

# O Uso das Ciências Geodésicas no Monitoramento de Barragens - Barragem de Salto Caxias

Prof. Dr. Carlos Aurélio Nadal <sup>1</sup>  
Prof. Dr. Pedro Luis Faggion <sup>1</sup>  
Prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga <sup>1</sup>  
Prof. Dr. Silvio Rogério Correia de Freitas <sup>1</sup>  
Eng. Marcos Alberto Soares <sup>2</sup>  
Eng. Eliseu Santos Ferreira <sup>2</sup>  
Dra. Roberta Bomfim Boszczowski <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Paraná  
[cnadal@ufpr.br](mailto:cnadal@ufpr.br)  
[faggion@ufpr.br](mailto:faggion@ufpr.br)  
[kngveiga@ufpr.br](mailto:kngveiga@ufpr.br)  
[sfreitas@ufpr.br](mailto:sfreitas@ufpr.br)

<sup>2</sup> Copel – Companhia Paranaense de Energia  
[marcos.asoaes@copel.com](mailto:marcos.asoaes@copel.com)  
[elizeu.sf@copel.com](mailto:elizeu.sf@copel.com)

<sup>3</sup> Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC)  
[roberta.bomfim@lactec.org.br](mailto:roberta.bomfim@lactec.org.br)

**RESUMO:** Neste trabalho serão apresentados os métodos geodésicos utilizados no monitoramento geodésico da Barragem de Salto Caxias pela equipe da UFPR, COPEL, LACTEC nos anos de 2004 e 2005. Os trabalhos terão continuidade nos anos seguintes. Os resultados obtidos até o presente momento, mostraram-se promissores e compatíveis com os obtidos internacionalmente.

**PALAVRAS CHAVES:** geodesia, métodos geodésicos, levantamentos.

**ABSTRACT:** In this work we presented the geodetic methods used in the Salto Caxias's dam monitoring. This work are conducted by team of UFPR, COPEL and LACTEC in the years of 2004 and 2005. The works will be continued in the next years. The results are compatible with another's works in the scientific world, when the methods of observations are compared.

**KEYWORDS:** geodesy, geodetic methods, surveying

## 1. ASCULTAÇÃO GEODÉSICA NA REGIÃO DE GRANDES BARRAGENS

A subsidência, que consiste na deformação ou deslocamento na direção essencialmente vertical descendente, manifestando-se por afundamento do terreno. Este fenômeno pode ocorrer por causas naturais (dissolução de rochas (carstificação) como calcários, dolomitos, gipsita, sal; acomodação de camadas do substrato pelo seu próprio peso ou por pequena movimentação segundo planos de falhas, entre outros) ou pela ação humana (bombeamento de águas subterrâneas e recalques por acréscimo de peso devido a obras e estruturas).

O motivo que levou a equipe de pesquisadores da UFPR, liderada pelo Prof. Camil Gemael, foi a farta literatura a respeito catástrofes relacionadas com a indução de sismisidade com a formação de grandes reservatórios. Nos limitaremos a relembrar o evento mais trágico, ocorrido na Índia, na barragem de Koiana. Região até então considerada assísmica, vários tremores foram registrados na vizinhança 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.

Os primeiros estudos conduzidos no Brasil sobre subsidências pela ação humana ocorrida em função da formação de grandes reservatórios de água foram conduzidos pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), através dos Professores Camil Gemael, Alvaro Doubek e Carlos Aurélio Nadal, em convênio com a Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL), na região da usina hidrelétrica de Foz do Areia, hoje conhecida como Governador Bento Munhoz da Rocha Neto (figura 01).



