

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MATHEUS RICARDO FIORETTO

**MONITORAMENTO NA GALERIA DA BARRAGEM DA UHE SALTO
CAXIAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2021

MATHEUS RICARDO FIORETTO

**MONITORAMENTO NA GALERIA DA BARRAGEM DA UHE SALTO
CAXIAS**

Monitoring in Salto Caxias HPP dam gallery

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Me. Silvana da Silva
Coorientador: Prof. Me. Andreas Jerke

TOLEDO

2021



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 269

Monitoramento na galeria da barragem da UHE Salto Caxias

por

Matheus Ricardo Fioretto

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 17:30 h do dia **06 de Maio de 2021** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof Me. Calil Abumanssur
(UTFPR – TD)

Prof Me. José Gustavo Ramos
(UTFPR – TD)

Profª Me. Silvana da Silva
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr Gustavo Savaris
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me guiar e permanecer sempre ao meu lado, mesmo nos momentos mais difíceis da minha trajetória sempre me deu forças.

À minha família, Sérgio e Jalusa, me deram o dom da vida, me protegeram, me educaram e sempre acreditaram em mim independente de qualquer desafio. Sempre batalharam para que eu tivesse todas as condições para concluir minha graduação. Obrigado, eu amo vocês demais!

Ao meu irmão, Gabriel, que por mais que tivesse a distância, sempre foi a pessoa que me fez seguir firme diante as adversidades para me tornar um exemplo que ele pudesse visualizar.

Às minhas avós, Carmen e Dirce, por serem minhas segundas mães, sempre ao meu lado e me dando tudo que podiam desde que eu nasci.

À minha namorada, Karen Imperator, por estar ao meu lado nos momentos delicados quando não tinha minha família perto, por ser um ponto de equilíbrio e sempre falar o que era preciso nos momentos que eu duvidava de mim mesmo.

Ao meu coorientador, Prof. Me. Andreas Jerke, e minha orientadora, Prof. Me. Silvana da Silva pela confiança, apoio e orientação.

À Delta Empresa Júnior de Engenharia Civil, por ser meu norte durante o curso e realmente entender toda a importância que a prática tem na vida de um estudante de Engenharia Civil.

Aos meus irmãos, da universidade e da vida, pelo apoio, colaboração e todos os momentos que passamos. Obrigado por tudo!

RESUMO

FIORETTO, Matheus Ricardo. **Monitoramento na galeria da barragem da UHE Salto Caxias**. 2021. 50p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2021.

A importância das barragens para a humanidade vem desde os primórdios quando havia falta de água em tempos de seca e assim a necessidade de armazenamento em tempos de cheia aumentava. Com o passar do tempo, os métodos construtivos de barragens foram se aperfeiçoando, alcançando maiores volumes de represa e em contrapartida, aumentando os riscos em caso de ruptura. Desta forma, pela importância e magnitude, o monitoramento dessas estruturas se torna essencial para que a saúde e estabilidade da barragem não sofram alterações e conseqüentemente ocorra desastres com perda de vidas humanas e destruição de todo um ecossistema, como em casos recentes no Brasil. A fim de avaliar o deslocamento da barragem em estudo foram realizados dois tipos de monitoramento em duas campanhas de medições, sendo o monitoramento relativo para abertura de fissuras no corpo da barragem com auxílio dos medidores triortogonais de junta já presentes no local, e o absoluto a partir do método da poligonação, realizando o caminhamento dentro da galeria de inspeção da barragem, gerando uma análise global da estrutura. Tanto no monitoramento relativo quanto no absoluto, atestou-se um deslocamento mínimo na estrutura, podendo ser confundido com um erro de medição ou de aferição no aparelho, visto que para o monitoramento relativo observou-se um deslocamento máximo de 0,12 mm em um prazo de 6 meses, diferença pequena se comparada ao tempo recomendado de medição a cada 15 dias. Já no monitoramento absoluto, o deslocamento máximo encontrado foi de 2,00 mm e a média de deslocamento dos pontos medidos foi de 0 mm para direção X e 1,00 mm para direção Y, atestando para a estabilidade da estrutura já que a tolerância máxima recomendada para tais estruturas é de 10 e 15 mm respectivamente.

Palavras-chave: Monitoramento de Barragem. Fissura. Deslocamentos. UHE Salto Caxias.

ABSTRACT

FIORETTO, Matheus Ricardo. **Monitoring in Salto Caxias HPP dam gallery.** 2021. 50 p. Final paper (Bachelor of Civil Engineering) - Federal University of Technology – Paraná. Toledo. 2021.

The importance of dams for mankind goes back to the early days when there was a lack of water in times of drought and thus the need for storage in times of flooding increased. Over time, the construction methods of dams have been improved, reaching larger volumes of dams and, on the other hand, increasing the risks in case of rupture. Thus, due to its importance and magnitude, the monitoring of these structures becomes essential so that the health and stability of the dam are not altered and, consequently, disasters occur with loss of human lives and destruction of an entire ecosystem, as in recent cases in Brazil. In order to evaluate the displacement of the dam under study, two types of monitoring were carried out in two measurement campaigns, being the relative monitoring for opening cracks in the dam body with the aid of tri-axial joint gauges already present on site, and the absolute monitoring from the polygonal method, performing the walk inside the dam's inspection gallery, generating a global analysis of the structure. Both in relative and absolute monitoring, a minimum displacement in the structure was attested, which could be confused with a measurement or calibration error in the device, since for the relative monitoring a maximum displacement of 0.12 mm was observed within 6 months, a small difference compared to the recommended time of measurement every 15 days. As for the absolute monitoring, the maximum displacement found was 2.00 mm and the average displacement of the points measured was 0 mm for direction X and 1.00 mm for direction Y, attesting to the stability of the structure since the maximum tolerance recommended for such structures are 10 and 15 mm respectively.

Keywords: Dam monitoring. Fissure. Displacement. Salto Caxias HPP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consequências do Rompimento da Barragem de Mariana	11
Figura 2 – Consequências do Rompimento da Barragem de Brumadinho	12
Figura 3 - Desastre Barragem de Apertadinho	12
Figura 4 - Exemplo de Construção de Barragem em CCR	16
Figura 5 - Medidor Triortogonal	21
Figura 6 - Relógio comparador aferindo deslocamento no MTJ	22
Figura 7 - Erro de fechamento angular para ângulos externos	26
Figura 8 - Esquema de cálculo das coordenadas	27
Figura 9 - Localização da barragem em relação a outras UHEs do Paraná	28
Figura 10 - Rede Geodésica de monitoramento e pilares de referência	29
Figura 11 - Ilustração das galerias de inspeção da barragem	30
Figura 12 - Relógio Comparador	31
Figura 13 - Estação Total LEICA TC 407	31
Figura 14 - Prisma Circular GPR 111	32
Figura 15 - Relógio comparador acoplado ao MTJ	33
Figura 16 - Relógio comparador efetuando medições nas 3 extremidades do MTJ ..	33
Figura 17 - Configuração da rede de monitoramento em planta	34
Figura 18 - Dispositivo de centragem de força fixo na parede	34
Figura 19 - Procedimento para caminhamento com Estação Total	35
Figura 20 - Levantamento de medições	35
Figura 21 - Agrupamento de MGI dentro do corpo da Barragem	36
Figura 22 - Realização de aferição em MGIs agrupados	36
Figura 23 - Água vertendo pela fissura dentro da galeria da Barragem	38
Figura 24 - Diferenças entre campanhas	43

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ATR	Reconhecimento Automático de Alvos
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CCV	Concreto Convencional
CIGB	Comissão Internacional de Grandes Barragens
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DFC	Dispositivos de Centragem de Força
GNSS	Ingl. Global Navigation Satellite Systems
GPS	Ingl. Global Positioning System
MSIB	Manual de Segurança e Inspeção de Barragens
MTJ	Medidor Triortogonal de Junta
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
SNISB	Sistema Nacional de Informações de Segurança de Barragens
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVO GERAL	10
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.3 JUSTIFICATIVA	10
1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 BARRAGEM.....	15
2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS	17
2.3 MONITORAMENTO	19
2.3.1 Monitoramento Relativo.....	20
2.3.2 Monitoramento Absoluto.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	28
3.1.1 Rede de Apoio da UHE Salto Caxias	29
3.2 MATERIAIS.....	31
3.2.1 Relógio Comparador	31
3.2.2 Estação Total LEICA TC 407	31
3.3 DESLOCAMENTO RELATIVO.....	32
3.4 DESLOCAMENTO ABSOLUTO	33
4. RESULTADOS e DISCUSSÕES	37
4.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA DESLOCAMENTO RELATIVO.....	37
4.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA DESLOCAMENTO ABSOLUTO.....	39
5. CONCLUSÕES	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1. INTRODUÇÃO

As barragens têm servido como fonte de água para a vida das pessoas ao longo dos últimos cinco mil anos, pois permitem que as populações coletem e armazenem água em épocas de cheia e depois a usem nas épocas de seca. Elas têm sido então fundamentais para a formação de estoques de água, formação do desnível necessário para a geração da energia, captação da água em volume adequado e regularização da vazão do rio em períodos de chuva ou de estiagem (CBDB, 2001).

