

INTEGRAÇÃO DA AUSCULTAÇÃO GEODÉSICA COM A INSTRUMENTAÇÃO DE CONTROLE E SEGURANÇA DA BARRAGEM DE SALTO CAXIAS

Pedro Luis Faggion¹
Luis Augusto Koenig Veiga¹
Carlos Aurélio Nadal¹
Silvio Rogério Correia de Freitas¹
Marcos Alberto Soares²
Eliseu Santos Ferreira²

¹ Universidade Federal do Paraná – UFPR –Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - Departamento de Geomática, faggion@ufpr.br, kngveiga@ufpr.br, cnadal@ufpr.br, sfreitas@ufpr.br
² Companhia Paranaense de Energia -COPEL- marcos.asoaes@copel.com , Elizeu.sf@copel.com

RESUMO

Auscultação geodésica consiste na obtenção de coordenadas cartesianas geodésicas de pontos topográficos através de técnicas de levantamentos Geodésicos, tais como: nivelamento geométrico de primeira ordem, levantamento gravimétrico, posicionamento com GPS, triangulações e trilaterações no monitoramento de determinados fenômenos. Este trabalho busca integrar a Auscultação Geodésica com a instrumentação de segurança utilizada para o controle de possíveis deslocamentos dos blocos de concreto que formam a barragem da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, no Paraná. Esta integração tem a finalidade de fornecer subsídios os técnicos responsáveis pela manutenção para definir deslocamentos absolutos dos blocos uma vez que a instrumentação só fornece variações relativas. Esta integração é obtida com a utilização de uma rede de monitoramento a jusante do reservatório, formada por seis pilares de concreto engastados na rocha, e dotada de sistema de centragem forçada. Esta rede servirá para realizar o monitoramento externo do muro que forma a barragem e também para apoiar uma poligonal geodésica de alta precisão que será conduzida no interior das galerias da mesma, objetivando a integração da instrumentação de segurança, a qual consiste na transformação de deslocamentos relativos medidos em deslocamentos absolutos relacionados ao sistema de coordenada geodésica utilizado no levantamento.

Palavras-chave: Auscultação Geodésica, Instrumentação de Barragens, Levantamentos Geodésia.

INTEGRATION OF THE GEODETIC AUSCULTATION WITH THE SALTO CAXIAS DAM SECURITY INSTRUMENTATION

Geodetic Auscultation is used to obtain geodetic cartesian coordinates of points through techniques of Geodetic surveying, such as: first order leveling, gravimetric surveying, GPS, triangulation and trilateration applied in the monitoring. The aim of this work is to integrate the Geodetic Auscultation with security instrumentation used to control displacements of the concrete blocks that form the dam of Salto Caxias hydroelectric power station, in Paraná. This integration has the purpose of supplying information for the technicians and define absolute displacements of the blocks, once the security instrumentation gives only relative informations. This integration is obtained with the use of a monitoring network, composed by six concrete pillars anchored in the rock, and with a system of forced centering. This network will be used to monitor the external face of the dam and also as a support for a traverse that will be done inside the galleries of the dam. This traverse will be used for the integration of the security instrumentation, that consist in the transformation of relative displacements in absolute ones associated with the geodetic coordinate system used in the surveying.

Keywords: Geodetic Auscultation, Dam Instrumentation, Geodetic Surveying, Dam monitoring.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (2002), as barragens são obras geralmente associadas a um elevado potencial de risco devido à possibilidade um eventual colapso, com conseqüências catastróficas para as estruturas das próprias barragens, ao meio ambiente, com

destruição da fauna e flora, e, principalmente, pela perda de vidas humanas. Desta forma, o monitoramento destas estruturas se reveste de especial importância.

