de nível com dois gravímetros Lacoste Romberg.

**Palavras-chave:** Represas e sismicidade; Dados geodésicos; GPS; Determinações verticais; Represa de Segredo.

**SUBSIDENCE IN AREAS OF LARGE RESERVOIRS** - *There are several examples in the literature showing the relationship between reservoir and seismic activities. Since the “Segredo Dam” (Iguaçu River, Paraná) is 145 meters high, it is considered “potentially seismogenic”. In order to detect possible vertical deformation of the earth’s crust in the vicinity of the dam, the UFPR undertook a first order leveling along a circuit of 38 km before and after the reservoir was filled with water. The results of both levelings are shown and a subsidence of 23 mm was detected. The deviation of Jordão River in March of next year will increase the volume of water of the artificial lake; for this reason the investigation will continue with both precise leveling and geodetic positioning with GPS. Two new lines will be included besides the original circuit. Also the gravity will be measured on the bench marks with two LaCoste Romberg gravimeters.*

**Key words:** Reservoir triggered earthquakes; Geodetic data; GPS; Vertical measurements; Segredo Dam.

U.F.P.R. - Setor de Tecnologia - Departamento de Geociências

C.P. 19011 - CEP 81531-900 - Curitiba/PR

## INTRODUÇÃO

Barragens com mais de cem metros de altura são potencialmente sismogênicas.

A frase supra é tão verdadeira quanto inquietante.

Ainda mais enfática, mas com o objetivo de alertar, é a frase-título de um trabalho de Rothe (1968): "Fill a lake, start an earthquake".

Realmente existe uma comprovada correlação "barragem-sismicidade": após o enchimento do reservatório das grandes represas (e às vezes mesmo durante) têm sido registrados movimentos sísmicos em regiões neutras e/ou o recrudescimento da sismicidade natural.

A literatura a respeito é relativamente rica (Carder & Small, 1948; Rothe, 1968; Gupta et al., 1972; Lambert & Liard, 1986). Nos limitaremos a lembrar o evento mais trágico, ocorrido na Índia, na barragem de Koyna. Região até então considerada assísmica, vários tremores foram registrados nas vizinhanças do lago artificial, até que em dezembro de 1970 ocorreu a tragédia: um terremoto que ceifou mais de 150 vidas e deixou um saldo de 2.000 feridos.

No Brasil o registro de sismicidade natural é precário. Em Coelho (1975) encontramos algumas informações sobre as barragens de Cajuru (rio Paraná, Minas Gerais), Capivara (rio Paranapanema, na divisa do Paraná com São Paulo) e Capivari-Cachoeira (Paraná) com indícios não comprovados da correlação sismicidade-barragem.

"The question of whether earthquakes occurring in the vicinity of large reservoir might be triggered by increased fluid pressure or by crustal loading, or both, remain to be solved. Geodetic studies before and after reservoir filling, with special emphasis given to vertical measurements, would help to answer this question" (Sohrab, 1972).

Nesse sentido têm sido realizados trabalhos de nivelamento de precisão "antes e após", em várias regiões do mundo como por exemplo o conduzido pelo Serviço Geodésico Canadense na Barragem La Grande-2 (província de Quebec) (Lambert & Liard, 1986) e o executado pelo Departamento de Levantamentos da antiga Rodésia no lago artificial Kariba, formado pelo rio Zambezi.

No Brasil iniciativas dessa natureza têm sido levadas a cabo, em caráter pioneiro, pela UFPR, nas Hidrelétricas Bento Munhoz da Rocha e Segredo, ambas no rio Iguaçu (Gemael, 1983; 1993).

## METODOLOGIA

A tecnologia de nossos dias vem colocando à disposição de engenheiros e cientistas de todas as áreas, em ritmo crescente, recursos cada vez mais sofisticados para a realização de medidas de precisão.

No campo da engenharia tais recursos estão sendo utilizados no estudo e controle de deformações nas mais diferentes estruturas: de instalações portuárias a grandes edifícios; de máquinas industriais a pontes; de complexos atômicos a barragens. Nestas últimas, pode-se processar um controle de "deformações relativas" com equipamento alojado em seu próprio corpo; ou em controle de "deformações absolutas" utilizando técnicas geodésicas. Mas o presente trabalho, não obstante ser concernente a barragens, preocupa-se, como ficou visto, com outro aspecto do problema: a possibilidade de detectar deformações verticais da crosta nas vizinhanças do reservatório após a formação do lago artificial da Hidrelétrica Segredo, no rio Iguaçu. O geodesta conta nesse sentido com três ferramentas:

- a) nivelamento geométrico de alta precisão;
- b) rastreamento de satélites artificiais;
- c) gravimetria.