#### Características Técnicas:

- ✓ **Forma de Construção:**  
Enrrocamento;
- ✓ **Capacidade de Geração:**  
1.676 MW de potência;
- ✓ **Reservatório:**  
Altura Muro 160 m  
Área inundada 139 km<sup>2</sup>  
Volume de água 5,8 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>

FIGURA 01 – USINA HIDRELÉTRICA GOVERNADOR BENTO MUNHOZ DA ROCHA NETO

Os métodos Geodésicos utilizadas foram Nivelamento Geométrico de Primeira Ordem e Gravimetria. Para que os trabalhos fossem realizados, foi necessária a implantação de um conjunto de Referências Nível (RRNN), afastadas de um quilômetro (1km), ao logo das rodovias que se aproximavam do reservatório (margem direita sentido Cruz Machado, margem direita sentido Bituruna), num total de 126,5km nivelados. Associado aos métodos geodésicos foram efetivadas observações sísmicas durante o enchimento e após, não detectando-se nenhum sismo superior a 1 na escala Richter. (Gemael, 1982)

Para a determinação da ocorrência ou não subsidência com a formação do reservatório, determinou-se a variação da altitude e do vetor força de aceleração da gravidade entre as RRNN antes e após a formação do reservatório. Comparando os resultados obtidos com as duas campanhas foi possível avaliar se ocorreu ou não subsidência na região.

Os resultados obtidos com o Nivelamento Geométrico demonstraram claramente que conforme as RRNN se aproximavam do reservatório aumentava a variação na altitude entre elas atingindo dois centímetros (2cm) na RN mais próxima do reservatório. Testes estatísticos aplicados os dados Gravimétricos apresentaram a mesma tendência (GEMAE, 1982, GAGG, 1997).

A seqüência dos estudos ocorreu com a construção da usina de Segredo, também no rio Iguaçu. Nesta, em função da geografia da região, não foi possível implantar RRNN em linhas que se aproximassem do reservatório. A solução encontrada foi a implantação de um conjunto de RRNN, em forma de um anel, com a desvantagem que a RN mais próxima do reservatório está implantada a cinco quilômetros (5 km) do muro que forma o reservatório (figura 02).



FIGURA 02 – USINA HIDRELÉTRICA DE SEGREDO

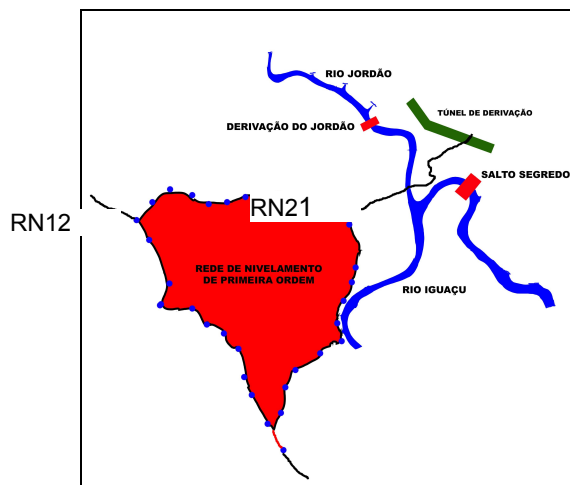


FIGURA 03 - LOCALIZAÇÃO DO ANEL EM SEGREDO

Os resultados obtidos indicaram uma subsidência de 2,3 cm na RN21, Como pode ser visto na figura 03, é uma das RRNN mais próximas do muro que forma o reservatório (GEMAEI; FAGGION, 1996).

Para aumentar a capacidade de geração da usina de segredo, foi construído uma barragem no rio Jordão e através de um túnel de derivação foram ligados os dois reservatórios (figura 04).