Em face da importância do assunto, diversos trabalhos têm sido publicados sobre a utilização da Geodésia para fins de monitoramento de grandes estruturas. O Departamento de Geomática vem realizando há alguns anos trabalhos voltados à auscultação geodésica, com destaque para a auscultação Geodésica voltada para a determinação de variações da crosta terrestre na região da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias-PR, com a formação do reservatório da mesma. Para tanto, foram implantadas 84 RRNN na malha viária em torno do reservatório. Utilizou-se o método do nivelamento geométrico de primeira ordem associado a medidas gravimétricas, como resultado obteve-se o desnível entre as RRNN, com precisão de $1\text{mm}\cdot\text{k}^{1/2}$ (k =média da distância nivelada e contra nivelada) e também a variação da gravidade. As duas técnicas foram aplicadas antes e após a formação do reservatório, comparado-se e interpretando-se os resultados.

Dando continuidade a esta pesquisa, este trabalho visa a integração da Auscultação Geodésica com a instrumentação de controle e segurança da Barragem de Salto Caxias, paltado no desenvolvimento de procedimentos, metodologias e redes complementares, objetivando a associação das séries históricas de observações geodésicas, novos dados da instrumentação de monitoramento e controle, atualmente em operação e levantamentos complementares. Com base nestas informações será possível realizar uma análise global dos deslocamentos observados, tendo em vista a segurança da barragem.

2. USINA HIDRELÉTRICA DE SALTO CAXIAS

A Usina Salto Caxias está situada no Rio Iguçu, no município de Capitão Leônidas Marques, próximo a Cascavel no oeste do estado do Paraná (figura 1).



Figura 1 – Localização da Usina de Salto Caxias.

A construção das obras civis foi iniciada em janeiro de 1995, sendo que a produção comercial da primeira unidade geradora ocorreu em 18 de fevereiro de 1999 (COPEL, s.d.). De acordo com COPEL (s.d.) a usina possui uma capacidade instalada de 1240 MW de potência, em quatro unidades instaladas, apresenta 67 m de altura e 1083 m de comprimento, é do tipo gravidade em CCR (concreto compactado a rolo). O vertedouro sobre a barragem abriga 14 comportas com capacidade máxima e descarga para 49.600 metros cúbicos de água por segundo.

A usina hidroelétrica de Salto Caxias faz parte do complexo de usinas construídas no Rio Iguçu, conforme ilustra a figura 2, sendo a ITAIPÚ instalada no Rio Paraná.

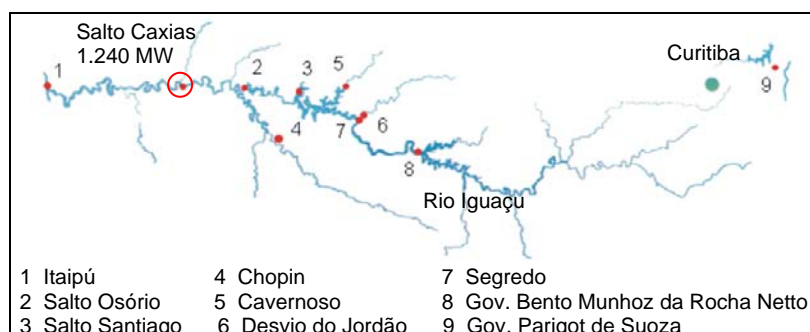


Figura 2 – Complexo de Usinas do Rio Iguçu. Adaptado de COPEL (s.d.).

3. MONITORAMENTO GEODÉSICO

Segundo TESKEY; PORTER (1988) apud CHAVES (1994, p.35), as deformações de estruturas de engenharia podem ser determinadas pelos seguintes métodos:

- métodos de levantamentos;
- métodos geotécnicos e;
- métodos estruturais;

KUANG (1984) apud CHAVES (1994, p.38) classifica os métodos de monitoramento em duas categorias, os métodos geodésicos e os métodos não geodésicos, sendo que os métodos geodésicos compreendem os métodos geodésicos terrestres, métodos fotogramétricos e técnicas espaciais. Ainda segundo o autor, os métodos não geodésicos abrangem os métodos geotécnicos e projetos especializados.