Para as barragens, estas devem estar sujeitas a um constante monitoramento para se evitar desastres, como rompimentos parciais ou totais, sendo que as barragens de grandes dimensões (altura de 100 m ou mais), podem acelerar o processo de ocorrências de sismos e tornar ativa regiões assísmicas, em regiões com grandes massas de água e propensas à sismicidade (GAGG, 1997).

Para garantir as necessárias condições de segurança das barragens ao longo da sua vida útil, devem ser adotadas medidas de prevenção e controle. Essas medidas asseguram uma probabilidade de ocorrência de acidente reduzida ou praticamente nula. Porém, devem ser periodicamente revisadas levando-se em consideração eventuais alterações resultantes do envelhecimento e deterioração das estruturas (ANA, 2015).

Em virtude do potencial de risco, o monitoramento destas estruturas se reveste de especial importância. Existem instrumentos específicos para o monitoramento, como extensômetros e pêndulos, que são instalados na barragem durante a sua construção, porém a análise de suas medidas somente permite discriminar situações localizadas, ou deslocamentos relativos entre pontos (ZOCOLOTTI, 2005).

Para um melhor controle e segurança, visando a integridade da estrutura, devem ser tomadas medidas de controle e monitoramento contínuo, através de medições geotécnicas e geodésicas, sendo necessário uma alta precisão e diversas repetições, a fim de que desastres possam ser evitados.

Suci (2012) reforça esta ideia afirmando que barragens monitoradas a partir de métodos geodésicos e geotécnicos, ambos se tornam complementares, visto que o primeiro fornece informações de forma global em relação a um sistema de referência

pré-definido e o segundo oferece medidas específicas de um ponto da estrutura comparado com leituras anteriores.

Para o trabalho em questão, utilizando medidores triortogonais de junta e o método da poligonação, será realizado os dois tipos de monitoramento, geodésico e geotécnico, a fim de analisá-los e poder ter um melhor diagnóstico sobre a integridade da estrutura da barragem estudada.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa diagnosticar a estabilidade da barragem de Salto Caxias, localizada entre as cidades de Capitão Leônidas Marques e Nova Prata do Iguaçu/PR, por meio dos monitoramentos relativo e absoluto, dentro de sua galeria superior de inspeção.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos foram

- Analisar a abertura de fissuras na galeria da barragem pelo método de monitoramento relativo;
- Analisar o deslocamento absoluto da estrutura pelo método da poligonação;
- Diagnosticar a segurança da barragem a partir dos resultados de monitoramento estudados.

1.3 JUSTIFICATIVA

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2020), apesar de no Brasil haver cerca de 19.705 barragens, são recorrentes os desastres e acidentes com rompimento de barragens. Pode-se notar que o monitoramento desse tipo de estrutura, apesar de ter regulamentações desde o início do século XX, ainda não é integralizado em todo o território.

Segundo Freitas (2016), no último meio século a exposição das pessoas aos riscos de desastres vem crescendo no Brasil e no mundo, em uma velocidade maior

que a capacidade de reduzir a vulnerabilidade a impactos. Pode-se analisar que acidentes em barragens se devem principalmente a um conjunto de causas comum: a manutenção deficiente das estruturas de drenagem; ausência de monitoramento contínuo e controle durante construção e operação; crescimento das barragens sem adequados procedimentos de segurança. Tais fatores quando combinados podem causar grandes estragos não só no ecossistema local, como perda de vidas nas localidades próximas.

Em 5 de novembro de 2015, ocorreu o caso do rompimento da barragem de Mariana/MG. Tal rompimento ocorreu em uma das três barragens, a denominada de Fundão projetando cerca de 34 milhões de metros cúbicos de lama que soterrou a quase total extensão da vila de Bento Rodrigues (situada 5,6 km a jusante) e matando 19 pessoas (ALLAOUASAADI, 2015). Algumas consequências do rompimento podem ser vistas na Figura 1.

Figura 1 – Consequências do Rompimento da Barragem de Mariana



Fonte: ÉPOCA (2015)

Já na Figura 2, pode-se visualizar algumas consequências do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho/MG, que armazenava 12 milhões de metros cúbicos de lama de rejeitos da mineração de ferro, em 25 de janeiro de 2019. Uma semana após o rompimento, haviam sido contabilizadas 110 vítimas fatais, das quais 71 foram identificadas, mais de 100 pessoas desalojadas e 238 desaparecidas. Tais números alarmantes já caracterizavam o desastre de Brumadinho como o maior acidente de trabalho da história do Brasil (OLIVEIRA, 2019). Segundo o jornal, G1 (2021), 270 vidas foram perdidas, mais de 3 mil pessoas foram atingidas pelo

desastre, e a maioria das pessoas da região ainda não conseguem exercer nenhum tipo de atividade remunerada.

Figura 2 – Consequências do Rompimento da Barragem de Brumadinho



Fonte: VEJA (2019).

Para casos de barragens para geração de energia, pode-se citar a barragem de Apertadinho (Figura 3), localizada em Vilhena/RO, sobre o Rio Comemoração, que rompeu no dia 09 de janeiro de 2008, antes de sua inauguração e apesar de não ocasionar em nenhum óbito, teve vários danos ambientais impactando toda a população local (UEMURA, 2009).

Figura 3 - Desastre Barragem de Apertadinho



Fonte: CUNHA (2008).

Apesar da ocorrência de rompimentos de barragens no Brasil não ser um problema recente, o número de casos atuais é considerável, conforme exposto na Quadro 1.

Quadro 1 – Rompimento de barragens no Brasil nos últimos anos.

LOCAL	DATA	NOME	TIPO	DANOS CAUSADOS
Nova Lima (MG)	2001	Barragem de Macacos	Barragem de Rejeitos	5 óbitos
Cataguases (MG)	2003	Barragem em Cataguases	Barragem de Rejeitos industriais	Contaminação do rio Paraíba do Sul e interrupção do abastecimento de água de 600.000 pessoas.
Alagoa Nova (PB)	2004	Camará	Barragem de água	5 óbitos e aproximadamente 3 mil pessoas desabrigadas ou desalojadas
Miraí (MG)	2007	Barragem do Rio Pomba/ Cataguases	Barragem de rejeitos minerários	Mais de 4000 pessoas desabrigadas ou desalojadas.
Vilhena (RO)	2008	Apertadinho	Barragem de água para geração de energia	Danos ambientais variados (assoreamento de rios, erosão do Solo, entre outros)
Cocal e Buriti dos Lopes (PI)	2009	Algodões	Barragem de água	Entre 9 e 24 mortos e cerca de 2000 pessoas ficaram desabrigadas ou desalojadas
Laranjal do Jari (AP)	2014	Santo Antônio	Barragem de água para geração de energia	4 óbitos.
Itabirito (MG)	2014	Barragem da Herculano	Barragem de rejeitos	3 óbitos.
Mariana (MG)	2015	Barragem Fundão	Barragem de rejeitos	19 óbitos, 8 desaparecidos 600 desabrigados ou desalojados, interrupção do abastecimento de água de milhares de pessoas.
Brumadinho (MG)	2019	Barragem da Mina Córrego do Feijão	Barragem de rejeitos minerários	252 óbitos, 18 desaparecidos e devastação de 125 hectares de floresta.

Fonte: Adaptado JERKE (2019)

Nesse contexto, apesar da crescente gama de estudos sendo produzidos, é interessante realizar mais trabalhos sobre a área de monitoramento de barragens, onde o tema pode ser melhor discutido e analisado, a fim de gerar resultados satisfatórios e que sejam cada vez mais implementados.

1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

A pesquisa foi realizada em duas campanhas de medições, dentro do prazo de 6 meses, dessa forma obtendo tempo necessário para que haja relevância do monitoramento absoluto da barragem, porém este prazo, em relação ao monitoramento relativo, é muito superior que o necessário para aferir medições comparativas, o que pode gerar resultados discrepantes ou atestar a estabilidade da estrutura.

Outro ponto limitador, deve-se ao relógio comparador utilizado no trabalho ter um campo de leitura máximo de 10 mm, sendo qualquer leitura acima deste valor, não poder ser aferida.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BARRAGEM

Segundo a Lei nº 12.334 (BRASIL,2010) que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, o termo barragem define-se como: “qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”

As barragens são obras de engenharia geralmente associadas a um elevado potencial de risco devido à possibilidade de um eventual colapso, com consequências catastróficas para as estruturas das próprias barragens, ao meio ambiente, com destruição da fauna e flora, e, principalmente, pela perda de vidas humanas (MSIB, 2002).

As barragens trazem diversos benefícios à humanidade há vários séculos. Tais benefícios derivam do tamanho dos reservatórios para que estes foram construídos. Com a inconstância de disponibilidade de água em alguns locais, o represamento e armazenamento desta água se torna essencial para diversos usos, como irrigação, hidroeletricidade, navegação, abastecimento, combate a secas, defesa contra inundações, entre outros (MELLO, 2013).

O tipo mais comum de barragem que há no Brasil é a barragem de terra, caracterizada por vales largos e ombreiras suaves. Pode ser de terra homogênea ou zoneada, mas sempre priorizando o núcleo argiloso no centro. Permite fundações mais deformáveis por ser menos rígida, transmitindo esforços baixos para as fundações de qualquer tipo (COSTA, 2014).