Nas duas etapas já realizadas utilizamos o nivelamento e rastreamento de satélites; nas próximas (primeiro trimestre e último de 1996) estas operações serão repetidas e complementadas com o levantamento gravimétrico de todas as referências de nível.

## NIVELAMENTO GEOMÉTRICO

O nivelamento geométrico se constitui numa das mais precisas operações da Geodésia, em que pese a sua simplicidade e o fato de, em sua essência, continuar sendo o mesmo já praticado no século passado. Consiste na determinação relativa da altitude ortométrica que é a distância, contada ao longo da vertical, do ponto considerado ao geóide; ou, em termos mais práticos, à superfície equipotencial do campo da gravidade (geope) passante pelo datum altimétrico. No caso de nosso país, esse datum é o ponto zero do marégrafo de Imbituba, em Santa Catarina. (Gemael, 1988). As operações de nivelamento já efetuadas nas duas barragens (e que prosseguirão nas duas próximas etapas do projeto) se caracterizam por uma elevada precisão, superior à usual nos trabalhos geodésicos da rede altimétrica nacional. A discrepância entre os desníveis obtidos no nivelamento e contranivelamento de uma seção de 1 km de comprimento manteve-se

sempre abaixo de dois milímetros, isso significando um erro médio quadrático de módulo sempre inferior a  $10^{-6}$ , ou seja, sempre inferior a 1 ppm. Esse elevado padrão de precisão foi alcançado mediante rigorosa obediência a uma série de especificações técnicas, das quais damos a seguir um resumo: verificação diária do horizontalismo do eixo ótico da luneta e do nível esférico das miras; comprimento máximo das visadas: 50 metros; não utilização do sexto inferior das miras; duas leituras do fio nivelador e adoção da média (critério de rejeição: 0,03 mm); etc.

Equipamento utilizado: nível de precisão Wild-N3 com placa plano-paralela e miras de invar aferidas no Laboratório de Aferição e Instrumentação Geodésica da UFPR (Faggion, 1993).

O trabalho de campo foi executado pela equipe de topografia da COPEL sob orientação e responsabilidade dos autores. Em se tratando da determinação, em duas épocas diferentes, dos mesmos desníveis, a correção do não paralelismo das equipotenciais do campo da gravidade perde a sua razão de ser; e a pequena extensão da área de trabalho torna negligenciável a correção relativa à perturbação luni-solar sobre a vertical.

## RASTREIO DE SATÉLITES ARTIFICIAIS

Como é sabido, o rastreo de satélites do Sistema de Posicionamento Global - GPS - proporciona as coordenadas cartesianas da estação referidas a um terno geocêntrico (Gemael, 1991); essas coordenadas são transformadas para um terno local, quase geocêntrico, no caso o Sistema Geodésico Brasileiro, e convertidas em coordenadas geodésicas: latitudes, longitude e altitude geométrica; e é esta última que nos interessa pois representa a distância, contada ao longo da normal, do ponto considerado à superfície do elipsóide que é a superfície utilizada nos cálculos geodésicos (no caso, o SGR-67). Aplicamos o "método diferencial" utilizando dois equipamentos Trimble, aptos a receber as frequências  $L_1$  e  $L_2$  (correção ionosférica).

Os resultados do rastreo e a comparação com o nivelamento geométrico serão divulgados no final do projeto.

## GRAVIMETRIA

Nas próximas etapas do projeto Segredo todas as referências de nível serão levantadas com dois gravímetros LaCoste-Romberg modelo G recentemente aferidos na Rede de Estações Gravimétricas Absolutas instalada no país pela UFPR graças à colaboração da universidade de Hannover (Gemael et al., 1990). Em cada estação serão processadas três leituras e anotada a hora legal para posterior consideração da

deriva e da perturbação luni-solar (maré-terrestre), usando o fator gravimétrico 1,17 (Gemael & Andrade, 1991). Como subprodutos teremos anomalias gravimétricas "free-air" e Bouguer, além de isoladas informações sobre o geóide.

## HIDRELÉTRICA DE SEGREDO: PRIMEIROS RESULTADOS

Apresentamos a seguir os primeiros resultados das investigações conduzidas na região da Barragem de Segredo. Agora, com o lago artificial formado, todas as operações da etapa pré-enchimento foram repetidas.