KAHMEN; FAIG (1994, p.565) dizem que métodos físicos e geodésicos podem ser usados para estudar deformações. Os métodos físicos são utilizados primeiramente para detectar movimentos relativos. Entre os equipamentos empregados pode-se destacar os pêndulos, extensômetros, etc. Métodos geodésicos são primeiramente utilizados para detectar movimentos absolutos. Da mesma forma, DEPARTMENT OF ARMY (1994) enfatiza que os levantamentos geodésicos têm sido utilizados tradicionalmente principalmente para a determinação de deslocamentos absolutos de pontos selecionados sobre a superfície do objeto com respeito a alguns pontos de referência considerados estáveis.

As técnicas de mensuração geodésicas visam determinar se um ponto ou conjunto destes, sofre variação em suas coordenadas ao longo do tempo, ou seja, se houve algum deslocamento dos mesmos. As medidas com a finalidade de monitoramento devem ser feitas tanto verticalmente como horizontalmente, com o objetivo de determinar as coordenadas tridimensionais dos pontos.

Cada tipo de levantamento apresenta suas vantagens e desvantagens. De acordo com DEPARTMENT OF ARMY (1994, p.9-9), levantamentos geodésicos, utilizando uma rede de pontos interconectados por ângulos e ou medidas de distância, usualmente proporcionam suficiente redundância de observações para análises estatísticas de qualidade e detecção de erros. Ainda segundo o autor, esta técnica proporciona informações globais sobre o comportamento do objeto deformável, enquanto as medições geotécnicas proporcionam informações localizadas e, muito freqüentemente, informações locais sem qualquer verificação a não ser a comparação com outras medidas independentes.

Em contrapartida, DEPARTMENT OF ARMY (1994, p.9.9) diz que instrumentos geotécnicos são mais fáceis de uma adaptação para fins de automação e monitoramento contínuo, já os levantamentos Geodésicos terrestres convencionais são mais trabalhosos e requerem operadores treinados.

CHAVES (1994, p.53) destaca algumas vantagens dos métodos geodésicos:

- a) fornecem o estado global de um corpo deformável;
- b) contém o esquema próprio de verificar os resultados e são capazes de avaliar a exatidão da medição globalmente;
- c) fornecem versatilidade e adequabilidade para qualquer meio-ambiente e situação de operação.

Em contrapartida o autor apresenta o que chama de alguns obstáculos: a complexidade de medição requer a presença de muitos operadores durante vários dias, é muito difícil e caro adotar métodos geodésicos para monitoramento contínuo.

Algumas técnicas de levantamentos geodésicos utilizados para fins de monitoramento são: triangulação geodésica, poligonação, nivelamento geométrico de precisão e determinação de coordenadas utilizando o GPS (*Global Positioning System*). Em trabalhos de monitoramento de grandes estruturas é comum associar estas diferentes técnicas, como o posicionamento por GPS para a determinação das coordenadas planas dos pontos e o nivelamento geométrico de precisão para o controle altimétrico.

Adicionalmente, HECK (1984) apud CHAVES (1994, p.54) diz que o método geodésico é caracterizado por observações diretas de distâncias, ângulos, diferenças de altitude, direções verticais e horizontais, através do uso de teodolitos, níveis, medidores eletrônicos de distância, taqueômetros eletrônicos, miras invar, etc.

No desenvolvimento da primeira etapa deste projeto, as técnicas geodésicas aplicadas na Auscultação Geodésica foram:

- Nivelamento Geométrico – Método das visadas iguais
- Levantamento Gravimétrico

Não cabe descrever aqui os procedimentos de coleta e tratamento dos dados obtidos com as metodologias descritas, pois se tratam de procedimentos geodésicos amplamente discutidos pela literatura especializada. Porém cabe ressaltar que a materialização das RRNN e os procedimentos de campo para a coleta dos dados seguiram a metodologia descrita por MEDEIROS (1998). Tais procedimentos permitiram que os desníveis fossem obtidos com erros inferiores a $1\text{mm}\cdot k^{1/2}$ (k =média da distância nivelada e contra-nivelada).

4. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O projeto de auscultação geodésica da barragem de Salto Caxias está fundamentado em duas redes de monitoramento: uma externa e outra interna. A rede externa será utilizada para o monitoramento dos pontos localizados na face voltada a jusante da barragem, sendo que seus pontos também serão utilizados como pontos de partida para a rede interna de monitoramento.

A rede interna, constituída de uma poligonal topográfica de alta precisão apoiada nos pontos da rede externa, tem como objetivo realizar o monitoramento dos pontos, localizados dentro das duas galerias da barragem, e para a integração dos equipamentos de segurança como extensômetros, pêndulos, medidores de vazão e outros.

As atividades envolvidas para a definição da rede externa consistem, de forma geral, em:

- Definição da posição dos pontos da rede;
- Projeto dos pontos e construção dos pilares de monitoramento;
- Levantamento geodésico da rede;
- Ajustamento e análise dos dados;
- Controle externo da rede;
- Definição dos pontos a serem monitorados na face voltada a jusante da barragem;
- Materialização dos pontos;
- Levantamento dos pontos;
- Ajustamento e análise dos dados.

Para a análise de possíveis deslocamentos de pontos com o tempo é necessário realizar-se as observações em duas épocas distintas e comparar os resultados. Para tanto é necessário garantir que o as mesmas condições ou procedimentos realizados na primeira campanha sejam repetidos para a segunda. Não menos importante é verificar a estabilidade dos pontos de referência. Finalmente, após os dados coletados e ajustados, há a necessidade de verificar se as diferenças entre as coordenadas de um mesmo ponto para duas épocas distintas são estatisticamente significativas, o que efetivamente caracterizará um deslocamento do ponto. As atividades envolvidas na rede interna são listadas a seguir:

- Definição dos pontos a serem monitorados (pontos na estrutura e equipamentos de segurança);
- Levantamento tridimensional das galerias, com a determinação da posição dos pontos a serem monitorados;
- Planejamento das estações da poligonal geodésica;
- Materialização dos pontos de monitoramento;
- Materialização das estações da poligonal (pontos de referência);
- Procedimentos para a observação dos equipamentos de segurança (transformação de observações relativas em absolutas);
- Levantamento geodésico da poligonal;
- Ajustamento e análise dos dados;
- Levantamento dos pontos a serem monitorados;
- Ajustamento de Análise dos dados.

4.1. IMPLANTAÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO A JUSANTE DA BARRAGEM

Inicialmente foram definidas as posições dos pontos que formam a rede externa de monitoramento. Procurou-se definir locais estáveis, de fácil acesso e que permitissem posteriormente o levantamento dos pontos localizados na face à jusante da barragem. A figura 3 ilustra a rede implantada. Todos os ângulos e distâncias entre os pontos foram medidos empregando-se uma estação total Wild TC2002, com precisão linear de $\pm (1\text{mm} + 1\text{ppm})$ e angular de $\pm 0,5''$.



Figura 3 - Rede de pontos - Triangulação.

Os pontos que formam a rede de monitoramento devem ser estáveis, uma vez que o monitoramento dos demais pontos será efetuado a partir destes. Para garantir a estabilidade dos pontos os mesmos foram construídos em concreto e engastados na rocha, conforme modelo apresentado na figura 4. A figura 5 ilustra a perfuração para a construção da fundação de um dos pontos e um dos pilares construído.