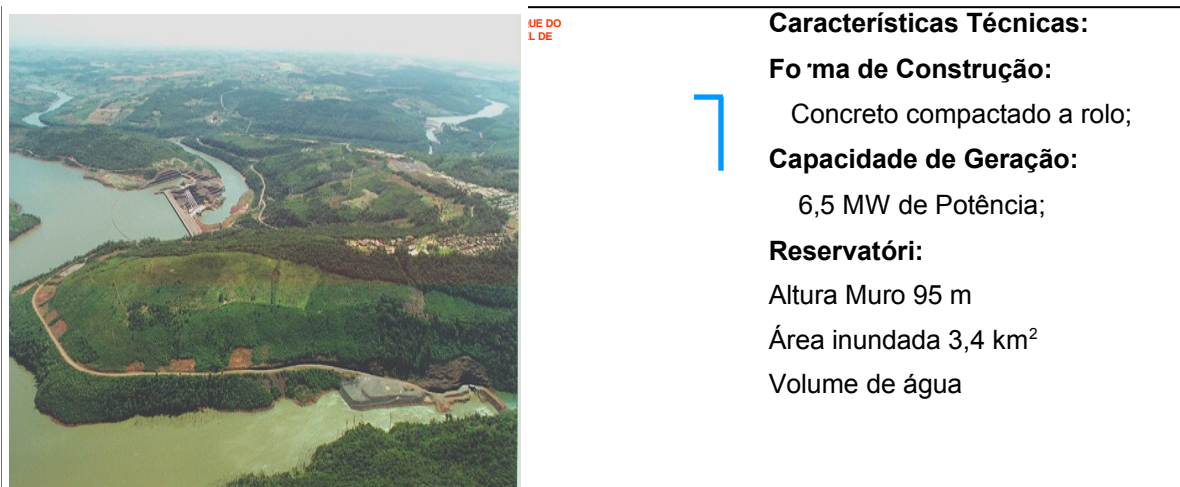


FIGURA 04 – BARRAGEM DE SEGREDO, JORDÃO E TÚNEL DE DERIVAÇÃO

Buscando avaliar se houveram novas subsidências com a construção da barragem do rio Jordão realizou-se um novo nivelamento entre as RRNN 12 e 22 (estas RRNN são as que estão mais próximas do reservatório). O resultado demonstrou que não houve nova subsidência.

Em 1996 iniciaram os estudos no reservatório formado com a construção da usina de Salto Caxias (figura 05), a última usina de grande porte a ser construída no rio Iguaçu. Em função da geografia da região, nesta foi possível implantar linhas de nivelamento na margem direita e esquerda do reservatório (um total de 80km) ao longo da malha viária que cobre a região.



FIGURA 05 – USINA HIDRELÉTRICA DE SALTO CAXIAS

Dois aspectos importantes dos estudos desenvolvidos nesta região, em função da distribuição da malha viária, devem ser destacados:

1. Foi possível juntar as linhas formadas pelas RRNN da margem direita com as da margem esquerda, fazendo com que estas se encontrassem sobre o maciço que forma o muro da barragem. Em função disso está sendo possível avaliar a ocorrência de subsidência nas proximidades do reservatório e também recalque do maciço que forma a barragem de Salto Caxias;
2. As linhas formadas pelas RRNN, se afastam da barragem para uma região sem influência do reservatório e outras linhas deslocam-se paralelo ao reservatório (margem esquerda e direita) para encontrar novamente o reservatório a aproximadamente 10 km da barragem.

Com esta distribuição das RRNN, está sendo possível avaliar a subsidência junto à barragem e a 10 km a montante.

Os resultados preliminares obtidos, com o projeto de ascultação geodésica podem ser vistos no gráfico a seguir.

No Gráfico 01 apresenta-se o resultado da subsidências do maciço que forma a barragem de Salto Caxias quando considerado toda a região em torno do reservatório.