Ainda Costa (2014), cita outro tipo convencional no território brasileiro, a barragem de concreto, esta que pode ser de gravidade, em arco, contraforte ou até mesmo concreto compactado a rolo (CCR). Estas barragens são construídas essencialmente com materiais granulares naturais ou produzidos artificialmente, aos quais se adicionam aglomerantes (cimento, pozolanas, etc.). No caso da UHE Salto Caxias – Capitão Leônidas Marques/PR, que será objeto deste estudo, a barragem é

construída com a tecnologia de CCR. Tal modelo de barragem pode ser vista na Figura 4.

Figura 4 - Exemplo de Construção de Barragem em CCR



Fonte: SEIRHMA (2019)

O concreto compactado a rolo (CCR) é um método construtivo mais rápido e barato que o concreto convencional. Neste tipo de concreto, o fator água/cimento é bem menor e o concreto é mais seco, não aceitando a convencional vibração, sendo por isso, compactado com rolo, de forma similar à uma barragem de solo (ZUCULIN, 2012).

Esta técnica vem substituindo muitas vezes as barragens de terra e de enrocamento pelos seus diversos benefícios, e competindo com barragens de concreto convencional (ANDRADE, 1997). Dentre tais benefícios, além da rápida execução, Watababe et al. (2008) mostram:

- Baixo consumo de mão de obra por volume unitário;
- Alta capacidade de colocação, diminuindo o tempo de execução em relação a outros processos construtivos de barragem de concreto;
- Geração de processo industrial confiável, com melhoria de qualidade ao longo do tempo;
- Baixo consumo total de material em relação às soluções que utilizam materiais soltos, impactando menos o meio ambiente.

2.2 SEGURANÇA DE BARRAGENS

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (CIGB), sempre esteve preocupada com a segurança de barragens, tendo sido intensa sua atividade neste campo com a formação de diversos comitês. Com uma série de rupturas catastróficas, a partir da década de 50, diversos países começaram a adotar medidas, como inspeções e acompanhamentos mais frequentes de diferentes formas, que garantissem a segurança de suas barragens (CBDB, 2001).

Brasil (2002), por meio do Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (MSIB), informa que para estruturas de concreto, a subpressão e percolação de água são as principais causas de instabilidade em potencial sob condições normais de carregamento, de parte ou da totalidade das estruturas. Reações álcali-agregado, quando o cimento e seus agregados na presença de umidade se expandem gerando fissuras e deslocamentos, podem ocasionar sérios impactos na segurança das estruturas.

No Brasil, em 1979, o CBDB (Comissão Brasileira de Grandes Barragens) criada em 1936, publicou um documento relacionado com o assunto segurança de barragens, “Diretrizes para Inspeção e Avaliação da Segurança de Barragens em Operação”. Desde então, começaram a surgir novas diretrizes pelo Ministério da Integração Nacional, como em 1986 – “Recomendações para a Formulação e Verificação de Critérios e Procedimentos de Segurança em Barragens”, 1995 – “Cadastro Brasileiro de Deterioração de Barragens e Reservatórios” e 1996 – “Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil”, entre outras, além do próprio CBDB (GRAÇA, 2016).

Em 20 de Setembro de 2010 entrou em vigor a Lei 12.334 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). A regulamentação, implantação e fiscalização do SNISB desde então se tornaram novas atribuições da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA). O Inciso III do Artigo 4º da citada Lei estabelece que a segurança da barragem e os mecanismos necessários para estabelecê-la são de responsabilidade do empreendedor da mesma. Por sua vez, os Incisos I, II, III e IV do Artigo 5º, estabelecem que a fiscalização da segurança da

barragem seja de responsabilidade da entidade, no caso a ANA, que outorgou o direito de: uso dos recursos hídricos ou hidrelétricos; minerários (disposição final ou temporária de resíduos) e; uso para disposição de resíduos industriais. Por sua vez, a ELETROBRÁS (2003) estipula frequências mínimas de leituras para cada tipo de observação, conforme Quadro 2.

Quadro 2 – Frequências mínimas de leitura recomendada

Tipo de Observação	Período Construtivo	Enchimento do Reservatório	Período Inicial de Operação	Período de Operação
Deslocamentos “Absolutos” (Geodésia)	Ao final da construção	Mensal	Trimestral	Semestral
Deslocamentos Relativos	2 Semanais	3 Semanais	Semanal	Quinzenal
Deslocamentos entre blocos/monólitos	Semanal	2 Semanais	Quinzenal	Mensal
Deformação Interna	Semanal	2 Semanais	Semanal	Mensal
Tensão	Semanal	2 Semanais	Semanal	Mensal
Pressão Intersticial no Concreto	Semanal	2 Semanais	Semanal	Mensal
Subpressão	Semanal	3 Semanais	2 Semanais	Semanal a Quinzenal
Vazão de Infiltração	-	Diárias	3 Semanais	Semanal
Temperatura do Concreto	Semanal	2 Semanais	Semanal	Mensal

Fonte: ELETROBRÁS, 2003.

O Artigo 23 da Lei 12.334/2010 explicita que será aplicada a legislação pertinente em caso de não obediência à supracitada Lei, porém nada é citado em relação às punições cabíveis ao empreendedor quando da ruptura parcial ou total da barragem, gerando prejuízos a outros.

De forma mais técnica, o Ministério da Integração Nacional, em 2002 publicou o Manual de Inspeção e Segurança de Barragens, norteando o aspecto de segurança de barragens, tanto nos novos empreendimentos quanto nos que já estão em operação, tratando ainda, com maior clareza, sobre a classificação de barragens quanto às possíveis consequências relacionadas à ruptura parcial ou total da obra, de

acordo com a Quadro 3.

Quadro 3 – Classificação das consequências associadas ao potencial de ruptura

Consequência de Ruptura	Perda de Vidas	Econômico, Social e Danos Ambientais
Muito Alta	Significativa	Dano excessivo
Alta	Alguma	Dano substancial
Baixa	Nenhuma	Dano moderado
Muito Baixa	Nenhuma	Dano mínimo

Fonte: BRASIL, 2002.

2.3 MONITORAMENTO

O monitoramento tem papel primordial, visto que comparando dados com o conceito do projeto, pode-se obter um diagnóstico do comportamento da obra. Além disso, este permite o controle de diversos parâmetros como prevenção de ruptura da barragem, fissuramento excessivo, movimento das juntas, deslocamentos, temperatura e deformação do concreto (JERKE, 2019).

O monitoramento é a ferramenta que possibilita intervenções preventivas na barragem, preservando a segurança e diminuindo os riscos de acidentes estruturais, ao meio ambiente e em toda sua área de influência (ZUCULIN, 2012).

Segundo Cruz (2004), há uma crescente valorização dos sistemas de inspeção e observação de obras de engenharia civil, em especial de barragens, em face dos custos e riscos relativos aos grandes empreendimentos. O autor afirma que os principais meios para avaliar a segurança destas construções ao longo de sua vida útil são: inspeções visuais, auscultação geodésica de deslocamentos verticais e/ou horizontais, levantamentos batimétricos e instrumentação de auscultação.

Chaves (1994) 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. segundo o autor, os métodos não geodésicos abrangem os métodos geotécnicos e projetos especializados.

Os métodos geotécnicos e geodésicos podem ser usados para estudar deformações. Os métodos geotécnicos detectam movimentos relativos. Entre os equipamentos empregados pode-se destacar os pêndulos, extensômetros e medidores Triortogonais de Junta (MTJ). Métodos geodésicos são primeiramente utilizados para detectar movimentos absolutos (KAHMEN e FAIG 1988).

Como principais métodos de monitoramento geodésico citam-se: triangulação, trilateração, a partir de dados do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), nivelamento geométrico e poligonação.

O Department of Army (1994), destaca que levantamentos geodésicos, 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 frequentemente, informações locais sem qualquer verificação a não ser a comparação com outras medidas independentes.

Adicionalmente, o Department of Army (1994) diz que instrumentos geotécnicos são mais fáceis de realizar automação e contínuo monitoramento, já os levantamentos geodésicos terrestres convencionais são elaborados e requerem operadores mais treinados.

Um aspecto que deve ter atenção especial é a confiabilidade das medidas realizadas pela instrumentação geodésica. Deve-se conhecer a precisão dos equipamentos, que por sua vez, devem estar calibrados ou retificados por instituições competentes para garantir a confiabilidade das medições (ZOCOLOTTI, 2005).

2.3.1 Monitoramento Relativo

Os principais objetivos da instrumentação geotécnica, de acordo com o Department of Army (1995a) podem ser separados em quatro grupos: Avaliação Analítica; Previsão de Desempenho Futuro; Avaliação Legal e Desenvolvimento; e, Verificação de Projetos Futuros.