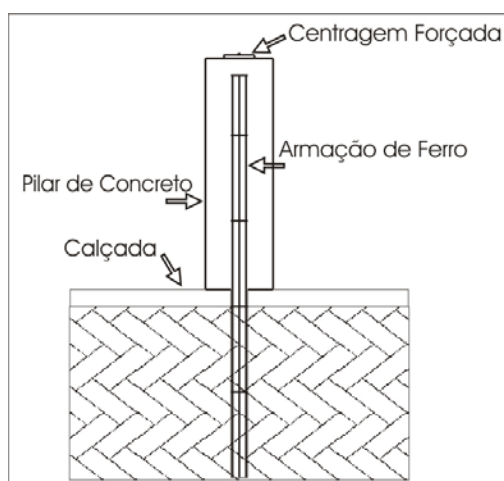


Figura 4 – Projeto de Pilar da Rede de Monitoramento



Figura 5 - Construção da fundação de um dos pontos e pilar finalizado.

4.1.1. Determinação das coordenadas dos alvos engastados na barragem

A determinação das coordenadas dos pontos a serem monitorados será realizada através de irradiação. Um ângulo em relação a uma direção conhecida, um ângulo vertical e a distância entre o ponto de apoio e o ponto observado, são determinados para cada ponto, trabalhando num esquema de coordenadas polares. A figura 6 apresenta um esquema de como serão realizadas as observações, utilizando medidores eletrônicos de distância que funcionam com laser, que não necessitam de prisma refletor, para distâncias de até 600m, dependendo do equipamento, ou os medidores tradicionais, neste caso dispondo-se de refletores posicionados na estrutura a ser monitorada.



Figura 6 – Levantamento por irradiação - representação das Visadas a partir do Pilar 1 e 3

Os pontos externos que serão monitorados foram definidos pelos profissionais responsáveis pela segurança da usina. Uma vez definidos, fixou-se na estrutura uma série de dispositivos de centragem forçada para alvos DCFA, nos quais serão posicionados os refletores.

4.1.2. Monitoramento da rede externa

A rede de monitoramento estabelecida foi ligada a rede geodésica de referência do Estado do Paraná, marco situado na cidade de Francisco Beltrão. O objetivo desta etapa é avaliar possíveis deslocamentos da mesma. Para tanto foram utilizados três rastreadores GPS, realizando-se o rastreamento simultâneo dos pontos P1 e P3 da rede de monitoramento em Salto Caxias e o marco da rede paranaense durante 4 horas seguidas com taxa de gravação de 15 segundos. A figura a seguir representa a linha base utilizada.

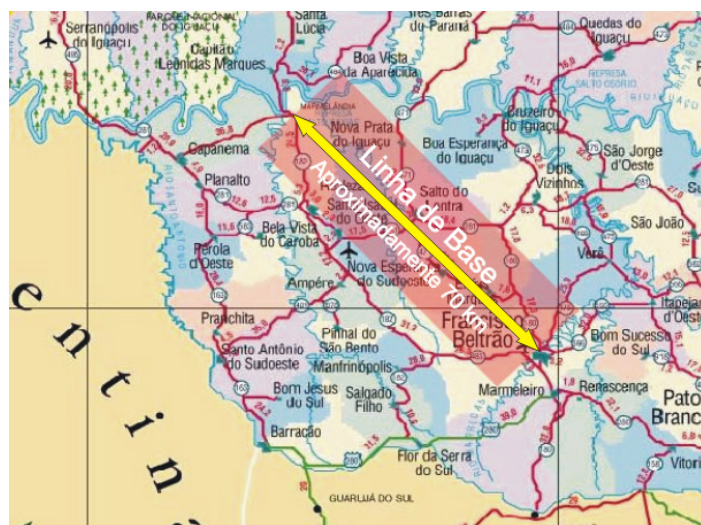


Figura 9 – Linha de base entre o ponto de referência e a rede geodésica de monitoramento.

O projeto encontra-se na fase de processamento dos dados da rede externa e será realizada ainda este ano a primeira campanha de monitoramento dos pontos situados na face jusante da barragem.