O nivelamento foi conduzido pela mesma equipe, com o mesmo equipamento e com os mesmos cuidados; o erro médio quadrático das seções de 1 km niveladas nos dois sentidos manteve-se no mesmo patamar: igual ou inferior a um milímetro.

A Tab.1 registra a altitude das 32 referências de nível que formam um anel próximo da barragem, conforme mostra

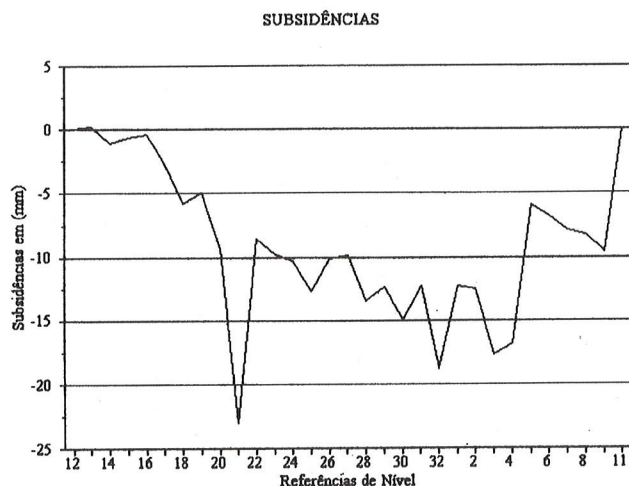
MARCOS	ALTITUDES ( Cm )		DIFERENÇAS ( mm )
	1992	1994	
1	5117,339	5117,216	-12,30
2	5137,955	5137,830	-12,50
3	5704,965	5704,787	-17,77
4	6203,640	6203,471	-16,87
5	6869,982	6869,923	-05,93
6	7348,892	7348,824	-06,79
7	7682,643	7682,563	-07,97
8	8042,637	8042,555	-08,20
9	8171,362	8171,266	-09,61
11	8208,265	8208,265	00,00
12	8509,743	8509,743	00,00
13	8508,207	8508,209	00,20
14	8224,513	8224,503	-01,06
15	7978,941	7978,934	-0,62
16	8363,991	8363,987	-0,39
17	8025,134	8025,108	-02,66
18	8047,269	8047,211	-05,78
19	7938,452	7938,402	-05,00
20	7418,584	7418,491	-09,37
21	7477,908	7477,677	-23,04
22	7197,890	7197,804	-08,59
23	7123,277	7123,180	-09,76
24	5659,791	5659,688	-10,31
25	5648,599	5648,471	-12,77
26	5370,556	5370,455	-10,07
27	5225,279	5225,180	-09,88
28	5180,083	5179,948	-13,47
29	5692,722	5692,598	-12,38
30	5639,685	5639,536	-14,92
31	5193,025	5192,902	-12,30
32	5311,202	5311,014	-18,78

**Tabela 1** - Diferenças observadas nas 32 referências de nível, entre 1992 e 1994.

*Table 1* - Observed differences between 1992 and 1994, in the 32 reference sites.

a Fig. 2, obtidas nas duas etapas e as respectivas diferenças, ou seja, as subsidências constatadas.

Na Fig. 1, a seguir, estão representadas graficamente as subsidências apresentadas na tabela acima.



**Figura 1** - Subsidências observadas.

**Figure 2** - Observed Subsidences.

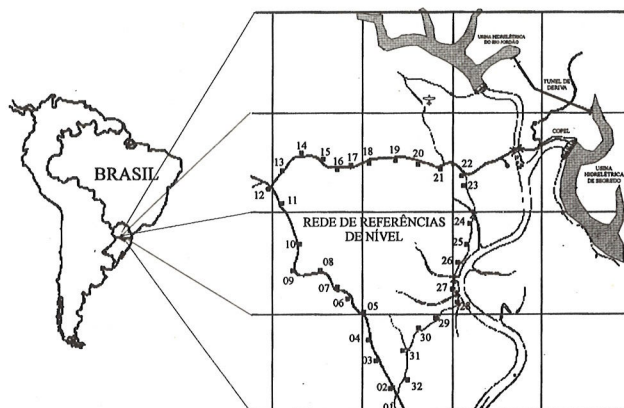
No que concerne ao rastreamento de satélites artificiais ocorreram problemas de campo e de processamento (em parte conseqüência da mudança de equipe para treinamento de alunos de graduação e pós-graduação) que atrasaram os resultados. Estes serão divulgados juntamente com os resultados da terceira fase com início previsto para dezembro de 1995.