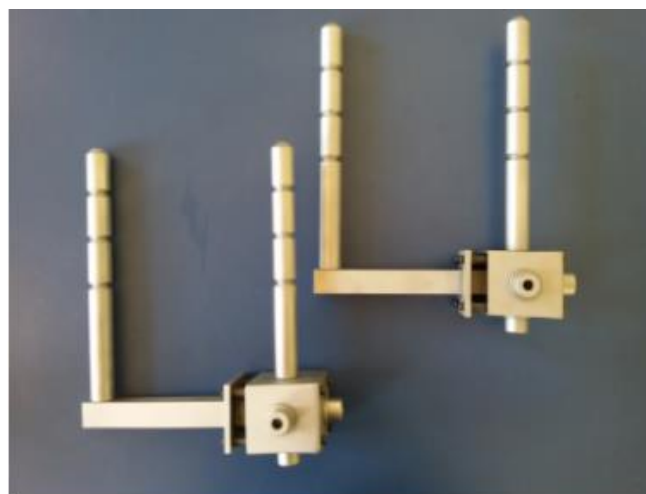
O comportamento de um maciço pode ser acompanhado a partir de diferentes parâmetros, sendo esses obtidos a partir de instrumentação geotécnica (DEPARTMENT OF ARMY, 1995b):

- Pressão porosa nas fundações;
- Vazões de percolação;
- Carregamento de partículas através da percolação no maciço da estrutura;
- Deformação de maciço e fundações;
- Atividades sísmicas;
- Tensões no aterro, e;
- Empuxos de terra sobre estruturas de concreto.

Para a determinação desses parâmetros são utilizados diferentes instrumentos e técnicas: piezômetros, inclinômetros, análise química e da turbidez da água, medidores de vazão, pêndulos, acelerógrafos, células de pressão total, medidores triortogonais de junta, entre outros.

Segundo Silveira (2003), através da instalação de pêndulos e medidores triortogonais de junta (Figura 5), tem-se um controle dos deslocamentos verticais e horizontais em relação a pontos de referência instalados em profundidade na fundação. Não se trata de deslocamentos absolutos, visto que esses só podem ser obtidos através de técnicas geodésicas.

Figura 5 - Medidor Triortogonal



Fonte: COMMETRO (2019)

Graça (2016), menciona que os medidores triortogonais de junta (MTJ), são usualmente empregados para monitorar fissuras, trincas ou juntas de contração entre blocos. Através deles, podem-se determinar deslocamentos, para detectar a possibilidade de alguma anomalia na estrutura.

Matos (2002) diz que estes deslocamentos podem ser:

- Recalques diferenciais entre blocos;
- Deslocamentos cisalhantes horizontais;
- Movimentos de abertura-fechamento das juntas.

O princípio de funcionamento de um MTJ consiste em medir deslocamentos em três direções ortogonais, com o auxílio de um sistema de apoios construídos em aço inoxidável e fixados convenientemente na estrutura. Com relógio comparador ou paquímetro, são feitas as medidas nos três eixos ortogonais desejados, e quando se compara as leituras entre as épocas observadas (recomenda-se leituras quinzenais ou mensais após início das operações da barragem), eventuais deslocamentos são traduzidos em variações nas leituras (MATOS, 2002).

Silveira (2003) menciona que o relógio comparador (Figura 6) usado para este fim deve apresentar campo de leitura da ordem de 10 mm e sensibilidade de 1 micrón (0,001 mm). Afirma ainda que tal instrumento, desde que operado por pessoas cuidadosas e de bom nível técnico, permite uma precisão da ordem de $\pm 0,01$ mm.

Figura 6 - Relógio comparador aferindo deslocamento no MTJ



Fonte: AUTOR, 2019

2.3.2 Monitoramento Absoluto

Os trabalhos de monitoramento absoluto (geodésicos) buscam detectar variações de coordenadas (planimétricas e/ou altimétricas) de um conjunto de pontos, dentro de um período específico de tempo. Os resultados obtidos pelas técnicas geodésicas indicam se os pontos tiveram suas coordenadas modificadas (deslocamentos absolutos) (ZOCOLOTTI, 2005).

Gagg (1997) afirma que, se comparado com outros tipos de levantamentos, as medidas de deslocamento absoluto têm as seguintes propriedades:

- Necessidade de alto grau de acuracidade;
- Repetibilidade de observações;
- Integração de diferentes tipos de observações;
- Análise estatística dos dados adquiridos.

Segundo Zocolotti (2005), a aplicação de técnicas geodésicas permite a determinação de deslocamentos absolutos da estrutura, normalmente conciliando diversas técnicas de posicionamento, tais como: nivelamento geométrico de precisão, trilateração, triangulação, posicionamento por técnicas espaciais (Global Positioning System - GPS) e poligonação, sendo que cada uma tem sua aplicação específica.

2.3.2.1 Poligonação

A poligonação é um método muito empregado para a determinação de coordenadas de pontos, principalmente para a definição de pontos de apoio planimétrico. Uma poligonal é uma série de linhas consecutivas para as quais são conhecidos os comprimentos e direções, obtidos através de medições em campo (ZOCOLOTTI, 2005).

Zocolotti (2005) ainda complementa que o levantamento de uma poligonal é realizado através do método de caminhamento, percorrendo-se o contorno de um itinerário definido por uma série de pontos, medindo-se todos os ângulos e lados e uma orientação inicial. A partir destes dados e de uma coordenada de partida, é possível calcular as coordenadas de todos os pontos que formam esta poligonal.

Segundo Jordan (1981), as poligonais podem ser classificadas em três tipos:

- Aberta: são conhecidas somente as coordenadas dos pontos de partida;
- Fechada: são conhecidas as coordenadas dos pontos de partida e chegada, pois são os mesmos pontos;
- Enquadrada: são conhecidas as coordenadas dos pontos de partida e chegada, sendo pontos diferentes.

Estes dois últimos tipos de poligonal permitem a verificação de erros de fechamento angular e linear. A poligonação pode ser aplicada, por exemplo, para o levantamento de galerias ou quando os pontos a serem controlados estão próximos uns dos outros (CHAVES, 1994).

O Department of Army (2002), indica duas configurações para o monitoramento nas galerias de inspeção:

a) Utilizando-se pontos de controle nas extremidades, com prismas instalados permanentemente, e um no centro da galeria, onde a estação total fica fixa para realizar observações nos pontos de monitoramento. Com esta configuração pode-se utilizar estações totais robotizadas com o sistema de busca automática de alvos (*Automatic Target Recognition - ATR*), interligada a softwares específicos para o processamento on-line.

b) Utilizando-se dois pontos de controle fixo nas extremidades do trajeto e estações móveis temporárias, no percurso da galeria. Indica que se utilize sistemas de centragem forçada presos nas paredes das galerias de inspeção para materializar as estações móveis.

O presente trabalho utilizará a segunda configuração, devidas as instalações já presentes na barragem, como sistema de centragem de força nas paredes da galeria de inspeção da barragem, para mobilidade da estação total.

O método de cálculo da poligonal será o descrito por Veiga (2012), utilizando o método da poligonal fechada. Os cálculos devem ter o seguinte sequencial:

- a) Inicia-se realizando o cálculo dos ângulos horizontais em função das medidas de pares conjugados:

$$Lr\acute{e} = \frac{PD + PI}{2} \pm 90^{\circ} \quad (1)$$

$$Lvante = \frac{PD + PI}{2} \pm 90^{\circ} \quad (2)$$

$$\alpha = Lvante - Lr\acute{e} \quad (3)$$

Sendo:

Lré – Leitura de ré (°);

Lvante – Leitura de vante(°);

PD – Leitura da Posição Direta da Luneta (°);

PI – Leitura da Posição Invertida da Luneta (°);

α – Ângulo Horizontal (°).

b) Após a determinação dos ângulos horizontais, deve-se verificar o erro de fechamento angular, no caso de ângulos horizontais externos (Figura 7), é dado por:

$$\epsilon_a = \sum \alpha_i - [(N + 2) \cdot 180^{\circ}] \quad (4)$$

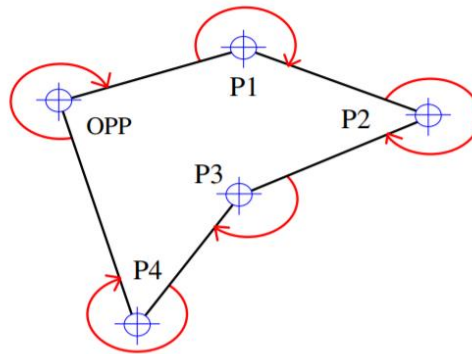
Onde:

N - Número de estações;

ϵ_a – Erro de fechamento angular (°);

α_i – Ângulos horizontais (°).

Figura 7 - Erro de fechamento angular para ângulos externos



Fonte: VEIGA, 2012

O erro angular deve ser menor ou igual ao erro admissível ou a tolerância estabelecida para o levantamento, caso contrário, as medições devem ser refeitas.

- c) Sendo assim o erro admissível depende do tipo de levantamento, sua finalidade e equipamento. Podendo ser expresso por:

$$E_{adm} = p\sqrt{N} \quad (6)$$

Sendo:

N - O número de pontos da poligonal;

p - A precisão nominal das medidas angulares, de acordo com o equipamento (°);

E_{adm} - Erro admissível (°).

Após, pode ser feita a distribuição do erro angular de duas formas:

- Distribuição do erro nos ângulos formados pelas menores distâncias;
- Distribuir o erro igualmente em todos os ângulos medidos.

- d) Tendo terminada a correção dos ângulos horizontais, permite-se a realização do cálculo dos azimutes, podendo ser calculados por:

Para α no sentido horário - $A_{i,i+1} = A_{i-1,i} + \alpha_i - 180^\circ$ (7)

Para α no sentido anti-horário - $A_{i,i+1} = A_{i-1,i} - \alpha_i - 180^\circ$ (8)

$A_{i,i+1}$ – Azimute a ser calculado (°);

$A_{i-1,i}$ - Azimute anterior (°);

α_i – Ângulo horizontal (°).