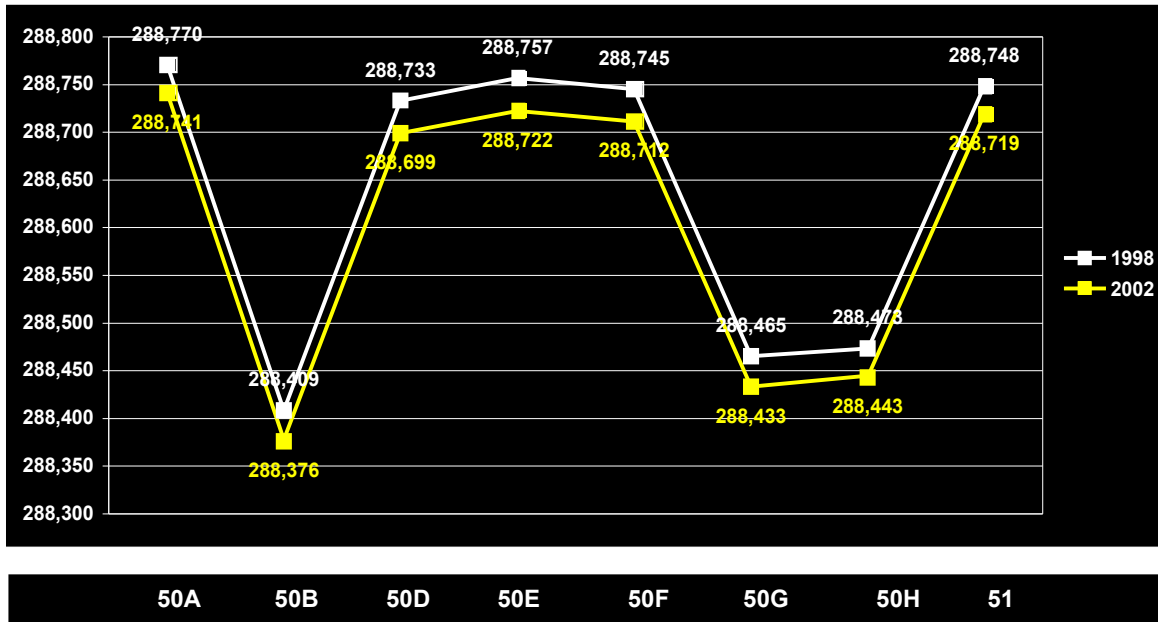


GRÁFICO 01 – SUBSIDÊNCIA NA REGIÃO DA BARRAEM, CONSIDERANDO TODA A REDE GEODÉSICA DE NIVELAMENTO

Analisando-se o gráfico a seguir observa-se que não ocorreu recalque diferencial no maciço que forma a barragem de Salto Caxias. Os desníveis que geraram o gráfico estão na tabela 01.

DESNÍVEIS ENTRE AS REFERÊNCIAS DE NÍVEL ENGASTADAS NA CRISTA DA BARRAGEM

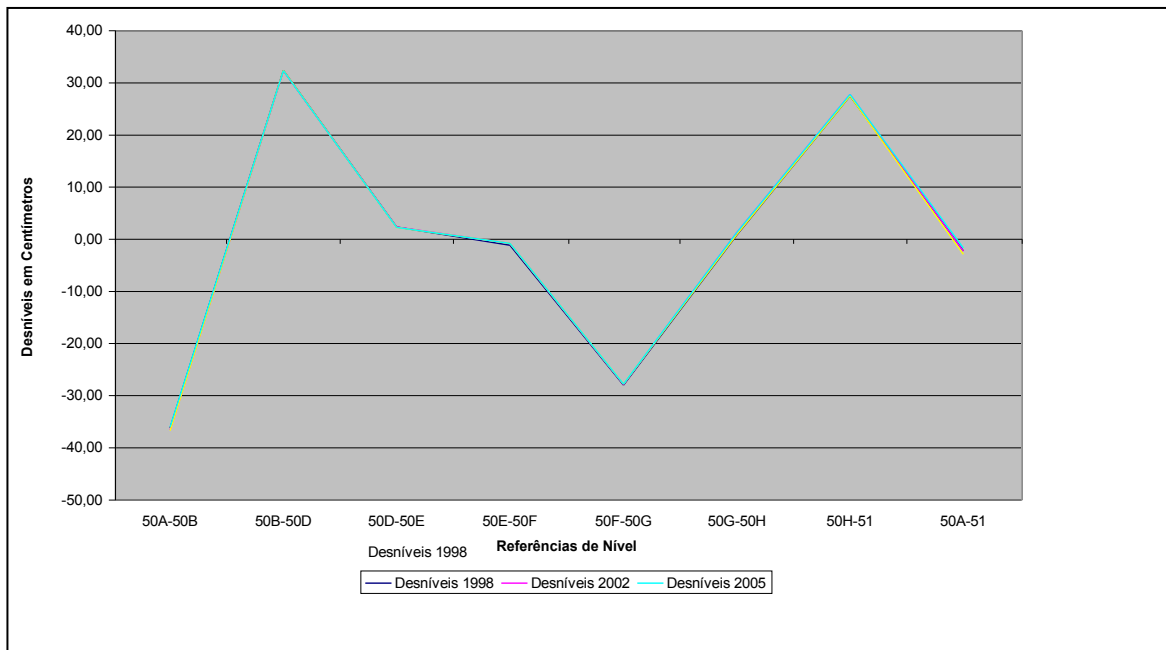


GRÁFICO 02 – DESNÍVEIS ENTRE AS RRNN ENGASTADAS NA CRISTA DA BARRAGEM

Onde as colunas tem o seguinte significado:

98 - 2002 = Os valores desta coluna representam a diferença ocorrida entre o nivelamento conduzido antes do enchimento do reservatório 1998 e o nivelamento conduzido após o enchimento do reservatório

2002;

98 - 2005 = Os valores desta coluna representam a diferença ocorrida entre o nivelamento conduzido antes do enchimento do reservatório 1998 e o nivelamento conduzido após o enchimento do reservatório 2005;

(98-02)-(98-05) = Diferenças encontradas entre as variações dos desníveis entre as duas épocas.

## 2- MONITORAMENTO GEODÉSICO DA USINA DE SALTO CAXIAS

Monitorar um ponto, do ponto de vista do posicionamento geodésico, significa determinar e comparar as coordenadas de um ponto em duas épocas distintas, e verificar se, dentro de um certo nível de confiabilidade (significância), houveram variações significativas nestas coordenadas. O monitoramento pode ser planimétrico quando se avaliam os deslocamentos no plano topográfico, altimétrico quando se avaliam os deslocamentos verticais e tridimensional quando são avaliados de forma global todos os deslocamentos. Desta forma o monitoramento geodésico de uma estrutura envolve a realização de campanhas periódicas de observação dos pontos de interesse. A frequência de observação estabelecida neste projeto tem caráter sazonal e envolve campanhas de observação em meses do verão e do inverno, épocas estas que caracterizam as maiores variações na estrutura em função das variações de temperatura.

A determinação de coordenadas de pontos empregando-se técnicas geodésicas convencionais está fundamentada na medição de grandezas como direções (horizontais e verticais), distâncias e desníveis, a partir das quais, indiretamente é possível computar as coordenadas de um ponto (VEIGA,2005). Para tanto são empregados métodos como poligonação, trilateração e triangulação, nivelamento geométrico e irradiação. Dentro do projeto de monitoramento da Usina de Salto Caxias, os principais instrumentos empregados para a realização das observações são:

- Estação Total TC 2002 (precisão angular de 0,5" e linear de 1mm + 1ppm);
- Estação Total TCRA 1205 (precisão angular de 5" e linear de 2mm+ 2ppm);
- Nível Digital NA (precisão TAL)
- Gravímetro

Cabe salientar que a estação TCRA 1205, adquirida com recursos deste projeto, é um instrumento robotizado, pois permite a busca e realização de pontaria em pontos automaticamente.

Também foram projetados e confeccionados instrumentos específicos para o monitoramento realizado em Salto Caxias, como DCFs (dispositivos de centragem forçada para a execução da poligonação), por exemplo e que serão apresentados posteriormente neste artigo.

O projeto de monitoramento elaborado para a Usina pode então, ser dividido em três componentes principais: a rede de nivelamento geométrico, rede externa e interna de monitoramento.

A rede de nivelamento composta por um conjunto de RRNN implantadas na parte superior da barragem. Esta rede foi inicialmente nivelada antes do enchimento do reservatório. Nos nivelamentos geométricos de alta precisão foi utilizado o Nível Digital NA 3003. Utilizou-se o nivelamento geométrico pelo método das visadas iguais conforme o prescrito na PR22, classificado de científico. O resultado dos nivelamentos efetuados em épocas diferentes permite a determinação de deslocamentos verticais ou subsidências da estrutura.

A rede externa de monitoramento é constituída por pilares de centragem forçada e de pontos de monitoramento fixados na face jusante da barragem. Esta rede denominada de rede fundamental serve de apoio básico para os trabalhos de monitoramento de pontos localizados face externa e interior da barragem (NADAL, 2000). Na escolha da localização dos pontos desta rede buscou-se identificar locais de onde fosse possível realizar as medições, de tal forma que sua geometria apresentasse em pré-análise uma rigidez compatível com trabalhos desta envergadura. A figura 6 apresenta a disposição dos pontos da rede de pilares (GRANEMANN,2005)



FIGURA 06 – DISPOSIÇÃO DOS PONTOS DA REDE EXTERNA DE MONITORAMENTO.