## DESVIO DO RIO JORDÃO

Está sendo construída uma barragem no rio Jordão (Fig. 2) cujo objetivo é, através de um canal de derivação, aumentar o volume de água do reservatório com o conseqüente aumento na geração de energia. Abriu-se assim a perspectiva de uma nova etapa, não prevista no projeto inicial, a ser realizada no final de 1996, com a inclusão de uma nova linha e a repetição de todos os trabalhos: nivelamento, rastreamento e gravimetria.

## PRIMEIRAS CONCLUSÕES

Os resultados iniciais já comprovam a existência de subsidência nas vizinhanças do lago artificial; as próximas etapas indicarão o aumento ou estabilização de tal subsidência com o tempo. É a contribuição da UFPR e da



**Figura 2** - Situação da área levantada. (Rio Iguaçu, Paraná.)

**Figure 2** - Localization of the study area. (Iguaçu River, Paraná.)

COPEL à Geofísica brasileira para o estudo do importante problema da correlação sismicidade-barragens.

## AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos à Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL) pelo apoio nesta e noutras pesquisas e ao CNPq através do projeto integrado para Laboratório de Aferição e Instrumentação Geodésica com registro no BANPESQ no 94003795, pelo apoio neste e em outros trabalhos.

## REFERÊNCIAS

- CARDER, D. S. & SMALL, J. B. -1948** - Level divergence, seismic activity and reservoir loading in the lake.Mead area. Transaction AGN, Nevada, 29 (6).
- COELHO, F. E. P. - 1978** - Sismicidade em represas brasileiras. Promon Engenharia S/A, São Paulo.
- DAVINO, A. - 1972** - Auscultação sísmica de reservatórios barragens sismogênicos. VIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, São Paulo.
- FAGGION, P. L. - 1993** - Contribuição para a implantação de um sistema de aferição de miras na Universidade Federal do Paraná. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 133p.
- GEMAEL, C. - 1983** - Vertical crustal deformations near large dams. Trabalho apresentado na XVIII Assembléia Geral da UGGI, Hamburgo.

- GEMAEL, C. - 1988** - Introdução à Geodésia Geométrica. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - UFPR.
- GEMAEL, C. et al., - 1990** - Large-scale gravity control in Brazil. IAG Symposium n° 103, Gravity, Gradiometry and Gravimetry, Spring-Verlag.
- GEMAEL, C. - 1991** - Introdução à Geodésia Celeste. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - UFPR.
- GEMAEL, C. & ANDRADE J. B. - 1991** - Variação do fator gravimétrico no Brasil. 2° Congresso Internacional da SBGF, 1: 134-139, Salvador, BA.
- GEMAEL, C. - 1993** - Auscultação geodésica na região da Hidrelétrica Segredo. 3° Congresso Internacional da SBGF, 1: 634-636, Rio de Janeiro, RJ.
- GUPTA, H., RASTOGI, B. K. & NARAIN, H. - 1972a** - Common features of the reservoir associated with seismic activities. Bull. Seis. Am. Soc., 62: 481-492.
- GUPTA, H. et al. -1972b** - Some discriminatory characteristics of earthquakes near the Kariba, Kremasta and Koyna artificial lakes. Bull. Seis. Am. Soc., 62: 493-507.
- IBGE - 1983** - Especificações e normas gerais de levantamentos geodésicos. Boletim de Serviço 1602, Rio de Janeiro.
- LAMBERT, A. & LIARD, J. O. -1986** - Vertical movement and gravity change near de La Grande-2 reservoir. J. Geoph. Res. vol. 91,9p.
- ROTHER, J. R. - 1968** - Fill a lake, start an earthquake. New Scientist, 39: 75-78.
- SOHRAB, S. - 1972** - Earthquakes related to reservoir filling. National Academy of Sciences, Washington.

Submetido em: 11/03/96

Revisado pelo(s) autor(es) em: 22/05/96

Aceito em: 30/05/96

# VI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA

**Salvador / Bahia - 19 a 25/10/97**

Comissão Organizadora do  
**VI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA**

Rua Barão de Geremoabo, s/n° - Federação

CEP 40210-190 - Salvador - Bahia - Brasil

Telefax: (071) 336-6779

E-mail: posgema@ufba.br