- e) Cada alinhamento pode ser projetado segundo a direção dos eixos x e y a partir da distância entre os 2 vértices e do azimute desse alinhamento, esquema que pode ser visto na Figura 8, realizando assim o cálculo das projeções planas dos alinhamentos, pelas fórmulas:

$$\Delta X = d_{i-1,i} \cdot \text{sen } Az_{i-1,i} \quad (9)$$

$$\Delta Y = d_{i-1,i} \cdot \text{cos } Az_{i-1,i} \quad (10)$$

Sendo:

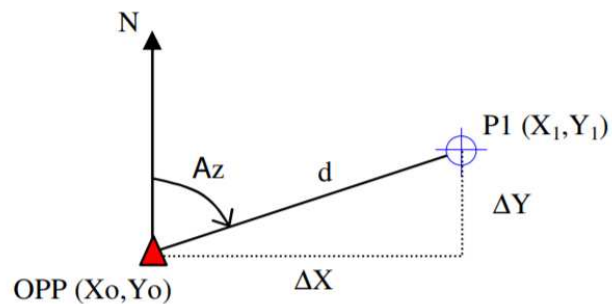
ΔX – Projeção plana do alinhamento em X (m);

ΔY – Projeção plana do alinhamento em Y (m);

$d_{i-1,i}$ - Distância entre os 2 vértices (m);

$Az_{i-1,i}$ - Azimute do alinhamento (°).

Figura 8 - Esquema de cálculo das coordenadas



Fonte: VEIGA, 2012

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais necessários e as técnicas utilizadas para a realização das duas campanhas de medições para levantamento de dados realizadas em Setembro de 2019 e Março de 2020, tanto no monitoramento relativo, quanto no absoluto.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, localiza-se no rio Iguaçu, estado do Paraná, na divisa dos municípios de Nova Prata do Iguaçu e Capitão Leônidas Marques, distanciada aproximadamente 560 km de Curitiba (Figura 9). Possui 1.083 m de comprimento na crista e 67 m de altura máxima em relação ao leito do rio. O volume de concreto compactado a rolo (CCR) foi de 945.600 m³ na barragem e 546.000 m³ de concreto convencional (CCV) em toda a obra (SOARES, 2005).

Figura 9 - Localização da barragem em relação a outras UHEs do Paraná



Fonte: COPEL, 2019.

Segundo a Copel (2004), a UHE Salto Caxias é a terceira maior central de produção de energia da companhia, com 1.240 megawatts de potência, e pode ser descrita:

O maciço de contenção responsável pelo represamento de 3,5 bilhões de m³ (metros cúbicos) de água que se espalham por 131 km² de superfície, é de concreto compactado com rolo (CCR), técnica que tem por característica demandar menos cimento e dispensar o uso de armações e ferragens internas. Trata-se da maior estrutura desse gênero construída até hoje no Brasil: ela tem volume total de 949.000 m³ e pesa cerca de 2,5 milhões de toneladas. Incorporado à barragem, o vertedouro, estrutura de segurança que serve para regular o nível do lago e dispensar as vazões excessivas em situação de cheia, é operado por meio de 14 comportas, cada uma com 20 metros de altura por 16,5 metros de largura e 200 toneladas de peso. Totalmente abertas, as comportas permitem a liberação de até 49.600 m³ de água por segundo, o correspondente a mais de 30 vezes a vazão média das Cataratas do Iguaçu.

3.1.1 Rede de Apoio da UHE Salto Caxias

Na Figura 10 observa-se, a configuração da rede de monitoramento após a disposição dos pilares, que serviram de apoio ao monitoramento interno da barragem, através de poligonal enquadrada nas galerias de inspeção.

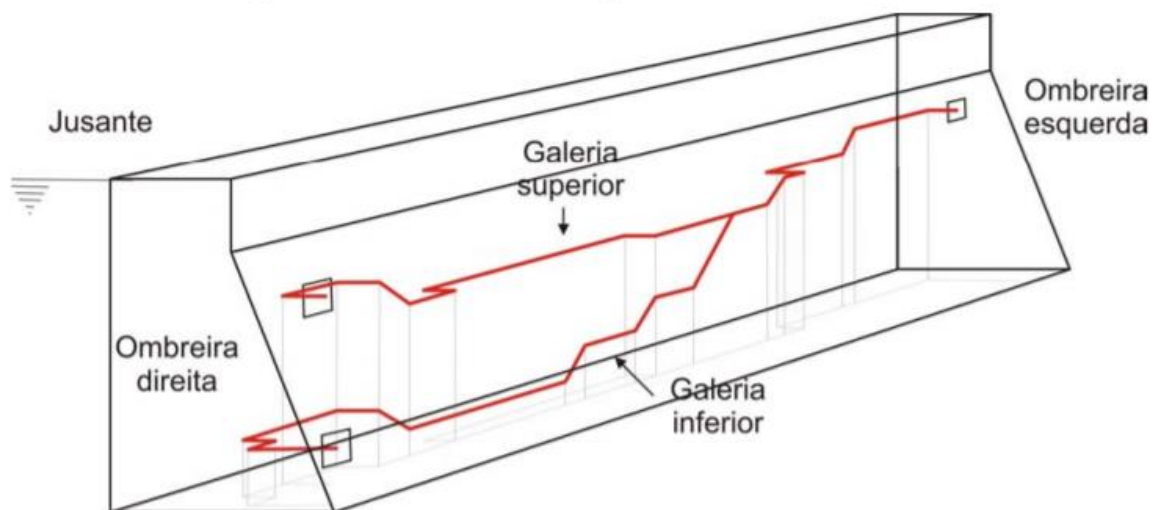
Figura 10 - Rede Geodésica de monitoramento e pilares de referência



Fonte: ZOCCOLOTTI, 2005.

Durante a construção da barragem foi reservado um espaço no interior do corpo de concreto para duas galerias de inspeção (Figura 11), onde é possível realizar leituras e manutenção na instrumentação específica de barragens. Sendo necessária a técnica de poligonização para monitoramento geodésico. Na ombreira direita (lateral esquerda para um observador localizado à jusante), estão as entradas das galerias superior e inferior, e na ombreira esquerda outra entrada da galeria superior. As duas galerias se encontram próximas à saída na ombreira esquerda da barragem (ZOCOLOTTI).

Figura 11 - Ilustração das galerias de inspeção da barragem



Fonte: ZOCOLOTTI, 2005.

Estas galerias apresentam largura média em torno de 2,50 metros sendo que a maior parte do percurso é retilínea, porém apresenta algumas curvas e escadarias, e em alguns casos pode haver dificuldade em realizar leituras com a estação total por ter visadas curtas (ZOCOLOTTI, 2005).

Cabe ressaltar que o presente trabalho somente irá inspecionar a galeria superior da barragem.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Relógio Comparador

O relógio comparador (Figura 12) utilizado foi disponibilizado pelo laboratório de topografia da UTFPR, sendo este um relógio que apresenta campo de leitura da ordem de 10mm e sensibilidade de 1 micrometro (0,001mm).

Figura 12 - Relógio Comparador



Fonte: AUTOR, 2019.

3.2.2 Estação Total LEICA TC 407

A Estação Total TC 407, mostrada na Figura 13, é produzida pela Leica Geosystems.

Figura 13 - Estação Total LEICA TC 407



Fonte: SINAY NEVES, 2019.

As principais características técnicas deste instrumento são:

- Leitura direta de 1" e precisão de 7";
- Precisão Linear de 2mm + 2ppm (SINAY NEVES, 2019)

A Estação Total foi utilizada em conjunto com a turma de Engenharia Cartográfica da UFPR, sendo pertencente à equipe da UFPR, já que a mesma realizou medições de poligonação da barragem no mesmo dia.

3.2.3 Prisma para Alvo

Assim como a estação total, o prisma, mostrado na Figura 14, foi utilizado, no levantamento da poligonal em conjunto com a turma de Engenharia Cartográfica da UFPR.

Utilizou-se dois prismas, para medidas de vante e ré, com o intuito de realizar as leituras de forma mais organizada e ágil.

Figura 14 - Prisma Circular GPR 111



Fonte: LASER SUL, 2019.

3.3 DESLOCAMENTO RELATIVO

Para realização de medições de deslocamentos relativos, utilizou-se o relógio comparador, conforme Figura 15. Este foi colocado em cada uma das extremidades do MTJ e realizou-se a leitura do deslocamento em cada uma das direções apresentadas (Figura 16).

Figura 15 - Relógio comparador acoplado ao MTJ



Fonte: O AUTOR, 2019.