A partir desta rede externa são feitas as observações nos pontos posicionados a jusante da barragem. Estes pontos são materializados através de prisma de precisão que foram fixados de forma permanente na estrutura, que facilitam as medições e evitam problemas e erros oriundos da recolocação dos prismas em diferentes campanhas. Estes pontos são monitorados empregando-se a estação total robotizada (TCRA 1205) que permite a busca e pontaria automática nos prismas, não necessitando desta forma de realizar a pontaria de forma manual.

Os pilares da rede externa foram tiveram as suas altitudes determinadas por nivelamento geométrico.

A rede interna de monitoramento ficou sujeita a conformação específica da Usina de Salto Caxias que apresenta uma característica particular, que são duas galerias de inspeção na barragem (figura 7), com isto optou-se também por realizar o monitoramento de pontos internamente a barragem. Para que isto fosse possível, foi necessário planejar e conduzir uma poligonal, apoiada em pontos da rede externa, para a determinação das coordenadas dos pontos.

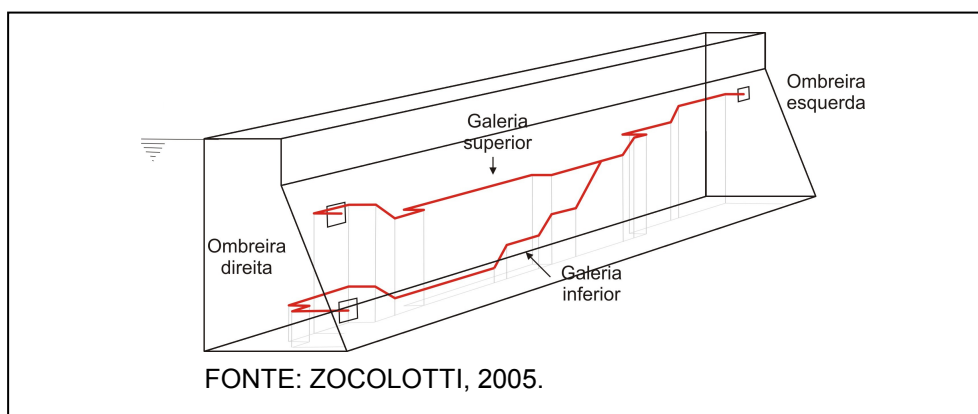


FIGURA 7 – ESQUEMA DA GALERIA DE INSPEÇÃO.

Para materialização dos pontos da poligonal optou-se pelo uso de um instrumento denominado DCF (dispositivo de centragem forçada). Este dispositivo é composto de duas partes, uma fixa nas paredes da galeria, composto de uma chapa de aço com parafusos de espera e outra, onde é estacionado o instrumento, que é atarraxada à parte fixa. A figura 8 apresenta o DCF.