4.2. REDE INTERNA DE MONITORAMENTO

A primeira etapa relacionada com a rede interna de monitoramento foi a realização de um levantamento topográfico tridimensional das duas galerias existentes na Usina de Salto Caxias (figura10). Neste levantamento, além da própria geometria da galeria, foram determinadas as posições de todos os pontos e instrumentos que serão monitorados. Para este levantamento foi utilizado uma estação total Trimble, modelo 3305, que permite a medição de distância empregando-se laser, sem a necessidade da utilização de prismas refletivos.

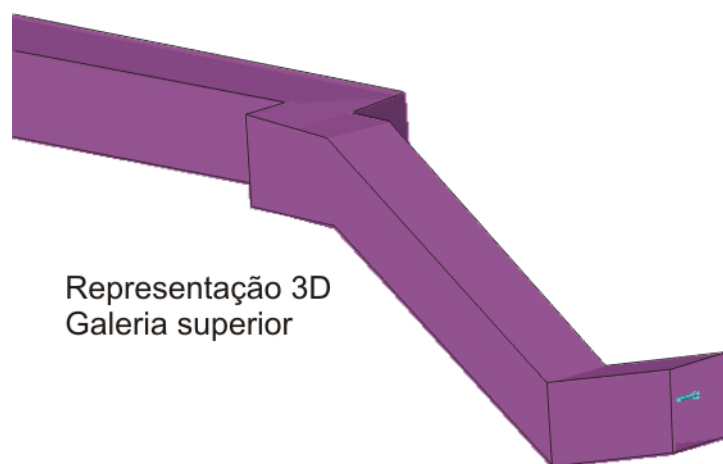


Figura 10 – Levantamento tridimensional das galerias.

O monitoramento será realizado a partir de uma poligonal geodésica de precisão que estará apoiada nos pontos da rede externa. Esta poligonal será dividida em duas, uma da galeria superior e outra da galeria inferior. O levantamento desta poligonal será realizado empregando-se o mesmo equipamento utilizado na medição da rede externa, TC 2002, tendo em vista a precisão do instrumento.

Os pontos desta poligonal serão materializados através de sistemas de fixação colocados na parede da galeria, especialmente desenvolvidos pela equipe do projeto.

Uma vez definidos os pontos das poligonais, será realizada a integração dos instrumentos de segurança da usina (extensômetros, pêndulos e medidores de vasão) ao monitoramento geodésico, a partir da observação (medição) de pontos fixados nos redores deste, obtendo-se suas coordenadas. Os procedimentos para esta integração estão sendo elaborados na atual fase do projeto.

5. CONCLUSÕES

O monitoramento de grandes estruturas é fundamental para a segurança das mesmas e as técnicas geodésicas vêm a proporcionar informações adicionais aos responsáveis por esta área. Com este trabalho pretende-se disponibilizar aos técnicos da Usina, informações relacionadas a um conjunto de pontos para os quais serão conhecidas as coordenadas em diferentes épocas do ano, possibilitando analisar possíveis deslocamentos, de forma global, uma vez que os pontos externos e internos terão suas coordenadas referidas a um único sistema de referência.

6. 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) e o LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAVES, J. C. **Controle de Deformações em Barragens: Métodos de Monitoramento e Viabilidade de Utilização do GPS**. São Paulo. 1994. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

COPEL Companhia Paranaense de Energia. Geração – Usinas Hidroelétricas. Disponível em: <<<http://www.copel.com/PagCopel.nsf/13feda93e8fed9203256a77005d0926/be9d34467aaf883403256b760042e91f?OpenDocument>>> Acesso em: 09 fev. 2004.

COPEL. Usina Hidroelétrica de Salto Caxias, Copel Geração - Energia pra o terceiro milênio. s.d. Publicidade.

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

KAHMEN, H.; FAIG, W. S. **Surveying**. Berlim; New York: Walter de Gruyter, 1988.

LEICA. **User Manual Wild TC2002**. Heerbrugg, 1994.

MEDEIROS, Z. F. **Considerações sobre a metodologia de levantamentos altimétricos de alta precisão e propostas para a sua implantação**. Curitiba, 1999. 142f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

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