Figura 16 - Relógio comparador efetuando medições nas 3 extremidades do MTJ

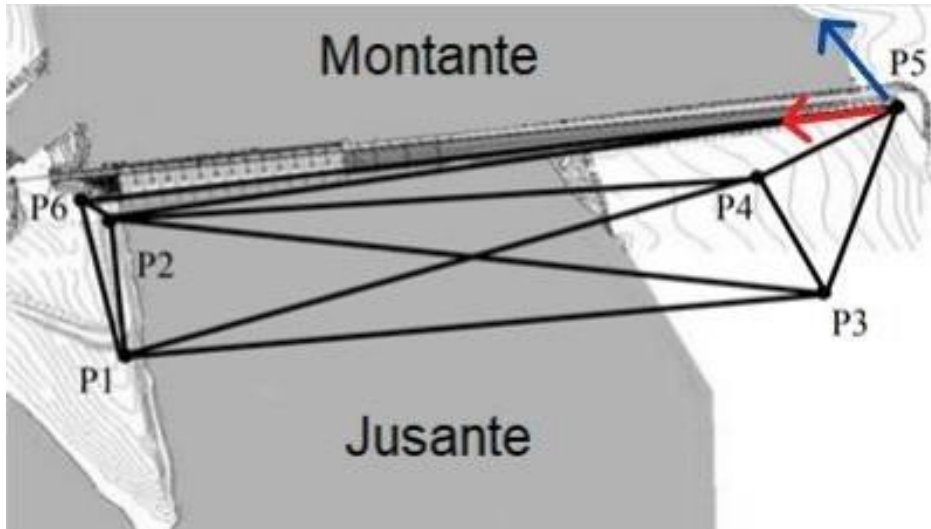


Fonte: O AUTOR, 2019

3.4 DESLOCAMENTO ABSOLUTO

Na medição do deslocamento absoluto, as coordenadas utilizadas do ponto de partida, foram as coordenadas do pilar P5, que está localizado na ombreira esquerda da barragem, oposto aos pilares P6 e P2. Os pilares, a configuração da rede de monitoramento e a orientação dos eixos X (vermelho) e Y (azul), podem ser vistos na Figura 17.

Figura 17 - Configuração da rede de monitoramento em planta



Fonte: Adaptado NADAL et. al., 2004.

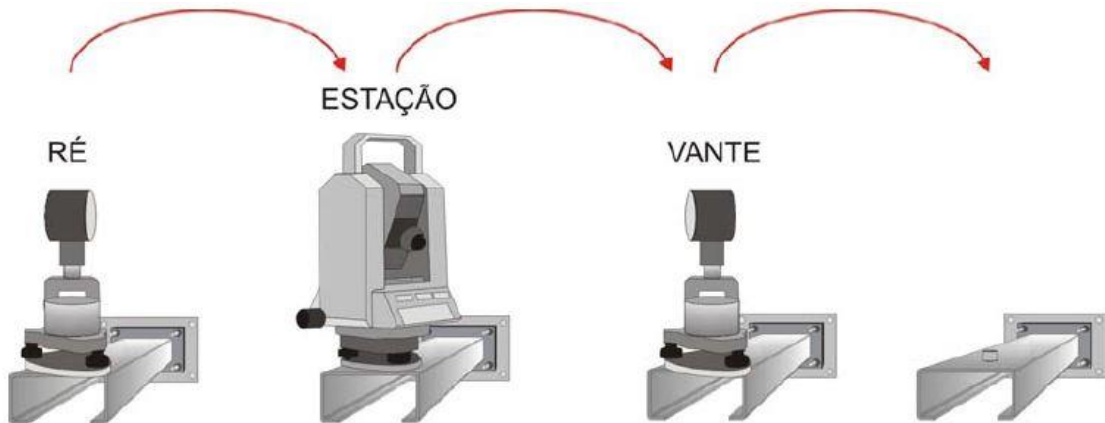
Seguindo para a galeria interna da barragem, com auxílio de dispositivos de centragem de força (DFC) nas paredes, Figura 18, fixa-se a estação total nestes dispositivos, e o prisma de alvo no seguinte e no anterior, conforme Figura 19, sendo possível realizar leituras de vante e ré com a estação total, para a preparação do cálculo da poligonal da galeria interna.

Figura 18 - Dispositivo de centragem de força fixo na parede



Fonte: O AUTOR, 2019

Figura 19 - Procedimento para caminhamento com Estação Total



Fonte: ZOCCOLOTTI (2005).

Os DFC possibilitam a estabilidade tanto da estação total quanto dos prismas que servem de alvo para a realização de leituras, facilitando a locomoção dentro das galerias já que o espaço é reduzido.

Desta forma, com uma base nivelada, é facilitada a leitura da estação total, como pode-se ver na Figura 20.

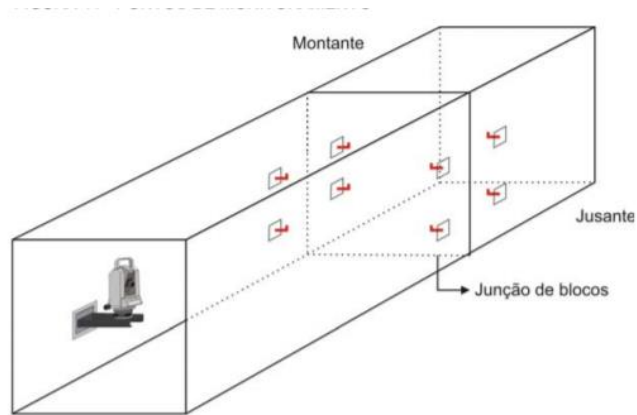
Figura 20 - Levantamento de medições



Fonte: O AUTOR, 2019

Dentro da galeria, pode-se perceber que os pontos de Monitoramento Geodésico Interno (MGI) em alguns locais se encontram agrupados em grupos de 4 marcações, isso se deve, a casos em que os alvos estão próximos a juntas de dilatação, conforme Figura 21, desta forma podendo verificar caso a junção dos blocos de CCR se movimente em medições previamente programadas. A realização dessas medidas pode ser vista na Figura 22.

Figura 21 - Agrupamento de MGI dentro do corpo da Barragem



Fonte: ZOCCOLOTTI, 2005

Figura 22 - Realização de aferição em MGIs agrupados



Fonte: O AUTOR (2019)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos pelas medições do corpo da barragem da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, e processadas em computador, são a seguir demonstrados, divididos em deslocamento relativo e deslocamento absoluto, buscam chegar a um resultado isolado para cada tipo de deslocamento e a seguir ter uma análise geral da estrutura.

Para a máxima variação tolerável, foram adotados neste estudo 10 e 15 milímetros para as diferenças horizontais e verticais, respectivamente. Tais valores foram definidos em função da barragem em estudo de acordo com documento intitulado “Instrumentos de Auscultação de obras civis, valores de controle para leituras dos instrumentos”, feito pela Companhia Paranaense de Energia (JERKE, 2019 apud. COPEL, 1998).

4.1 RESULTADOS OBTIDOS PARA DESLOCAMENTO RELATIVO

No monitoramento relativo, foi possível realizar duas medições em medidores triortogonais de junta (MTJ), nomeados 02 e 05, que ficam entre os blocos da barragem de CCR 22-23 e 19-20, respectivamente.

Nas Tabelas 1 e 2 estão demonstrados os resultados obtidos através do relógio comparador nos Medidores Triortogonais de Junta (MTJ) 02 e 05 respectivamente. Já na tabela 3 estão demonstradas as diferenças entre as direções de acordo com as duas campanhas.

Tabela 1 - Monitoramento do Medidor Triortogonal de Junta 02

ID	1ª Campanha	2ª Campanha
	MTJ 02 (mm)	MTJ 02 (mm)
Direção X	-	-
Direção Y	9,17	9,06
Direção Z	6,21	6,18

Fonte: AUTOR (2021)

Pode-se perceber que não há leitura na direção X para a tal fissura, isso se deve ao fato da fissura nessa direção exceder os 10 mm, visto que esse é o valor máximo que o relógio comparador utilizado consegue fazer a leitura.

Tabela 2 - Monitoramento do Medidor Triortogonal de Junta 05

ID	1ª Campanha	2ª Campanha
	MTJ 05 (mm)	MTJ 05 (mm)
Direção X	2,69	2,57
Direção Y	2,31	2,21
Direção Z	5,36	5,32

Fonte: AUTOR (2021)

Para tais dados, percebe-se que a fissura monitorada pelo MTJ 02 é maior que a fissura monitorada pelo MTJ 05, o que também foi visível ao perceber que a fissura monitorada pelo MTJ 02 vertia uma quantidade significativa de água para dentro da galeria de monitoramento, que pode ser visto na Figura 23, algo que não ocorria na fissura monitorada pelo MTJ 05.

Figura 23 - Água vertendo pela fissura dentro da galeria da Barragem



Fonte: O AUTOR (2019)

A Tabela 3 apresenta as diferenças de medições nas coordenadas encontradas entre as duas campanhas.

Tabela 3 - Diferenças das coordenadas entre as duas campanhas

ID	MTJ 02 (mm)	MTJ 05 (mm)
Direção X	-	0,12
Direção Y	0,11	0,10
Direção Z	0,03	0,04

Fonte: AUTOR (2021)

Nota-se que as diferenças entre as campanhas de medições para deslocamento relativo a partir do relógio comparador foram muito pequenas, não chegando nem próximo a 1 mm.

Tal resultado se torna muito relevante quando a recomendação de monitoramento de tal tipo de deslocamento é quinzenal ou mensal, para barragens em operação e o tempo entre as campanhas foi de 6 meses.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS PARA DESLOCAMENTO ABSOLUTO

Os dados do deslocamento absoluto da barragem foram obtidos nas medições em campo com auxílio do corpo técnico da barragem e analisados em computador, sendo realizados através de pontos anteriormente marcados pelos DFCs e iniciados pelo pilar P5 (conforme mostrado anteriormente na Figura 17), que foi tomado como referência para os cálculos das diferenças de medições entre as duas épocas, setembro de 2019 e março de 2020, e fechamento da poligonal.

O pilar P5 foi tomado como referência e sua localização foi arbitrada nas coordenadas X= 1950 m e Y= 1290 m.

Após aferição das medidas de ré e vante dos pontos de monitoramento interno, tanto na ida quanto na volta da realização do caminhamento dentro da barragem, para fechamento da poligonal, foram encontradas as coordenadas referentes a cada ponto de medição.

As coordenadas obtidas na primeira campanha pelo fechamento da poligonal nas direções X e Y de cada Monitoramento Géodésico Interno (MGI), composto pelo prisma alvo e o DFC correspondente, podem ser visualizadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Coordenadas de cada MGI na Primeira Campanha

MGI	X	Y
29	1507,068	1254,467
30	1504,343	1254,502
31	1506,956	1256,804
32	1504,888	1256,831
33	1578,895	1253,322
34	1577,090	1253,338
35	1579,750	1255,625
36	1576,564	1255,684
37	1635,010	1252,405
38	1633,200	1252,431
39	1634,995	1254,687
41	1754,973	1250,442
42	1753,604	1250,457
43	1754,797	1252,759
44	1753,455	1252,770
45	1953,427	1250,193
46	1954,725	1250,209
47	1953,445	1252,504
48	1954,643	1252,484
49	1794,515	1249,810
50	1793,078	1249,816
51	1793,336	1252,120
52	1794,699	1252,079

Fonte: Autor (2021)

Vale ressaltar que a numeração dos MGIs se encontra dessa forma devido ao início da marcação destes ser no ponto de apoio P6, do outro lado externo

da barragem e o presente trabalho ter sido realizado do ponto P5 até o início dos vertedouros. A disposição de pontos de apoios 5 e 6 podem ser vistos na Figura 17.

Já as coordenadas obtidas na segunda campanha nas direções X e Y de cada Monitoramento Géodésico Interno (MGI), podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Coordenadas de cada MGI na Segunda Campanha

MGI	Segunda Campanha	
	X	Y
29	1507,068	1254,466
30	1504,343	1254,501
31	1506,956	1256,802
32	1504,889	1256,830
33	1578,895	1253,322
34	1577,091	1253,338
35	1579,750	1255,625
36	1576,564	1255,683
37	1635,011	1252,403
38	1633,200	1252,430
39	1634,995	1254,685
41	1754,973	1250,441
42	1753,604	1250,457
43	1754,797	1252,758
44	1753,455	1252,768
45	1953,427	1250,193
46	1954,725	1250,208
47	1953,445	1252,503
48	1954,643	1252,484
49	1794,516	1249,809
50	1793,078	1249,815
51	1793,336	1252,119
52	1794,699	1252,079

Fonte: AUTOR (2021)

Para fins de comparação entre as campanhas, a Tabela 6 e a Figura 24 trazem as diferenças entre as coordenadas encontradas, para que deste modo possa mensurar se houve ou não deslocamento global na barragem e se sim, qual seria sua dimensão.

Tabela 6 - Diferenças entre campanhas

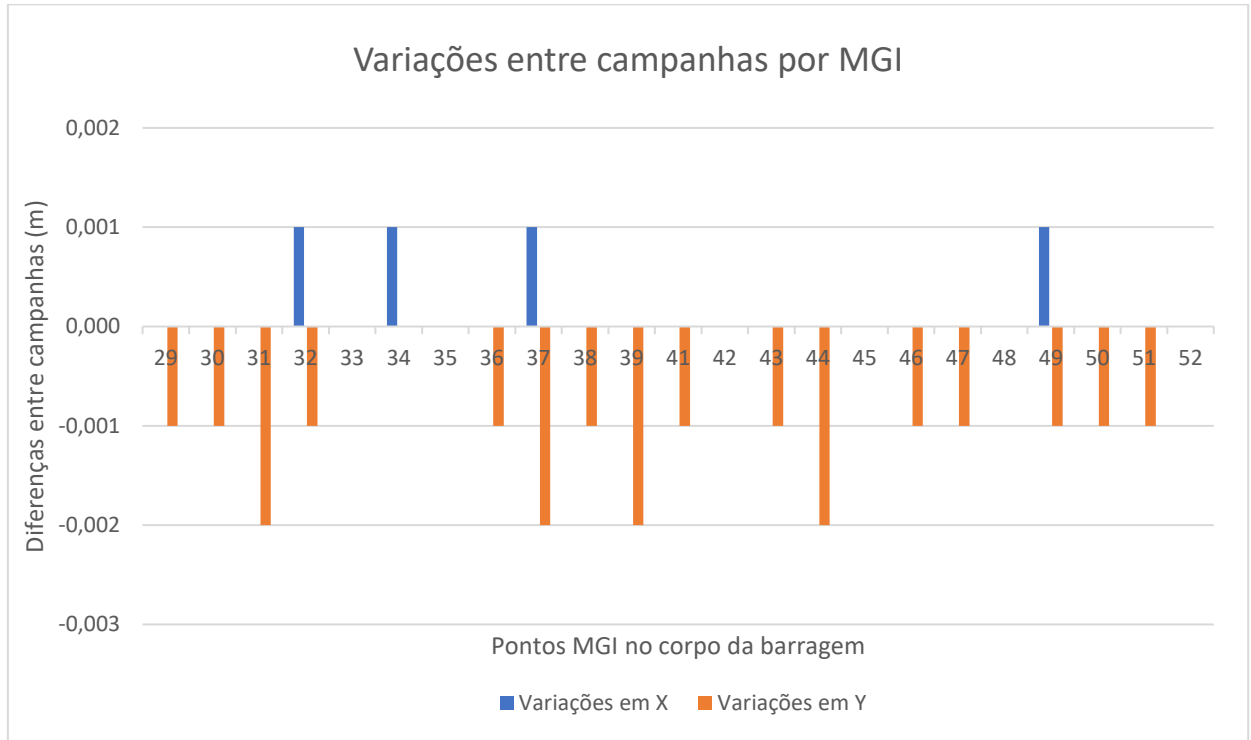
	X	Y
MGI	m	m
29	0,000	-0,001
30	0,000	-0,001
31	0,000	-0,002
32	0,001	-0,001
33	0,000	0,000
34	0,001	0,000
35	0,000	0,000
36	0,000	-0,001
37	0,001	-0,002
38	0,000	-0,001
39	0,000	-0,002
41	0,000	-0,001
42	0,000	0,000
43	0,000	-0,001
44	0,000	-0,002
45	0,000	0,000
46	0,000	-0,001
47	0,000	-0,001
48	0,000	0,000
49	0,001	-0,001
50	0,000	-0,001
51	0,000	-0,001
52	0,000	0,000
MÉDIA =	0,000	-0,001

Fonte: AUTOR (2021)

É possível observar que o deslocamento dos MGIs durante o tempo entre as campanhas de medições é relativamente pequeno, quase nulo se levar em consideração que há a possibilidade de erro de precisão de equipamento ou erro

humano de medição, porém se comparar somente os dois eixos em estudo, visualiza-se que a barragem pode ter mais propensão a se deslocar de acordo com o eixo Y.

Figura 24 - Diferenças entre campanhas



Fonte: AUTOR (2021)

Como pode-se visualizar, tanto na tabela 6 como na Figura 24, a média das variações entre os pontos medidos não excede 1 mm, apesar de que alguns casos a variação máxima do ponto pode chegar a 2 mm, principalmente na direção X, ainda fica longe da variação tolerável máxima de 10 a 15 mm.

5. CONCLUSÕES

A proposta apresentada por esta pesquisa buscou realizar o monitoramento da estrutura da UHE Salto Caxias, por meio de sua galeria superior de inspeção, do ponto externo P5 até o início das comportas, utilizando dois modelos de medição, o monitoramento relativo pelo relógio comparador a partir dos medidores triortogonais de junta (MTJ) já posicionados nas fissuras apresentadas no corpo da barragem; e o monitoramento absoluto, por meio da poligonação de pontos já determinados na galeria de inspeção da barragem e um ponto fora como referência, utilizando equipamentos de precisão e auxílio de pessoas do corpo técnico da barragem. Estas informações servem de base para estudos periódicos de como a barragem se comporta ao decorrer do tempo visando sua estabilidade.

A primeira campanha de levantamento de dados ocorreu em setembro de 2019 e nela já foi possível perceber que em um dos medidores triotogonais de junta disponíveis para medição (02), na direção X, não se conseguiu aferir leitura devido a fissura exceder os 10 mm nessa direção, sendo este o máximo medido pelo relógio comparador utilizado, e o mesmo ocorreu na segunda campanha em março de 2020, quando a leitura foi somente realizada pelo corpo técnico da barragem devido a impossibilidade de visitação da mesma, porém nas outras direções foi realizada medição. Quando solicitado, o responsável da barragem mencionou que eles utilizam um relógio comparador com aferição mais ampla, que não estava disponível na primeira campanha, porém como nesta primeira campanha utilizou-se o relógio comparador de 10 mm, na segunda campanha foi utilizado também o mesmo, a fim de obtenção dados mais fiéis.

Analisando as aferições do relógio comparador entre as campanhas, foi possível notar, assim como esperado, que o deslocamento das fissuras nas três direções é mínimo, chegando no máximo a 0,12 mm, no MTJ 05, que monitora a menor fissura e 0,11 mm, no MTJ 02, da maior fissura, o que mostra um deslocamento mínimo pelo espaço de tempo que as medições foram realizadas, já que o recomendado é que se façam as medições quinzenalmente ou mensalmente e a diferença entre campanhas foi de 6 meses.

Já para as medições do deslocamento absoluto, as medições realizadas em 23 Marcos Geodésicos Internos (MGI) constou-se que passado o tempo entre as campanhas, o deslocamento dos pontos, assim como também esperado, foi mínimo, chegando a alguns pontos no máximo a 2 mm na direção Y e 1 mm na direção X, com média de deslocamento de 0 mm em X e 1 mm em Y. Este valor mostra que mesmo realizando as medições no tempo recomendado pela Eletrobrás, os valores apresentados para deslocamento absoluto ainda estão muito longe dos máximos permitidos, entre 10 a 15 mm, ficando a favor da segurança.

Por fim, é possível afirmar a partir desses resultados que tanto o monitoramento realizado nas fissuras do corpo da barragem, quanto o monitoramento global da barragem apresentam deslocamentos mínimos, quando não tendem a zero, trazendo como resultado final a estabilidade da estrutura.

Vale ressaltar que algumas medidas podem ter seu valor alterado devido a erros de medição manuais ou de aparelhos, porém dificilmente alterariam significativamente os valores e resultados do presente trabalho.

Recomenda-se que em trabalhos futuros, realize-se um número maior de campanhas de medições para ambos os modelos de deslocamento e com intervalos de campanha diferentes, para que assim verifique se em tempos diferentes dos recomendados há alteração nos deslocamentos da estrutura ou valores discrepantes dos convencionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLAOUASAADI, J. C. F. C.; **Geomorfologia do caminho da lama: contexto e consequências da ruptura da Barragem do Fundão (novembro 2015, Mariana–MG)**. Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico, v. 24, n 1/2, 2015.
- ANA. **Manual do Empreendedor – Volume VI - Guia para a Construção de Barragens**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2015.
- ANDRADE, J. B de. **Navstar – GPS**. Departamento de Geociências, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, 1988.
- BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Obtido em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm>. Acesso em 29 Ago. 2019.
- CBDB. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Núcleo de São Paulo. **Guia Básico de Segurança de Barragens**, São Paulo: 2001. 78p. Manual.
- CHAVEZ, J. C. **Controle de Deformações em Barragens: Métodos de Monitoramento e Viabilidade da Utilização do GPS**. Tese de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1994.
- COMMETRO. **Medidor Triortogonal de Junta**. Disponível em: <<http://www.commetro.com.br/instrumento-detahes/9/medidores-triortogonais>>. Acesso em: 21 Set. 2019.
- COPEL. **Informações Usina Hidrelétrica de Salto Caxias**. Disponível em: <http://www.copel.com/pagcopel.nsf/secaos/noticias_eventos? OpenDocument>. Acesso em: 25 out. 2004.
- COPEL. Usina Hidrelétrica de Salto Caxias. **Instrumentos de auscultação das obras civis, valores de controle para leituras dos instrumentos**. Novembro de 1998.

COPEL. **Localização UHE Salto Caxias.** Disponível em: <https://www.copel.com/hpcopel/hotsite_caxias/localizacao.html>. Acesso em: 9 Set. 2019.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens.** São Paulo: Oficina de textos, 2014.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto.** 2ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

CUNHA, D. S. **Rompimento de barragem causa danos ambientais em Rondônia.** Jornal Folha de São Paulo. Disponível em: <<https://geomania2.blogspot.com/2013/11/o-rompimento-da-barragem-apertadinho-em.html>>.

DEPARTMENT OF ARMY - U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineering and design - structural deformation surveying.** US Army Corps of Engineers. Washington, 2002.

DEPARTMENT OF ARMY - U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Gravity Dam Design.** Washington: Engineer Manual, 1995a. 88p. 68.

DEPARTMENT OF ARMY – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEER., **Instrumentation of Embankment Dams and Levees.** Washington: Engineer Manual, 1995b.

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

FREITAS, C. M. de; SILVA, M. A. da; MENEZES, F. C. de. **O desastre na barragem de mineração da Samarco: fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres.** Cienc. Cult., São Paulo, v. 68, n. 3, p. 25-30, Sept. 2016.

G1. **Entenda os Impactos na Região da Tragédia de Brumadinho, 2 anos após seu rompimento.** Disponível em:< <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/stories/2021/01/25/tragedia-de-brumadinho-entenda-os-impactos-na-regiao-2-anos-apos-o-rompimento-da-barragem.ghtml>>.

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

GRAÇA, N.; FAGGION, P. **Validação da determinação de deslocamentos relativos em barragens utilizando Topografia e Medidores Triortogonais de Junta**. Rev. Bras. Geom., v.4, n. 2, p.89-98, mai/ago. 2016.

JERKE, A. **Análise do monitoramento geodésico da barragem da usina hidrelétrica Mauá com equipamentos de diferentes precisões e diferentes softwares de processamento**. Tese de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2019.

JORDAN, W. **Tratado general de topografia**. 6.ed. D. F. Mexico: G. Grill, 1981.

KAHMEN, H.; W. FAIG. **Surveying**. Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1988.

LASER SUL. **Prisma GPR 111**. Disponível em: <<http://www.lasersul.com/pagina.php?cont=produtosDet.php&id=2631&categoriaNome=Acess%F3rios&sel=3>>. Acesso em: 15 Out. 2019.

MATOS, S. F. **Avaliação de instrumentos para auscultação de barragem de concreto**. Estudo de caso: Deformímetros e tensômetros para concreto na barragem de Itaipu. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2002.

MELLO, F. M. **A importância dos reservatórios formados por barragens**. Comitê Brasileiro de Barragens, Rio de Janeiro, 2013.

MIRANDA, F. A., FAGGION P. L., VEIGA, L. A. **Método para o monitoramento de pontos em áreas instáveis**. Boletim de Ciências Geodésicas, sec. Artigos, Curitiba, v. 15, n° 4, p.498-513, outubro a dezembro, 2009.

MSIB. **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**. Ministério da Integração Nacional. Brasília, 2002.

NADAL, C. A., VEIGA, L. A. K., FAGGION, P. L., FREITAS, S. R. C. D, ZOCCOLOTTI FILHO, C. A., GRANEMANN, D. C., LOPES, C. R., SANTOS, D. P. DOS. **Integração da Auscultação Geodésica com a Instrumentação de Controle e Segurança da Barragem de Salto Caxias**. Relatório Técnico, Universidade Federal do Paraná, 2004.

OLIVEIRA, Wanderson Kleber de; ROHLFS, Daniela Buosi; GARCIA, Leila Posenato. **O desastre de Brumadinho e a atuação da Vigilância em Saúde**. Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília , v. 28, n. 1, e20190425, mar. 2019.

SEIRHMA, Secretaria da Infraestrutura, dos Recursos Hídricos e do Meio Ambiente. **Em Cuité: obra da barragem Retiro segue em ritmo acelerado**. Acesso em: <<https://paraiba.pb.gov.br/noticias/em-cuite-obra-da-barragem-retiro-segue-em-ritmo-acelerado>>. Acesso em 30 mar. 2020.

SILVEIRA, João F. A. **Instrumentação e Comportamento de Fundações de Barragens de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003.

SIGUEL, A. R.; FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K.; NADAL, C. A.; MATTOS, M. S.; SOARES, M. A. **Aplicação do método de irradiação tridimensional no monitoramento de barragens**. Bol. Ciênc. Geod., v.19, nº 3, p. 391 – 406, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2013.

SINAY NEVES. **LEICA TC407**. Disponível em: <<http://sinayneves.net/usados/estacao-total-leica-tc407/index.html>>. Acesso em 14 Out. 2019.

SOARES, M.A.; FERREIRA, E. S. F.; FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K.; NADAL, C. A.; DE FREITAS, S. R. C.; BOSZCZOWSKI, R. B.; **Integração da auscultação geodésica com a instrumentação de controle e segurança da barragem de Salto Caxias**. P&D - ANEEL, Florianópolis, 2005.

SUCI, F. M; **Estudo sobre a estabilidade da rede geodésica de monitoramento na UHE de Salto Caxias**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012.

UEMURA, S. **Instrumentos de avaliação e gestão de impactos gerados por ruptura de barragens**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

VEIGA, L.A.K.; ZANETTI, M. A. Z.; FAGGION, P. L.; **Fundamentos da Topografia**. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática. Curitiba, 2012.

ZUCULIN, S. **Curso Segurança de barragens – Módulo II – Unidade 2**. Creative Commons Atribuição, 2012.

WATANABE, P. S; BASTOS, P. S. S. **Concretos Especiais – Propriedades, Materiais e Aplicações**. Universidade Estadual Paulista. Departamento de Engenharia Civil. Relatório Final de Pesquisa. Bauru-SP. 2008.

ZOCOLOTTI FILHO, C. A. **Utilização de técnicas de poligonação de precisão para o monitoramento de pontos localizados em galerias de inspeção: estudo de caso da UHE Salto Caxias**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.