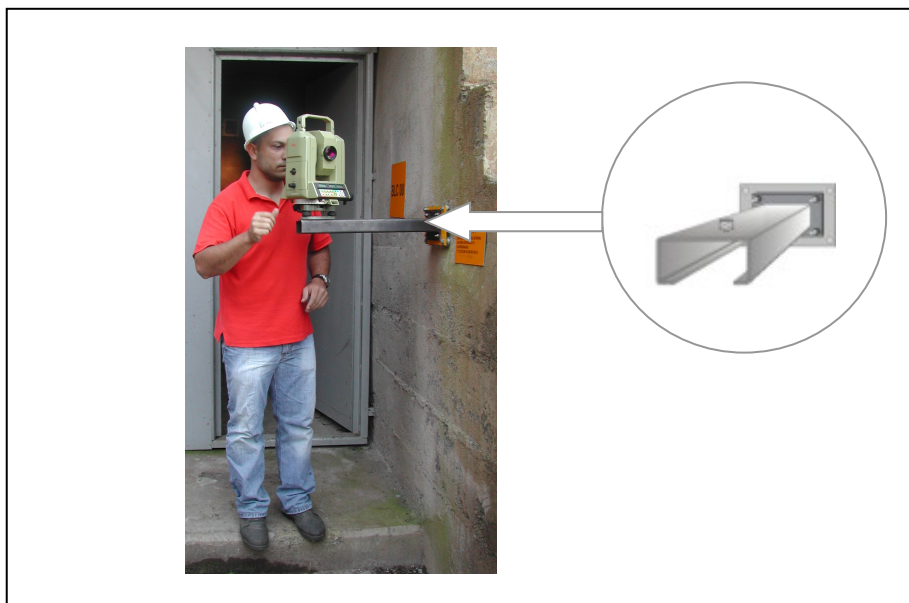


FIGURA 8 – DISPOSITIVO DE CENTRAGEM FORÇADA.

A idéia de utilizar um sistema de centragem forçada não fixo nas paredes das galerias foi reduzir custos evitar transtornos na execução dos trabalhos cotidianos de inspeção realizados pela companhia mantenedora da Usina. Os dispositivos permitem a centragem forçada do instrumento e alvos durante as observações dos pontos de monitoramento. As posições dos pontos de monitoramento foram determinadas de acordo com as feições a serem monitoradas, como junção de blocos.

O comprimento da poligonal superior é da ordem de 1.000m e o número de pontos monitorados é superior a 100. Similarmente, a poligonal inferior tem números muito próximos a anterior.

Dentro das galerias, a distribuição de pontos nas junções de blocos e fissuras foi realizada de forma que estes elementos estivessem distribuídos dois a montante e dois jusante na junção de blocos da barragem.

### 3. SITUAÇÃO ATUAL DO PROJETO.

Executados os planejamentos iniciais e materializadas as redes de nivelamento já foi possível realizar as primeiras campanhas de monitoramento. Uma primeira campanha completa, com observação das redes internas e externas, inclusive dos pontos de monitoramento foi realizada no mês de julho de 2005 e maio de 2006. Atualmente estão sendo estudadas as técnicas para ajustamento dos dados e testes estatísticos a serem aplicados na etapa de comparação dos dados entre duas campanhas de monitoramento. Como resultados do projeto até agora, além do monitoramento propriamente dito, já foram elaboradas três dissertações de mestrado no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, dois projetos finais do Curso de Engenharia Cartográfica da UFPR, sete artigos em congressos e uma reportagem de 15 minutos no canal de televisão da UFPR.

### 3 REFERÊNCIAS

**GEMAEL, C; DOUBEK, A.** Auscultação Geodésica da Região da Barragem Bento Munhoz da Rocha. Boletim da UFPR nº 28, 1982.

**GAGG, G.** Auscultação gravimétrica na Região da Barragem Bento Munhoz da Rocha. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. UFPR, 1997.

**DEPARTMENT OF ARMY – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS.** Manual 1110-1-1004 Deformation Monitoring and Control Surveying. Washington, DC, 1994.

**GRANEMANN, D. C.** Estabelecimento de uma rede Geodésica para o Monitoramento de estruturas: estudo de caso na Usina Hidrelétrica Salto Caxias. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 107p, Curitiba, 2005.

**MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL.** Manual de Segurança e Inspeção de Barragens. Brasília, 2002. 148p.

**NADAL, C. A.** Método da Interseção Óptica Tridimensional Aplicado à Engenharia de Precisão. (Tese de Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

**VEIGA, L.A.K.; ZANETTI, M. A. Z.; FAGGION, P. L.;** Apostila de Topografia – Módulo I. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática. Curitiba, 2005, 186p.

**ZOCOLLOTTI C A.** Utilização de Poligonais de Precisão para o Monitoramento de Pontos e Integração da Instrumentação de Controle Localizados nas Galerias de Inspeção da Usina Hidroelétrica de Salto Caxias. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 107p, Curitiba, 2005.

### **AGRADECIMENTOS**

Este projeto é uma parceria entre a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), COPEL (Companhia Paranaense de Energia Elétrica), UFPR (Universidade Federal do Paraná, através do Departamento de Geomática) e o LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento).