

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – *CAMPUS* MONTE CARMELO
CURSO DE ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA

JOÃO PAULO VIEIRA

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS TOPOGRÁFICOS PARA FINS DE
MONITORAMENTO DE BARRAGENS. ESTUDO DE CASO: UHE EMBORCAÇÃO**

MONTE CARMELO

2018-2

JOÃO PAULO VIEIRA

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS TOPOGRÁFICOS PARA FINS DE
MONITORAMENTO DE BARRAGENS. ESTUDO DE CASO: UHE EMBORCAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso, como exigência parcial para obtenção do Título de bacharel em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia, campus Monte Carmelo.

Orientador: Prof. Dr. George Deroco Martins.

Coorientador: Prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães.

MONTE CARMELO

2018-2

JOÃO PAULO VIEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso como exigência parcial para obtenção do Título de bacharel em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia, campus Monte Carmelo.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. George Deroco Martins (Orientador)
Universidade Federal de Uberlândia (FECIV/UFU)

Prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães (Coorientador)
Universidade Federal de Uberlândia (IG/UFU)

Prof. Msc. Vinícius Francisco Rofatto (Membro convidado)
Universidade Federal de Uberlândia (IG/UFU)

*Aos meus pais, Nivaldo e Rosanit,
meus irmãos, Jefferson, Gabriela e Mariana, e
meu querido bisavô Manoel (in memoriam)*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por tudo.

À minha família, pelo amor, fornecer sem querer em troca e ajuda nos momentos mais difíceis da minha vida e graduação, espero um dia corresponder e fazer jus a suas expectativas.

Aos meus colegas e amigos em geral, e especificamente: de curso, Gustavo e Mary por caminharem ao meu lado durante todo o tempo, sendo os alicerces para trabalhos de qualidade durante a faculdade; das antigas, Matheus e Hugo, pelas centenas de conversas e jogatinas sempre atuando como meu grupo de suporte.

A minha família de Grupiara - MG, Victor, Magaly e Wilton por me acolher e motivar, suprimindo a ausência física dos meus parentes.

Aos meus orientadores, prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães e prof. Dr. George Deroco Martins, pelos conselhos, confiança e constante disposição em ajudar em meu projeto.

Ao pessoal da CEMIG: Gerente de Manutenção de Ativos de Geração Triângulo, Luís Eduardo Ribeiro Rosa; Engenheiros de Segurança de Barragens, Msc. Paula Luciana Divino e Paulo José Alves de Lima; e Técnico Responsável pela Inspeção de Barragem, Altair Antônio da Silva; os quais deliberaram o objeto de estudo, e ainda, ao Instituto de Geografia (IG) e a Faculdade de Engenharia Civil (FECIV) pelo fomento do transporte, que sem esses, nada poderia ser feito.

E na reta final, agradecer a todos presentes em meu estágio em Foz do Iguaçu – PR, à divisão ODRE.CD pelos valiosos ensinamentos aplicados, ao Msc. Robinson Matte e meu supervisor Msc. João Paulo Bueno do Prado, pelas oportunidades únicas.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho diretamente ou indiretamente, seja por meio de apoio, sugestões ou críticas. Muito obrigado!

“Um homem cresce com a grandeza de sua missão.”

(Joseph Lynch, Assassins Creed: The Movie)

RESUMO

Este trabalho acadêmico teve por objetivo avaliar e comparar técnicas de auscultação geodésica que possam auxiliar no controle estrutural de barragens. O estudo consistiu no monitoramento a partir dos métodos da irradiação e variação de coordenadas na barragem da UHE Theodomiro Santiago, também conhecida como Emborcação, localizada entre os municípios de Araguari-MG e Catalão-GO. Os resultados encontrados pelo método da irradiação foram as coordenadas e deslocamentos dos pontos a jusante da barragem, os quais em sua maioria não se obteve valores aceitáveis, sendo esses acima do aceitável, tanto em relação ao desvio padrão obtido quanto o valor máximo de deslocamento de 15mm determinado pela bibliografia, fato esse devido ausência de redundância nas leituras. Já a variação de coordenadas se mostrou bastante promissora, pois grande parte dos seus deslocamentos horizontais foram inferiores 15mm, em contrapartida, existiu a dificuldade em determinar o desvio padrão para avaliar a confiabilidade do processo. Contudo, foi constatado a possibilidade da aplicação destes métodos, bem como indicadores metodológicos para sua correta aplicação em outros estudos de caso.

Palavras Chaves: Barragens; Levantamentos topográficos; Monitoramento de estruturas.

LISTA DE SIGLAS

ADAS	<i>Automated Data Acquisition System</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATR®	<i>Automatic Target Aiming</i>
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BNDS	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
LTGEO	Laboratório de Topografia e Geodésia
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
NBR	Norma Brasileira
PAEB	Plano de Ação Emergencial para Barragens
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representativo do método polar	22
Figura 2 – Esquema ilustrativo do método da variação das coordenadas	23
Figura 3 – Sistemática utilizada no monitoramento bidimensional da barragem da UHE Emborcação	27
Figura 4 – Croqui realizado para planejamento.....	28
Figura 5 – Construção da UHE Emborcação.....	29
Figura 6 – Vista frontal da barragem da UHE Emborcação.....	30
Figura 7 – Mapa de localização da barragem da UHE Emborcação	30
Figura 8 – Leica Nova MS50	31
Figura 9 – Prisma, bastão, bipé e base nivelante	32
Figura 10 – Adaptadores para o encaixe da estação e base nivelante no marco de centragem forçada	32
Figura 11 – Erros verificados e ajustados eletronicamente	34
Figura 12 – Localização dos marcos de centragem forçada na UHE Emborcação	36
Figura 13 – Distribuição dos pontos em bom estado da UHE Emborcação.....	38
Figura 14 – Levantamento pelo método de irradiação nos alvos a montante.....	40
Figura 15 – Exemplo do formato de dados para o cálculo de coordenadas	41
Figura 16 – Esquema representativo dos procedimentos executados para o cálculo das coordenadas pelo método da irradiação.....	42
Figura 17 – Esquema representativo dos procedimentos executados para o cálculo das coordenadas pelo método da variação de coordenadas	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas topográficas dos pilares geodésicos T21, MIRANTE e T31	37
Tabela 2 – Coordenadas dos pontos a serem monitorados na barragem	38
Tabela 3 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas pelo método da irradiação a partir do marco de centragem forçada T31 na Época 01	46
Tabela 4 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada T31 na Época 02	47
Tabela 5 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada T31 na Época 03	47
Tabela 6 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada MIRANTE na Época 01.....	48
Tabela 7 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada MIRANTE na Época 02.....	48
Tabela 8 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada MIRANTE na Época 03.....	49
Tabela 9 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada T21 na Época 01	50
Tabela 10 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada T21 na Época 02	50
Tabela 11 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada T21 na Época 03	51
Tabela 12 – Variações das coordenadas entre as épocas CEMIG-01, CEMIG-02 E CEMIG-03 obtidos pelo T31	52
Tabela 13 – Variações das coordenadas entre as épocas CEMIG-01, CEMIG-02 E CEMIG-03 obtidos pelo MIRANTE	52
Tabela 14 – Variações das coordenadas entre as épocas CEMIG-01, CEMIG-02 E CEMIG-03 obtidos pelo T21	53
Tabela 15 – Coordenadas médias dos pontos de monitoramento da Época 01 em relação aos marcos T31, MIRANTE e T21.....	54
Tabela 16 – Coordenadas médias dos pontos de monitoramento da Época 02 em relação aos marcos T31, MIRANTE e T21.....	54
Tabela 17 – Coordenadas médias dos pontos de monitoramento da Época 03 em relação aos marcos T31, MIRANTE e T21.....	55

Tabela 18 – Deslocamentos calculados a partir dos pontos T31 e MIRANTE em relação a referência da CEMIG nas épocas 01, 02 e 03 de levantamento.	56
Tabela 19 – Deslocamentos calculados a partir dos pontos T31 e T21 em relação a referência da CEMIG nas épocas 01, 02 e 03 de levantamento.	57
Tabela 20 – Deslocamentos calculados a partir dos pontos T21 e MIRANTE em relação a referência da CEMIG nas épocas 01, 02 e 03 de levantamento.	57
Tabela 21 – Resíduos calculados a partir da diferença entre a média das coordenadas e as coordenadas obtidas nos pilares T31, MIRANTE e T21 para a Época 01	66
Tabela 22 – Resíduos calculados a partir da diferença entre a média das coordenadas e as coordenadas obtidas nos pilares T31, MIRANTE e T21 para a Época 02	66
Tabela 23 – Resíduos calculados a partir da diferença entre a média das coordenadas e as coordenadas obtidas nos pilares T31, MIRANTE e T21 para a Época 03	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Erros instrumentais, efeitos e como podem ser eliminados.....	35
Quadro 2 – Campanhas de monitoramento na UHE Emborcação	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variações das coordenadas X nas Épocas de levantamento 01 02 e 03 em relação a referência CEMIG, Intersecção T31/MIRANTE	58
Gráfico 2 – Variações das coordenadas Y nas Épocas de levantamento 01 02 e 03 em relação a referência CEMIG, Intersecção T31/MIRANTE	58
Gráfico 3 – Variações das coordenadas X nas Épocas de levantamento 01 02 e 03 em relação a referência CEMIG, Intersecção T31/T21	59
Gráfico 4 – Variações das coordenadas Y nas Épocas de levantamento 01 02 e 03 em relação a referência CEMIG, Intersecção T31/T21	59
Gráfico 5 – Variações das coordenadas X nas Épocas de levantamento 01 02 e 03 em relação a referência CEMIG, Intersecção MIRANTE/T21	59
Gráfico 6 – Variações das coordenadas Y nas Épocas de levantamento 01 02 e 03 em relação a referência CEMIG, Intersecção MIRANTE/T21	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3	JUSTIFICATIVA	16
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
4.1	Hidrelétricas brasileiras na geração de energia.....	17
4.2	Barragens	18
4.3	Monitoramento de barragens	19
4.4	Métodos de geodésicos e topográficos aplicados ao monitoramento de grandes estruturas.....	21
<i>4.4.1</i>	<i>Método da irradiação 2D</i>	<i>21</i>
<i>4.4.2</i>	<i>Método da variação das coordenadas</i>	<i>23</i>
4.5	Erros e incertezas em medições experimentais	24
<i>4.5.1</i>	<i>Propagação de incertezas</i>	<i>25</i>
5	MATERIAL E MÉTODOS	26
5.1	Área de estudo.....	28
5.2	Material	31
<i>5.2.1</i>	<i>Estação total MS50.....</i>	<i>33</i>
5.3	Campanhas de monitoramento da UHE Emborcação	35
5.4	Rede geodésica de monitoramento da barragem da UHE Emborcação	35
5.5	Levantamento bidimensional dos pontos de monitoramento	37
<i>5.5.1</i>	<i>Distribuição dos pontos instalados e prismas refletores</i>	<i>37</i>
<i>5.5.2</i>	<i>Irradiação 2D e variação de coordenadas.....</i>	<i>39</i>
5.6	Cálculo das coordenadas bidimensionais	40
<i>5.6.1</i>	<i>Irradiação 2D.....</i>	<i>41</i>
<i>5.6.2</i>	<i>Variação de Coordenadas.....</i>	<i>43</i>
5.7	Validação da precisão e deslocamento dos pontos monitorados	45
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	61
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE	66
	ANEXO.....	68

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é conhecido mundialmente por sua diversidade de recursos naturais, em que a água é um de seus principais. O país possui 12% das reservas de água doce do planeta, a qual é usada para diversos fins, tais como, na agricultura, abastecimento humano, industrial, saneamento e geração de energia (Agência Nacional de Águas – ANA, 2009).

Por se tratar de um país em desenvolvimento, o Brasil se encontra em uma fase de crescimento econômico e populacional, em que o uso inteligente e sustentável da água é essencial para um meio ambiente ecologicamente equilibrado. Para que isso ocorra, são necessários estudos que consigam administrar os recursos hídricos de forma correta, pois os mesmos, não costumam estar disponíveis sazonalmente para todos, sendo necessário armazená-los para se utilizar, e quando em grande escala, se faz o uso de barragens, regularizando sua vazão (MELLO, 2013).

Barragens são estruturas de engenharia civil que propiciam a detenção de grandes quantidades de água, em que o tamanho do reservatório é determinado em função do uso máximo de benefícios que o mesmo pode proporcionar. Em suma, existe uma grande seriedade para a implementação de sistemas de monitoramento estrutural, que tem sido reconhecida pelas unidades administrativas devido a diversos acontecimentos causados por quedas deste tipo de estrutura, que se não controlados provocam danos à população do entorno, perdas materiais, econômicas ao empreendedor e desastres ambientais (CAMPAGNOLI e DINIZ, 2012). Esses fatores admitem a necessidade de estudos geotécnicos e geodésicos aplicados ao monitoramento do comportamento dinâmico dessas estruturas, com o intuito de prevenir acidentes.

Sendo assim, surgiu a instrumentação de auscultação, a qual é um processo de observação, detecção e determinação do desempenho e tendência de comportamento de uma barragem e suas estruturas secundárias. Pode ser feita por meio de instrumentação e inspeções visuais, que é o processo de auscultação feita por meio de vistorias periódicas as estruturas do barramento (MACHADO, 2007).

Com a evolução tecnológica no início do século XXI, no caso específico do monitoramento estrutural para fins de prevenção e segurança, surgiu a necessidade de detectar qualquer anomalia no comportamento das estruturas e fundações de uma barragem de forma

imediate e automática para a execução do Plano de Ação Emergencial para Barragens¹ (PAEB). Para isso ser possível, surgiu o *Automated Data Acquisition System* (ADAS) o qual tem o intuito de automatizar a aquisição de dados, utilizando até satélites espaciais para a sua transmissão. Este sistema, contribui expressivamente na parte imediata da reação, onde ganham destaque o uso de fibras óticas e avanços de comunicação sem fio (RIBEIRO, 2008).

O uso de técnicas topográficas e geodésicas são importantes para auxiliar no monitoramento dessas estruturas, pois se obtém observações de forma direta, e confiáveis quando coletadas corretamente (NADAL *et al.*, 2015). Levantamentos desta natureza são tratados pela NBR 13133/1994 como levantamentos de Obras-de-Arte Especiais, ou convencionalmente, levantamento *as-built*, em que o intuito é descrever a morfologia da feição levantada (ABNT, 1994).

O monitoramento e avaliação de uma barragem, consiste na análise dos dados das medições das grandezas físicas de interesse fornecidas pela instrumentação por um período de tempo, as quais refletem o comportamento da estrutura e de suas fundações a médio e longo prazo, isso resulta em uma variação do comportamento dinâmico (RIBEIRO, 2008; FAZAN, 2010; SIGUEL, 2013).

A avaliação do comportamento de uma barragem é feita pela interpretação e análise dos dados obtidos no monitoramento. Cabe-se também analisar a coleta desses dados e confirmarem se os resultados obtidos são consistentes e adequados para traduzir o seu comportamento. Torna-se necessário, que a interpretação seja realizada *a posteriori* ao armazenamento das leituras, possibilitando detectar rapidamente qualquer comportamento anormal (RIBEIRO, 2008).

A fim de se realizar o monitoramento de grandes estruturas, como no caso das barragens, diversos parâmetros metodológicos devem ser analisados, principalmente no que se refere à relação a confiabilidade no processo. Pois a falta deste, pode implicar em consequências graves para áreas sujeitas a interferências por esses empreendimentos. Para a mitigação destes danos, existem diversas metodologias aplicáveis, sendo estas, comumente vistas na literatura e outras tendentes ao desuso. Neste contexto, existe uma necessidade em determinar um procedimento lógico dentre vários para este fim, seja este, ideal para cada estudo de caso.

¹ Documento técnico que identifica situações de emergência que possa pôr em risco a integridade da barragem, assim como, ações necessárias nesses casos, definindo também, os agentes a serem notificados de tais ocorrências (BRASIL, 2010).

A seriedade da implementação de sistemas de monitoramento estrutural, tem sido reconhecida pelas unidades administrativas devido a acontecimentos causados por quedas de estruturas de engenharia civil, como barragens, resultando em danos à população do entorno, perdas materiais, econômicas ao empreendedor e desastres ambientais (CAMPAGNOLI e DINIZ, 2012). Cita-se como exemplo o rompimento da Barragem de Rejeitos do Fundão em Mariana-MG em 2014, a qual despejou cerca 35 milhões de metros cúbicos (m³) de lama com fragmentos de minério, inviabilizando uso do solo bem como a fauna e flora da região afetada.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho foi realizar o monitoramento estrutural do deslocamento planimétrico da barragem da UHE Emborcação por meio de técnicas de levantamentos topográficos convencionais.

2.2 Objetivos específicos

Deste modo, para alcançar o objetivo geral apresentado, os objetivos específicos são:

- ✓ Realizar o monitoramento horizontal dos pontos onde são instalados os prismas na barragem, utilizando os métodos da irradiação e variação de coordenadas e compará-los;
- ✓ Desenvolver uma rotina em ambiente de planilha eletrônica para calcular as coordenadas bidimensionais dos pontos de monitoramento; e
- ✓ Avaliar o deslocamento temporal dos pontos de apoio presentes na barragem.

3 JUSTIFICATIVA

Sabe-se que estruturas de grande porte, sofrem deslocamentos e deformações ao longo do tempo, devido a diversos agentes naturais e antrópicos, tais como: fatores climáticos, marés, vibrações e recalques. Deste modo, variações na estrutura podem ocorrer em sua posição inicial em repouso, caracterizando um deslocamento, ou na geometria interna ou externa, representando deformações na estrutura (FAZAN, 2010).

Ainda segundo Fazan (2010), todas as barragens, sejam elas, construídas de terra, enrocamento e concreto estão constantemente sujeitas a deslocamentos e deformações, em virtude de sua própria natureza e dimensões. Portanto, é importante investigar detalhadamente o fenômeno e o emprego de novas tecnologias e metodologias que possa contribuir para o monitoramento adequado de barragens (RIBEIRO, 2008).

Outro aspecto importante é que, grande parte dos estudos de monitoramento em barragens são realizados em estruturas de concreto, podendo ser vistos nas literaturas de Fazan (2010), Muguio (2012) e Siguel (2013). Já o barramento da UHE² Emborcação, é composto exclusivamente por zonas (camadas) de solo-enrocamento com poucos estudos nesses casos. Além dessa escassez, quando empregada a topografia na auscultação dessas obras, é eventualmente realizado o método da irradiação, e nesse estudo de caso, propõe-se a solução utilizando a variação de coordenadas, sugerindo uma nova possibilidade para o acompanhamento da dinâmica dessas estruturas.

Por fim, na tentativa de conhecer melhor a significância das eventuais deformações de barragens, monitorando seus recalques para a mitigação de possíveis rompimentos, justifica-se a necessidade de explorar a aplicação de técnicas topográficas na identificação de deslocamentos de tais estruturas.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Hidrelétricas brasileiras na geração de energia

A produção da energia hidrelétrica necessita da corroboração de diversos fatores sendo eles, a vazão do rio, a quantidade de água disponível em uma série sazonal, bem como os desníveis do relevo, que podem ser naturais, ou artificiais, como quedas d'água e transposições respectivamente (ANEEL, 2008).

As unidades produtoras de energia, ou centrais hidrelétricas, têm por composição fundamental a barragem, reservatório, casa de força, circuito hidráulico e subestação elevadora,

² UHE (Usina Hidrelétrica de Energia) é toda usina hidrelétrica a qual, sua potência instalada seja superior a 30 MW (trinta megawatts), e só podem ser construídas por meio de outorga, sendo necessário, a concessão dada pelos agentes responsáveis, em processo de licitação pública. (Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 2003).

também, entre outros, dispositivos essenciais à segurança, controle e manutenção (TIAGO FILHO *et al.*, 2008).

Atualmente no Brasil, mais de 900 barragens são monitoradas pela ANEEL, dentre essas, 220 constituem-se de usinas hidrelétricas em operação, as quais representam aproximadamente 70% de toda a potência instalada, considerando-a, a principal fonte de abastecimento hidráulico e energético do país (ANEEL, 2018). Desta forma, o controle sobre a operação nessas unidades estruturais, é de suma importância para assegurar as necessidades da população, bem como, os aspectos ambientais em seu entorno.

4.2 Barragens

Por definição, barragem, pode ser entendida como qualquer estrutura que, em um curso temporário ou permanente, reserve substancias líquidas a montante, para os fins de acumulação ou retenção, em que a mesma, edificada em cota altimétrica superior à da topografia original, e composta pelo barramento e estruturas associadas (BRASIL, 2010).

O objetivo destes aproveitamentos hidráulicos, é permitir a formação de um reservatório, por meio da interrupção do curso normal de um rio (SIGUEL, 2013). Essas obras, têm por função, formar o desnível necessário para que haja a geração de energia, admitindo a captação da água do reservatório em volume adequado em limites aceitáveis de outorga, regularizando a vazão do rio em períodos de estiagem ou chuva (BRASIL, 2010)

A construção de barragens, necessita de um conjunto de estudos, previamente estabelecidos, sendo estes: material e métodos construtivos, especificações técnicas e econômicas, localização topográfica, aspectos geológicos e ambientais, bem como, o controle de segurança durante a sua execução (ANA, 2016). Após esses estudos, principalmente o de viabilidade técnica, é escolhido o tipo de construção que significará menores investimentos.

Esses barramentos, podem ser construídos com diferentes materiais, tais como: terra, rocha, concreto ou madeira. Consiste nas mais utilizadas, as obras de concreto (convencional e compactado a rolo) e como é o caso da barragem da UHE Emborcação, construída por aterro (terra ou enrocamento), especificamente de enrocamento zonado com núcleo de argila.

O aterramento é uma técnica construtiva que visa incorporar vários tipos de solos de diversas granulometrias, que incluem, as argilas, utilizadas na impermeabilização, areias e britas, nas camadas de compactação filtrantes, e enrocamentos, que em um todo, é destinado à estabilização (BRITO, 2006). Esses fragmentos, são espalhados e compactados por meio de equipamentos de construção, tais como: tratores de esteira, retroescavadeiras, rolo compactador

e moto niveladoras, que por sua vez, distribuem as rochas, variando de acordo com cada tipo de projeto. Segundo Costa e Lança (2001), podem ser:

- Barragem de aterro homogêneo: composta basicamente por um único tipo de solo;
- Barragem zonada: propõe de acordo com o tipo de solo no local, as áreas a serem utilizadas o melhor tipo de material para que se obtenha eficiência na estabilização;
- Barragem com núcleo: este tipo, possui em seu interior, camadas de argila ou concreto; e
- Barragem de enrocamento: consiste no tipo mais conveniente de barramento, a mesma, é formada por fragmentos maciços de rochas compactadas.

O método da barragem de enrocamento, é um dos mais usuais na construção de barragens, e que, quando bem executado, atribui-se grande resistência, diminui a deformidade e permeabilidade do barramento por meio da diminuição do volume de vazios (BRITO, 2006). A aplicação deste método permite, na maioria dos casos, uma redução de custos em relação a logística de transporte, pois, utiliza dos próprios fragmentos de rocha disponíveis no local da obra.

Segundo Costa e Lança (2001), além das referidas anteriormente, essas barragens, mostram-se vantajosas, por diversas razões, as quais são:

- Os materiais não são tão criteriosos quanto ao tipo;
- Se bem planejadas, podem ser utilizadas em quase todas as fundações, sendo compatível com uma enorme variedade de solos;
- Não exige demanda de profissionais muito especializados;
- Sua mão de obra é geralmente composta pelos moradores locais, o que impacta positivamente na economia da região; e
- É o principal plano de ação quando uma região é afetada por secas, sendo utilizada para regularização de vazão dos rios, contribuindo para abastecimento e agricultura locais.

4.3 Monitoramento de barragens

Segundo Siguel (2013), para compreensão sobre o monitoramento de barragens, é importante que haja o entendimento acerca das palavras instrumentação e auscultação,

definidas no livro “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas” elaborado pela ELETROBRÁS³ no ano de 2003:

Auscultação: É o conjunto de métodos de observação do comportamento de uma determinada obra de engenharia, com o objetivo de controlar as suas condições de segurança, comprovar a validade das hipóteses e dos métodos de cálculo utilizados no projeto, verificar a necessidade da utilização de medidas corretivas, fornecer subsídios para a elaboração de novos critérios de projeto, etc.; e

Instrumentação: Refere-se ao conjunto de dispositivos instalados nas estruturas e em suas fundações objetivando monitorar seu desempenho através de medições de parâmetros, cujos resultados, devidamente analisados e interpretados, servirão para avaliar suas condições de segurança.

Os métodos de auscultação de barragens definem a instrumentação que será utilizada para este fim. Portanto, no monitoramento estrutural, são coletados dados por meio de equipamentos apropriados, ao longo do tempo, seguido de análises e interpretação de resultados com vistas a detectar alteração nas grandezas físicas de interesse. Esse processo permite acompanhar o comportamento de estrutura da barragem e das suas fundações a médio e longo prazo (FAZAN, 2010).

Segundo o *Department of The Army* (1994), dos Estados Unidos, classifica as técnicas de medição e instrumentação para o monitoramento geométrico das deformações de estruturas em dois grupos:

- Levantamentos geodésicos e topográficos: levantamentos terrestres, posicionamento por satélites, fotogrametria e algumas técnicas especiais (interferometria, nivelamento hidrostático e outros); e
- Medidas ou técnicas geotécnicas e estruturais: análises de deformações locais, com extensômetros, inclinômetros, fios de prumo, etc.

O método geodésico, mostra-se muito útil e fornece uma visão global de uma deformação. Enquanto os métodos não geodésicos são benéficos para prover medidas em áreas específicas do barramento (CHAVES, 1994).

Segundo Chaves (1994), destacam-se algumas vantagens dos métodos geodésicos:

- Possuem o esquema próprio para a verificação dos resultados e são capazes de avaliar qualidade das medidas; e

³ Companhia do setor energético, a ELETROBRÁS é controlada pelo governo brasileiro, e atua nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

- Os métodos são versáteis, se adequam a qualquer meio ambiente e situação de operação.

Em suma, monitorar uma estrutura geodesicamente corresponde à determinação e comparação de coordenadas de pontos obtidos em duas ou mais épocas (SOARES, *et al.* 2004). Desta forma, devem-se realizar campanhas periódicas de observações, as quais permitem a verificação de variações significativas nas coordenadas dos pontos monitorados, que se devidamente analisadas, podem indicar possíveis deslocamento da estrutura monitorada.

4.4 Métodos de geodésicos e topográficos aplicados ao monitoramento de grandes estruturas

No que se trata de levantamentos geodésicos, alguns métodos se mostram viáveis para o monitoramento de grandes estruturas, entre eles, citam-se o nivelamento geométrico de primeira ordem, irradiações, triangulações, trilaterações, posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e levantamento gravimétrico (SIGUEL, 2013). A seguir, serão descritas as metodologias empregadas no monitoramento da barragem da UHE Emborcação.

4.4.1 Método da irradiação 2D

O método da irradiação ou comumente chamado em algumas literaturas de polar, consiste na determinação das coordenadas de um ponto. Este que, pode ser utilizado quando deseja-se obter resultados em três dimensões (X, Y, Z)⁴.

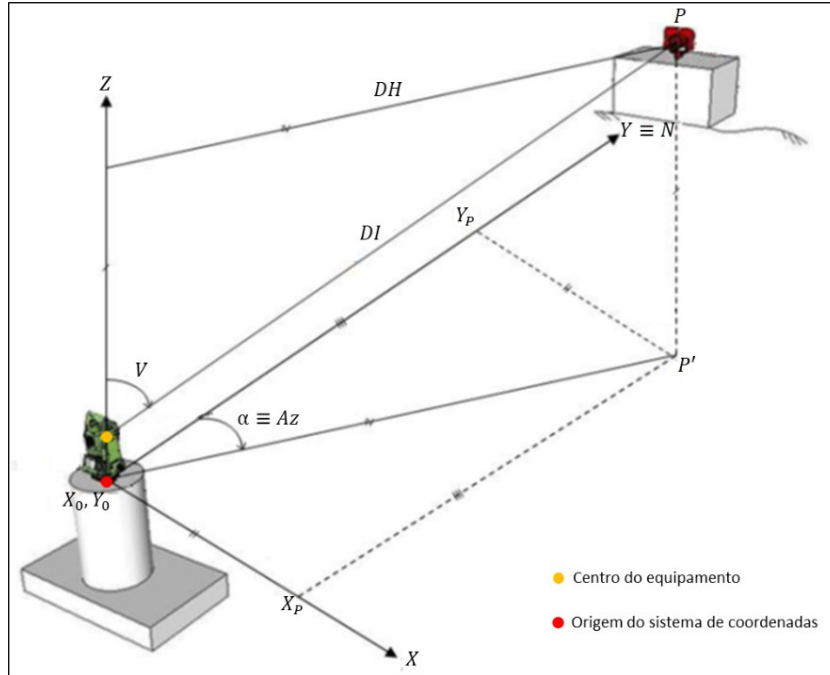
As variáveis medidas são ângulos horizontais, ângulos verticais e distâncias dos pontos de interesse em relação a uma distância conhecida, tomada como referência. As observações podem ser realizadas empregando-se limbos horizontais ou verticais, sendo estes mecânicos ou eletrônicos, métodos taqueométricos, distanciômetros que dependendo do modelo, podem ou não realizar observações em refletores posicionados nos pontos de interesse (VEIGA, ZANETTI e FAGGION, 2012).

Nos sistemas de coordenadas cartesianas bidimensionais (X,Y), trabalha-se com coordenadas polares. Para estas coordenadas são determinados: ângulo horizontal (α) medido

⁴ Consiste em três eixos de retas orientadas, sendo estas ortogonais entre si, as quais formam um sistema de coordenadas tridimensionais ortogonal. São comumente representadas por X, Y e Z, onde X é denominado de abscissa, Y de ordenada e Z de cota (MIRANDA; FAGGION; VEIGA, 2009).

no plano XY, ângulo zenital (V) medido no plano vertical que contém o eixo Z e o ponto observado, o qual é necessário para a obtenção da distância horizontal (DH), e a distância inclinada (DI) medida do equipamento ao ponto considerado (Figura 1).

Figura 1 – Esquema representativo do método polar



Fonte: Adaptado de SIGUEL (2013, p. 36).

Em análise a Figura 1, as coordenadas cartesianas bidimensionais dos pontos de interesse são obtidas por meio das equações (1) e (2):

$$X_P = X_0 + DH_{0 \rightarrow P} \times \text{sen}(Az_{0 \rightarrow P}) \quad (1)$$

$$Y_P = Y_0 + DH_{0 \rightarrow P} \times \text{cos}(Az_{0 \rightarrow P}) \quad (2)$$

Onde:

X_0, Y_0 – Coordenadas do ponto de origem;

X_P, Y_P – Coordenadas do ponto P no referencial local;

$DI_{0 \rightarrow P}$ – Distância inclinada entre a origem e o ponto;

$V_{0 \rightarrow P}$ – Ângulo zenital entre a origem e o ponto;

$DH_{0 \rightarrow P}$ – Distância horizontal entre a origem e o ponto = $DI_{0 \rightarrow P} \times \text{sen}(V_{0 \rightarrow P})$; e

$Az_{0 \rightarrow P}$ – Azimute entre a origem e o ponto (considerando que o eixo Y está orientado para a direção norte).

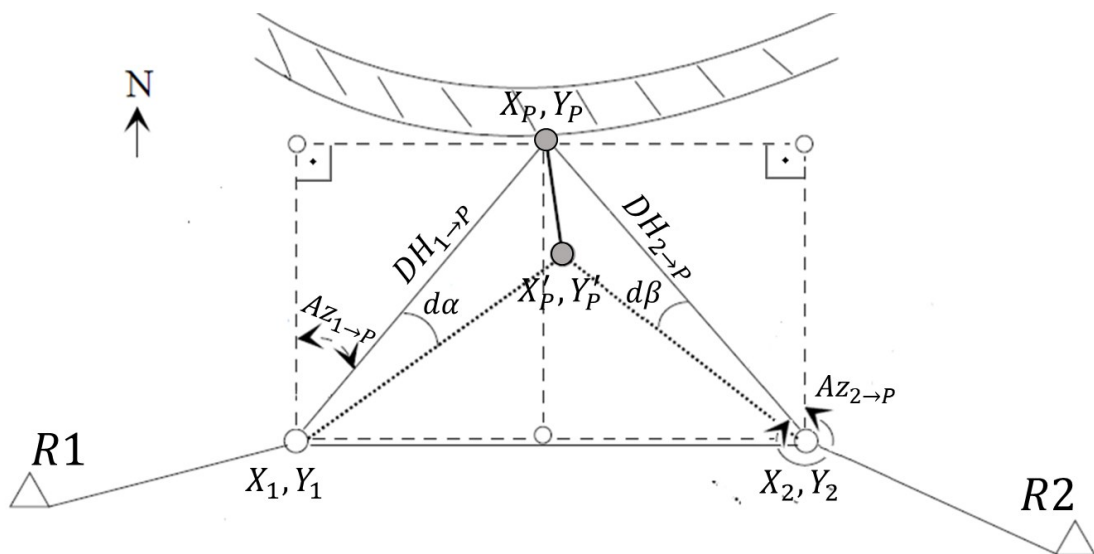
Ao se obter as coordenadas dos respectivos pontos que se pretende monitorar e compará-las entre si no decorrer de n épocas pode-se observar a tendência e comportamento cinético do corpo estrutural estudado.

4.4.2 Método da variação das coordenadas

O método da variação das coordenadas, consiste na determinação do deslocamento de pontos por processo analítico em função da variação angular entre duas medidas efetuadas a partir de estações de referência em épocas distintas.

As variáveis a serem determinadas são os ângulos no plano (X, Y) entre as estações e o ponto a ser observado, e as distâncias a partir de coordenadas de referência. Com isso, por meio de deduções diferenciais e comparações determina-se o deslocamento. (Figura 2).

Figura 2 – Esquema ilustrativo do método da variação das coordenadas



Fonte: Adaptado de CORRÊA (2012, p. 102).

O número N de interseções que se consegue obter os deslocamentos para um mesmo ponto P quando calculados por n estações de referências, é indicado na equação (3) a seguir:

$$N = \frac{n \times (n - 1)}{2} \quad (3)$$

Partindo-se do sistema cartesiano, temos que:

$$\operatorname{tg}(Az_{1 \rightarrow P}) = \frac{X_P - X_1}{Y_P - Y_1} \quad (4)$$

$$\operatorname{tg}(Az_{2 \rightarrow P}) = \frac{X_P - X_2}{Y_P - Y_2} \quad (5)$$

Tal que:

$Az_{1 \rightarrow P}$ e $Az_{2 \rightarrow P}$ – Azimute entre os pontos de origem ao ponto P;

X_1, Y_1 e X_2, Y_2 – Coordenadas dos pontos de origem;

X_P, Y_P – Coordenadas do ponto P no referencial local;

Ao realizar uma série de deduções a partir das equações (4) e (5) as quais podem serem vistas com mais detalhes em CORRÊA (2012, p. 103), encontra-se que, o deslocamento é dado por pelas equações (6) e (7) a seguir:

$$dX_P = \frac{\frac{d\beta'' \times DH_{2 \rightarrow P}}{206265} + \operatorname{sen}(Az_{2 \rightarrow P}) \times dY_P}{\cos(Az_{2 \rightarrow P})} \quad (6)$$

$$dY_P = \frac{\frac{d\beta'' \times DH_{2 \rightarrow P}}{206265} \times \cos(Az_{1 \rightarrow P}) - \frac{d\alpha'' \times DH_{1 \rightarrow P}}{206265} \times \cos(Az_{2 \rightarrow P})}{\operatorname{sen}(Az_{1 \rightarrow P} - Az_{2 \rightarrow P})} \quad (7)$$

Onde:

dX_P, dY_P – Deslocamento em metros (m) das coordenadas X_P, Y_P entre as épocas;

$d\alpha'', d\beta''$ – Diferença entre os azimutes em segundos obtidos entre as n épocas

$(Az_{1 \rightarrow P}^1 - Az_{1 \rightarrow P}^n, Az_{2 \rightarrow P}^1 - Az_{2 \rightarrow P}^n)$ respectivamente;

$DH_{1 \rightarrow P}, DH_{2 \rightarrow P}$ – Distâncias entre as coordenadas de origem ao ponto P;

Ao se efetuar diferentes medidas angulares ao longo de n épocas pode-se observar a tendência e comportamento dinâmico do corpo estrutural estudado a partir de uma época utilizada como referência.

4.5 Erros e incertezas em medições experimentais

No que se trata de um resultado obtido por meio da medição de uma grandeza física, é imprescindível que haja alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma que o seu usuário possa avaliar sua confiabilidade (LIMA JÚNIOR, 2012). Segundo Gallas (2009),

sem essa indicação de confiabilidade, os resultados da medição não podem ser comparados, seja entre eles mesmos ou com valores de referência obtidos numa especificação ou norma. Portanto, para que haja um procedimento prontamente implementado, facilmente compreendido e de aceitação geral é necessário caracterizar a qualidade da medição, ou seja, avaliar e expressar sua incerteza.

De acordo com a ABNT (2003) a incerteza na medição é representada por uma incógnita, associada a resultante de uma medida, a qual caracteriza a variabilidade dos valores que podem ser essencialmente agregados a um mensurando. Conforme Gallas (2009) uma avaliação e expressão da incerteza de medição permite o significado de um vasto espectro de resultados de medições na ciência, comércio, indústria, regulamentação e engenharia fosse prontamente compreendido e apropriadamente interpretado.

Contudo, as observações realizadas pelo homem, sofrem constantes flutuações probabilísticas⁵ caracterizadas pela incerteza dos “erros de medida”. Esses erros podem não ocorrer necessariamente por meio de falha humana (erro grosseiro), mas também, devido à imperfeição do equipamento (erros sistemáticos) e das condições ambientais (erros aleatórios) nas quais efetuam-se as mensurações. Devido a esses contratemplos, é necessário em determinados casos que haja a redundância das observações o que gera a problemática de se obter a partir do conjunto de observações, um resultado que seja único, e seja este, representado com confiança (KLEIN, 2012; GEMAEL, MACHADO e WANDRESEN, 2015).

4.5.1 *Propagação de incertezas*

No ramo da Topografia, ao se determinar coordenadas por meio de métodos indiretos utiliza-se ângulos e distâncias coletados em campo. No entanto, por mais que se tenha cuidado ao se efetuar tais medições, erros ainda estarão incumbidos nas observáveis, fazendo com que surja a problemática de se determinar a incerteza final a partir de intermediárias por meio da propagação de variância (TOGINHO FILHO e ANDRELLO, 2009).

Na propagação, as incertezas em observáveis são também denominadas grandezas de entrada, enquanto a de saída é a incerteza resultante a qual pode ser determinada por meio da equação (8) a seguir:

⁵ Flutuação probabilística se trata de uma variação aleatória na medida, que pode resultar em qualquer valor dentro de um intervalo determinado, com uma probabilidade de ocorrência.

$$\sigma_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial a_1}\right)^2 \times (\sigma_{\bar{a}_1})^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial a_2}\right)^2 \times (\sigma_{\bar{a}_2})^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial a_n}\right)^2 \times (\sigma_{\bar{a}_n})^2} \quad (8)$$

Onde:

R – Equação em função dos parâmetros associados a incerteza;

$\frac{\partial R}{\partial a_n}$ – Derivada parcial da equação R em função de n parâmetros associados a incerteza.

$\sigma_{\bar{a}_n}$ – Desvio padrão amostral médio da observação n ; e

σ_R – Desvio padrão resultante.

Em que, o desvio padrão amostral da observação é determinado pela equação (9) a seguir:

$$\sigma_{a_n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (9)$$

Tem-se que:

n – Número de observações;

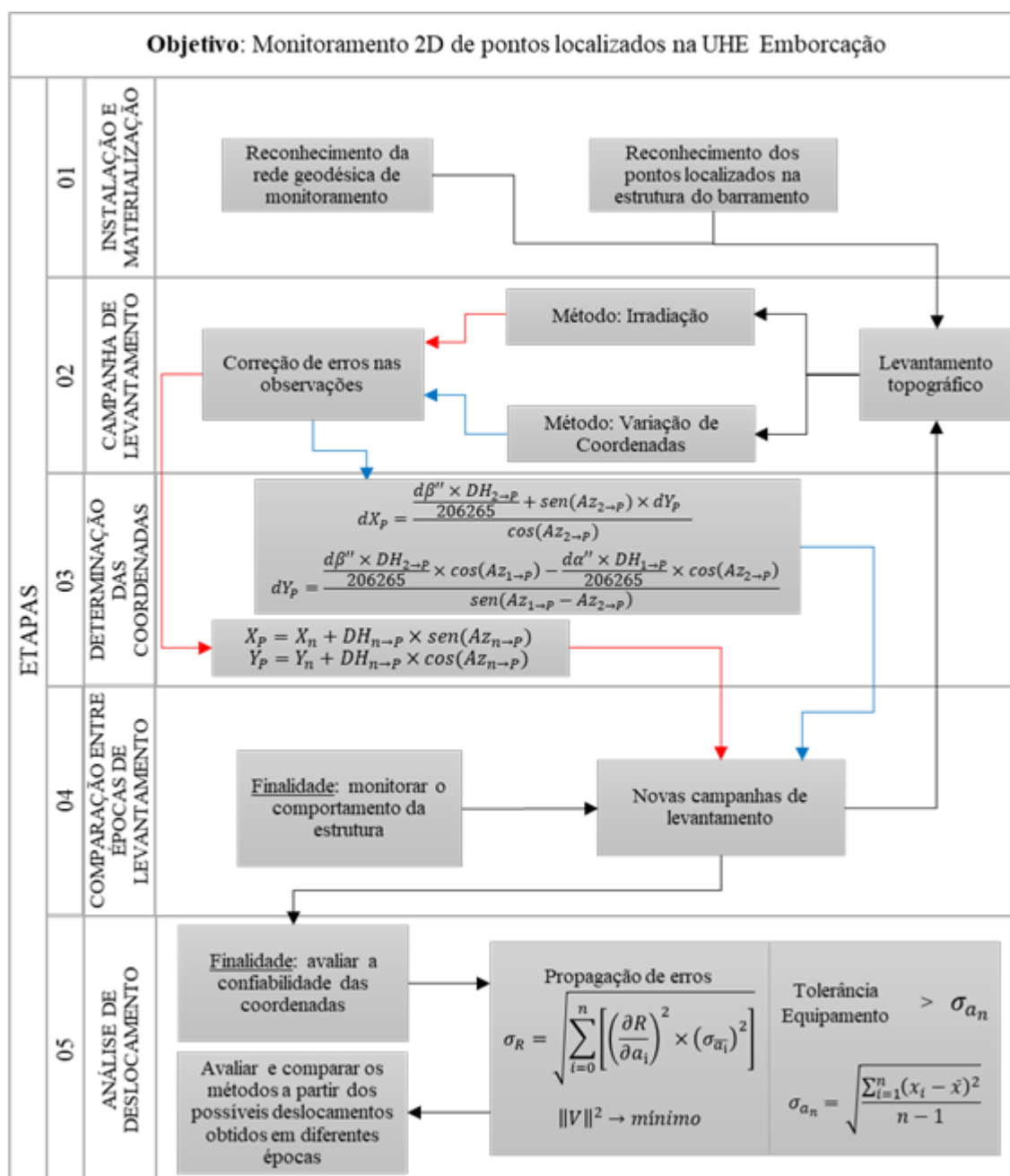
x_i – Valor da observação n ; e

$\bar{x}$ – Valor médio da observação.

5 MATERIAL E MÉTODOS

Para estruturação da lógica utilizada na metodologia, foi elaborado um fluxograma aplicado no desenvolvimento do projeto, o qual é apresentado na Figura 3. Todas as etapas foram seguidas visando o processo do monitoramento bidimensional da barragem da UHE Emborcação.

Figura 3 – Sistemática utilizada no monitoramento bidimensional da barragem da UHE Emborcação



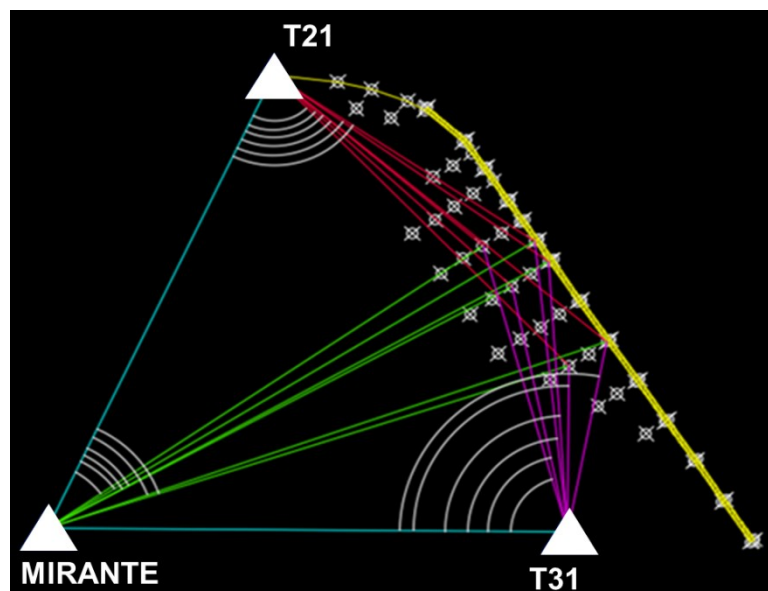
Fonte: O autor.

A sistemática utilizada divide o esquema do monitoramento em seis etapas, cada qual, possui características específicas, de forma explicativa, pontuam-se as abaixo:

01 – Instalação e materialização: constitui no reconhecimento da área a ser monitorada, sendo necessário o estabelecimento dos pilares da rede geodésica e pontos relativos ao

monitoramento na barragem essenciais ao planejamento dos levantamentos topográficos. Para este, foi realizado um croqui (Figura 4) após a primeira visita de campo;

Figura 4 – Croqui realizado para planejamento



Fonte: O autor.

02 – Campanha de levantamento: consistiu na realização dos métodos fundamentados nos itens 4.4.1 e 4.4.2 deste trabalho, os quais resultaram nos dados tabulados para a etapa posterior;

03 – Determinação das coordenadas: cálculo das coordenadas X, Y dos pontos de interesse na barragem;

04 – Comparações entre épocas de levantamento: comparação de cada par de coordenada por seu respectivo método em períodos distribuídos sazonalmente do início até a entrega final do projeto; e

05 – Análise de deslocamento: verificação e validação da variação posicional por meio da propagação de incertezas e análise dos resultados e resíduos obtidos entre épocas.

5.1 Área de estudo

A UHE Emborcação é uma usina da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), e que também, está atualmente sob sua concessão, cujo projeto, fornece uma potência final de 1.136 MW, sendo este iniciado sua operação em julho de 1982 (ELETROBRÁS, 1989). A UHE Emborcação foi construída no Rio Paranaíba, na divisa dos municípios de Araguari (MG) e

Catalão (GO), e se situa a cerca de 11,5 km a montante da Ponte Estelita Campos na rodovia BR-050. Geograficamente se encontra na latitude 18°26'45,3" S e longitude 47°59'06,7" W, aproximadamente 455 km a Oeste da capital mineira Belo Horizonte.

O barramento é composto pela compactação de enrocamento, zonas (camadas) de tipos de solo e por um núcleo argiloso, totalizando 25,3 milhões de m³, 1.666 m de comprimento e 15 m de largura na crista e 158 m de altura máxima (Figuras 5 e 6). Mais especificidades acerca do projeto de zonas e fundações podem ser vistas no Anexo A.

Figura 5 – Construção da UHE Emborcação



Fonte: CEMIG, acervo particular.

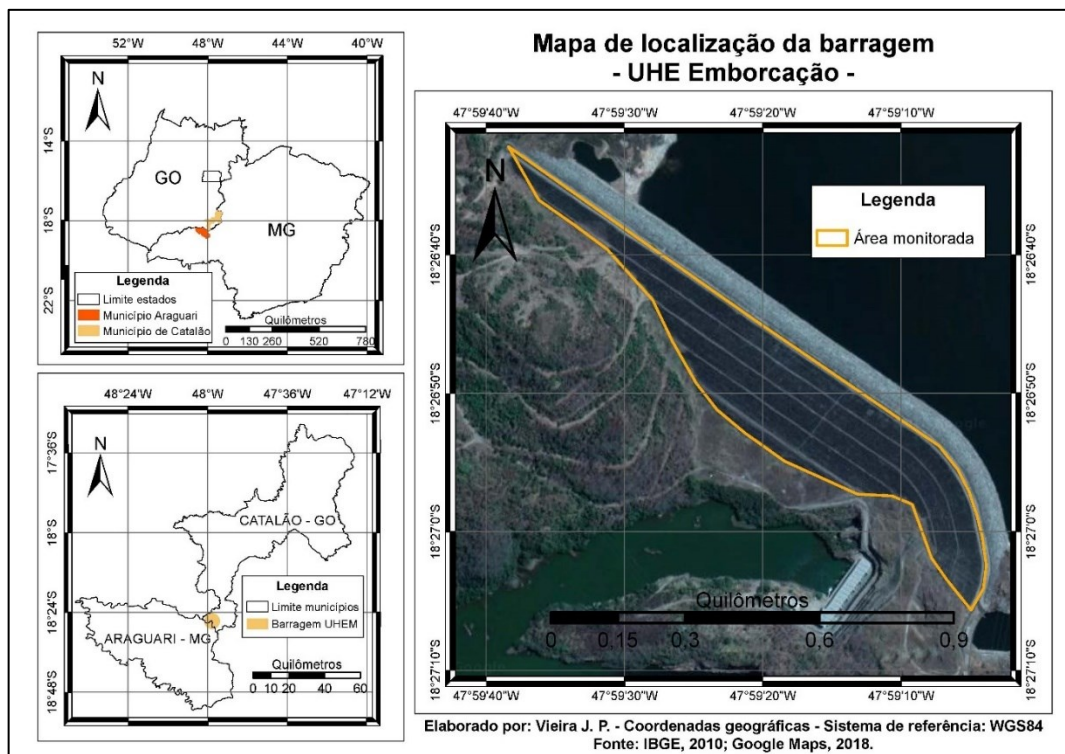
Figura 6 – Vista frontal da barragem da UHE Emborcação



Fonte: O autor.

Seu reservatório abrange os municípios de Abadia dos Dourados, Araguari, Cascalho Rico, Douradoquara, Estrela do Sul, Grupiara, Monte Carmelo, localizados em Minas Gerais; e os municípios de Catalão, Davinópolis, Ouvidor e Três Ranchos, em Goiás. A escolha do aproveitamento hidrelétrico de Emborcação pela CEMIG, foi procedida de criteriosos estudos técnicos e econômicos da região sudoeste do Brasil (ELETROBRÁS, 1989). A Figura 7 apresenta o mapa de localização da hidrelétrica, bem como a localização do corpo estrutural do objeto de estudo.

Figura 7 – Mapa de localização da barragem da UHE Emborcação



Fonte: O autor.

Segundo a ELETROBRÁS (1989), as facilidades técnicas da construção foram fatores preponderantes para reduzir o custo do kW instalado, justificando assim a escolha do referido projeto entre os demais estudados. O custo total incluindo subestação, linhas de transmissão e telecomunicações ficaram em torno de 72 bilhões de cruzeiros (moeda nacional da época), valor financiado pela ELETROBRÁS, Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDS) e a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP).

5.2 Material

Para as campanhas de monitoramento na UHE Emborcação, os principais materiais e equipamentos utilizados foram:

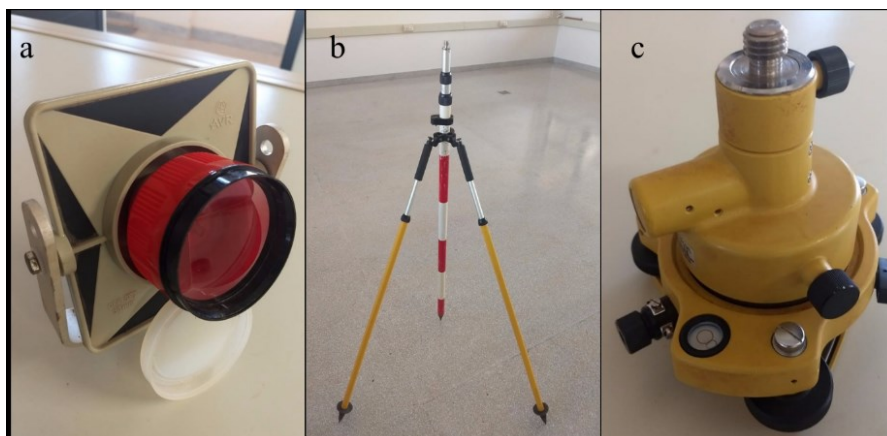
- Estação Total Robotizada Leica Nova MS50 (Figura 8);
- Prismas circulares AVR com *offset* de 0mm e -30mm (Figura 9 - a);
- Bastões e bipés (Figura 9 - b);
- Bases nivelantes com adaptador para encaixe dos prismas (Figura 9 - c); e
- Adaptadores para o encaixe da estação e base nivelante nos marcos de centragem forçada (Figura 10).

Figura 8 – Leica Nova MS50



Fonte: O autor.

Figura 9 – Prisma, bastão, bipé e base nivelante



Fonte: O autor.

Figura 10 – Adaptadores para o encaixe da estação e base nivelante no marco de centragem forçada



Fonte: O autor.

Visto à importância no grau de precisão deste tipo de trabalho, todos os instrumentos foram separados e checados previamente, verificados quanto as especificações do fabricante, e com a retificação⁶ de fábrica, dado que a não realização de qualquer um destes prejudica toda a campanha de levantamento. Vale ressaltar que, os equipamentos foram disponibilizados pelo Laboratório de Topografia e Geodésia (LTGEO) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

⁶ A retificação consiste na correção de alguns erros instrumentais, os quais afetam a qualidade das medidas.

5.2.1 Estação total MS50

A estação total robotizada MS50 é um equipamento com avançada tecnologia desenvolvido pela *Leica Geosystems*. Esta estação total, se devidamente instalada, programada e operada, admite realizar medidas de direções horizontais, ângulos verticais e distâncias, independentemente do observador. Permite acessar diversas configurações do sistema e indicar as características do projeto, como por exemplo, método de medição, tipo de refletor e orientação inicial dentre outras várias funções como geração de nuvem de pontos, cálculo de volume.

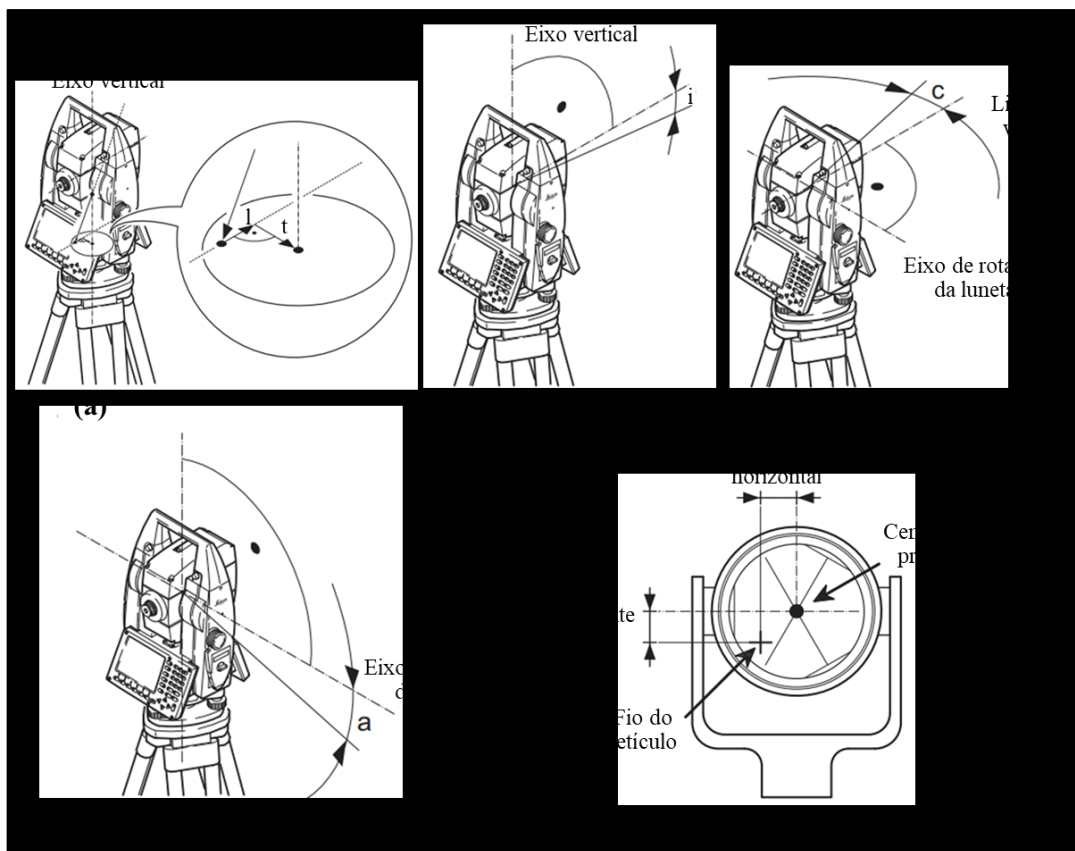
Este equipamento realiza leituras de alta precisão, apoiada pela função de reconhecimento automático de alvos ATR® – *Automatic Target Aiming*, pelo sistema de detecção PS® – *PowerSearch*, e alteração automatizada de face em Posição Direta (PD) e Posição Inversa (PI), permitindo maior rapidez e menor influência do operador. Realiza também, imageamento em 360°, leituras de ângulos e de distâncias com ou sem refletor, correções de distorção em projeção devido a curvatura terrestre e correções ambientais de pressão, umidade e temperatura relativa do ar (*LEICA GEOSYSTEMS® a*).

As principais características técnicas deste instrumento são:

- Precisão da medida angular: 1"; e
- Precisão na medida da distância: com prisma 1 mm + 1,5 ppm, e em qualquer superfície 2 mm + 2 ppm.
- Distância máxima de leitura: com prisma de 1,5 m até 10000 m, e em qualquer superfície de 1,5 m até 2000 m

Diversos erros instrumentais podem ser estimados pela MS50, os quais são armazenados na memória do instrumento e compensados automaticamente nas observações realizadas (*LEICA GEOSYSTEMS® a*). A Figura 11 apresenta os erros que são verificados e ajustados eletronicamente por esta estação total:

Figura 11 – Erros verificados e ajustados eletronicamente



Fonte: Adaptado de *LEICA GEOSYSTEMS®* b.

- a) Erro de índice do compensador (l , t): corresponde à determinação do centro da bolha usada para o nivelamento do instrumento, para os eixos longitudinal e transversal (l , t);
- b) Erro de índice vertical (i): em relação ao eixo vertical do instrumento, corresponde ao erro do ponto zero do limbo vertical;
- c) Erro de colimação (c): causado pela falta de perpendicularidade entre a linha de visada horizontal e o eixo secundário;
- d) Inclinação do eixo secundário (a): corresponde a diferença causada pela falta de perpendicularidade entre o eixo principal e o eixo secundário; e
- e) Erro de zero no ATR® e erro de zero da câmera: corresponde a não coincidência da pontaria com o centro do prisma ou da feição que está sendo observada pela câmera. Estes erros, influenciam tanto o plano horizontal quanto vertical.

O Quadro 1 estão os tipos de erros, se o efeito é na componente horizontal ou vertical, e se é possível eliminá-los com pares de leituras conjugadas ou por meio de correções feitas pela própria estação.

Quadro 1 – Erros instrumentais, efeitos e como podem ser eliminados

ERRO DO INSTRUMENTO	EFEITOS HZ	EFEITOS V	ELIMINAÇÃO POR MEIO DE LEITURAS CONJUGADAS	CORREÇÃO AUTOMÁTICA
c – Erro de colimação	✓	-	✓	✓
a – Inclinação do eixo secundário	✓	-	✓	✓
l – Erro de índice do compensador (longitudinal)	-	✓	✓	✓
t – Erro de índice do compensador (transversal)	✓	-	✓	✓
i – Erro do índice vertical	-	✓	✓	✓
Erro de zero no ATR®	✓	✓	-	✓
Erro de zero da câmera	✓	✓	✓	✓

Fonte: Adaptado de LEICA GEOSYSTEMS® a.

5.3 Campanhas de monitoramento da UHE Emborcação

As campanhas de monitoramento da barragem da Usina Hidrelétrica Emborcação foram realizadas em três épocas distintas com o intuito de verificar possíveis deslocamentos nos pontos monitorados. As datas, foram distribuídas sazonalmente durante ao ano, de modo que, as observações fossem coletadas em condições distintas de temperatura e pressão. No Quadro 2 a seguir, podem ser visualizadas as datas dos levantamentos efetuados.

Quadro 2 – Campanhas de monitoramento na UHE Emborcação

DATA	LEVANTAMENTO
19/04/2018	ÉPOCA 01
07/06/2018	ÉPOCA 02
24/09/2018	ÉPOCA 03

Fonte: O autor.

5.4 Rede geodésica de monitoramento da barragem da UHE Emborcação

De acordo com Corrêa (2012), os procedimentos gerais para monitorar os deslocamentos de uma barragem, envolvem a determinação da variação espacial de pontos

localizados sobre a construção a ser monitorada, sendo estes, materializados por marcas, sinais especiais ou refletores. Por conseguinte, é necessário partir de pontos de referência, que têm suas posições controladas. Estes pontos de referência, na UHE Emborcação, são definidos por meio de uma rede geodésica de monitoramento já estabelecida pela CEMIG. A Figura 12 apresenta a localização dos marcos de centragem forçada na UHE Emborcação.

Figura 12 – Localização dos marcos de centragem forçada na UHE Emborcação



Fonte: O autor.

Os pilares dos marcos de centragem forçada foram distribuídos de forma que haja intervisibilidade por todos pontos monitorados na crista. Em contrapartida, nas bermas, o pilar T21 não possui viabiliza essa mesma questão, pois se encontra a montante do barramento.

O monitoramento dos pontos localizados na jusante do barramento da UHE Emborcação, é realizado a partir da instalação da estação total nos marcos com pino de centragem forçada materializados (Figura 13). Para determinar as coordenadas dos pontos irradiados é necessário adotar coordenadas de referência em um mesmo sistema de origem. Assim, a CEMIG disponibilizou as coordenadas dos pilares geodésicos T21, MIRANTE e T31 (Tabela 1). Estes serão utilizados como referência para os cálculos das coordenadas a partir dos

pilares. Vale ressaltar que toda rede está referenciada em um plano topográfico local, e que os pilares são considerados isentos de variações ao longo do tempo.

Tabela 1 – Coordenadas topográficas dos pilares geodésicos T21, MIRANTE e T31

	T21	MIRANTE	T31
X (m)	84784,5630	83845,7920	83846,4890
Y (m)	157262,7320	156828,2790	157846,8420

Fonte: CEMIG, acervo particular.

5.5 Levantamento bidimensional dos pontos de monitoramento

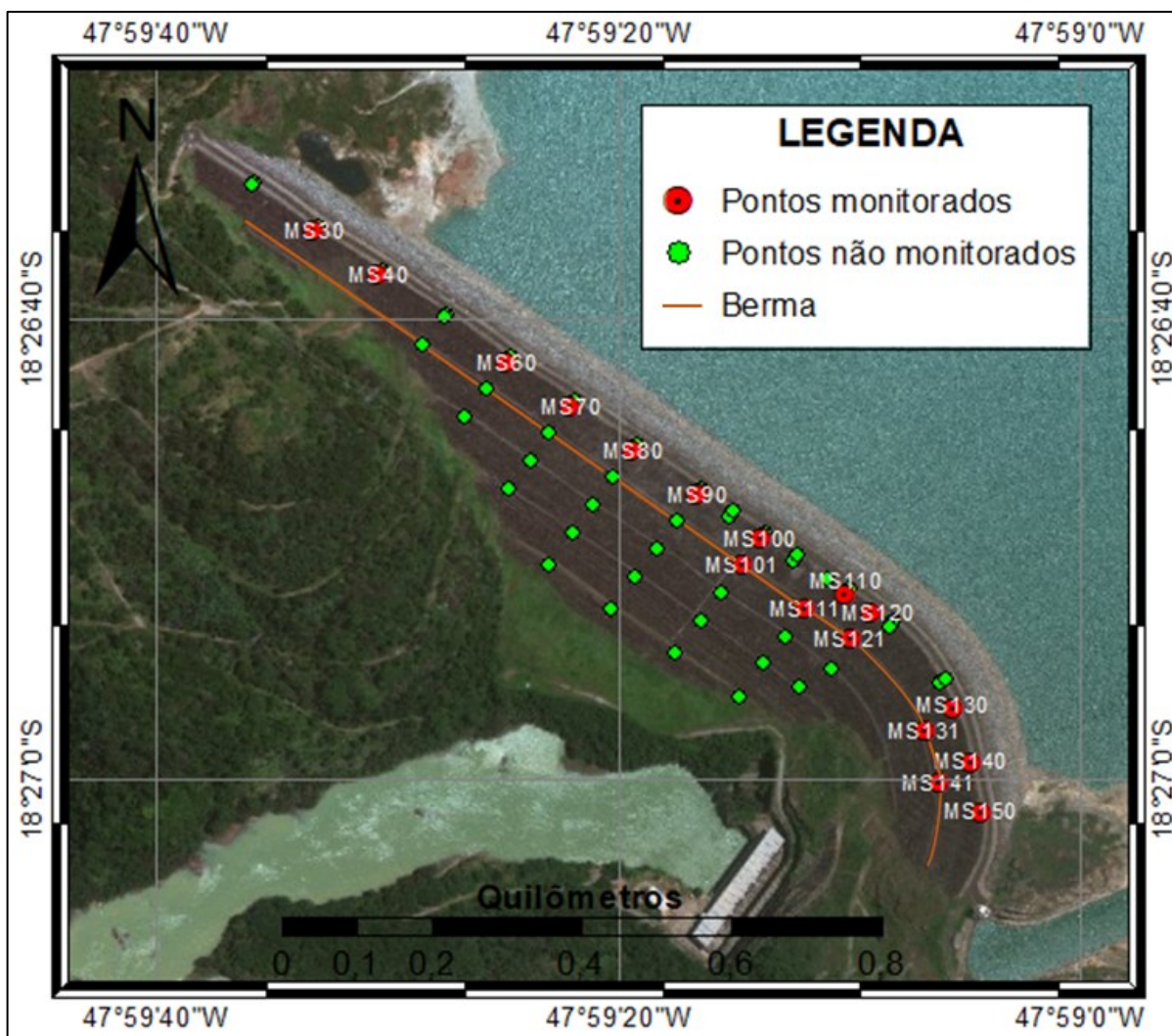
A descrição das observações e equações, para determinar as coordenadas bidimensionais dos pontos de monitoramento, localizados na barragem da usina hidrelétrica de Emborcação, são apresentadas nos itens 4.4.1 e 4.4.2.

5.5.1 Distribuição dos pontos instalados e prismas refletores

A instalação dos pontos na barragem da UHE Emborcação foi efetuada pela CEMIG, a qual estabeleceu as posições onde estes seriam distribuídos de forma estratégica e espaçados igualmente por toda barragem, os quais variam de 50 a 100 metros. Atualmente no barramento possuem 74 pontos em bom estado sendo que: 47 situam-se na crista; em direção à jusante, 10 na primeira berma; 7 na segunda berma; 6 na terceira; e 4 na última berma.

Se tratando de quesito redundância, para a realização deste trabalho, serão escolhidos apenas marcos os quais são intervisíveis por pelo menos dois pilares. Devido a limitação do T21, estão passíveis ao monitoramento apenas metade dos pilares da primeira berma a jusante da barragem e os marcos da crista, sendo que esses últimos, foram escolhidos apenas os que possuem equidistância maior que 100 metros, restando assim 12 na crista e 5 na berma. A Figura 13 apresenta os pontos monitorados e não monitorados.

Figura 13 – Distribuição dos pontos em bom estado da UHE Emborcação



Fonte: O autor.

Com o intuito da realização de comparações em relação à uma época de referência foi disponibilizado pela CEMIG as coordenadas de todos os pontos que serão monitorados (Tabela 2). A época disponibilizada é datada em 09/01/2018, sendo esta anterior ao primeiro levantamento realizado no presente trabalho (vide Quadro 2).

Tabela 2 – Coordenadas dos pontos a serem monitorados na barragem

LOCAL	PONTO	X (m)	Y (m)
CRISTA	MS30	83.911,7425	158.147,4913
	MS40	83.994,2249	158.090,3849
	MS60	84.158,4561	157.976,2857
	MS70	84.240,5436	157.918,9427

LOCAL	PONTO	X (m)	Y (m)
CRISTA	MS80	84.322,4148	157.861,8692
	MS90	84.404,8995	157.804,5055
	MS100	84.486,7770	157.747,7270
	MS110	84.593,7341	157.673,8478
	MS120	84.626,6360	157.651,2090
	MS130	84.733,2519	157.525,2498
	MS140	84.757,2371	157.454,2009
	MS150	84.772,3802	157.387,7800
BERMA	MS101	84.462,9685	157.711,2197
	MS111	84.543,9947	157.655,2550
	MS121	84.602,1791	157.615,1978
	MS131	84.699,6320	157.493,8604
	MS141	84.718,5416	157.424,8821

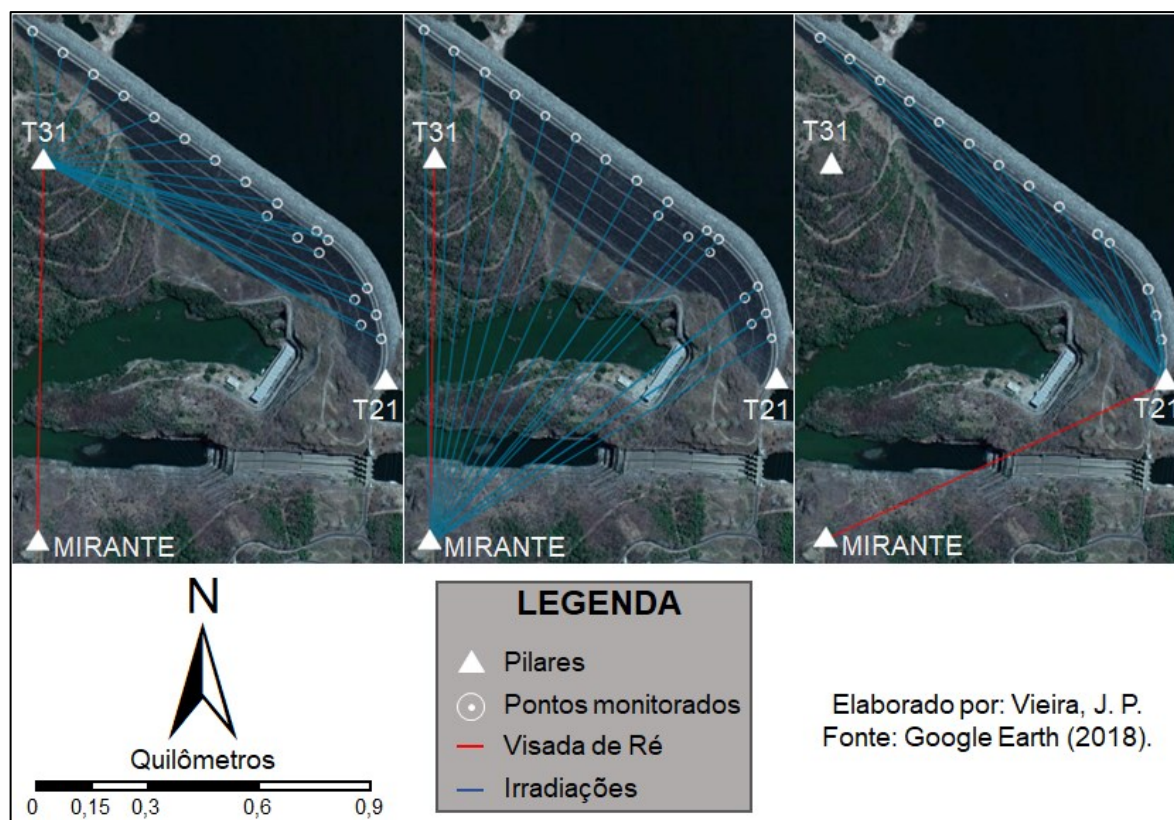
Fonte: CEMIG, acervo particular.

5.5.2 Irradiação 2D e variação de coordenadas

A realização do monitoramento na barragem da UHE Emborcação foi feita por meio do método de irradiação bidimensional, sendo a variação de coordenadas um subproduto de suas observações de distâncias e ângulos, ou seja, as mesmas medidas de um método, foram utilizadas para o outro.

As distâncias, ângulos horizontais e verticais dos pontos a serem monitorados, foram efetuadas com a instalação da estação total MS50 a jusante da estrutura no pilar T31, inicialmente orientado no pilar MIRANTE, realizando assim as irradiações. Posteriormente estacionando o aparelho no MIRANTE e orientando no T31 efetuando as leituras. E por último no T21 tendo como referência o MIRANTE. Foram realizadas observações em cada um dos prismas, em pontaria direta e inversa da luneta (PD, PI). A esquemática do processo pode ser vista na Figura 14 a seguir:

Figura 14 – Levantamento pelo método de irradiação nos alvos a montante



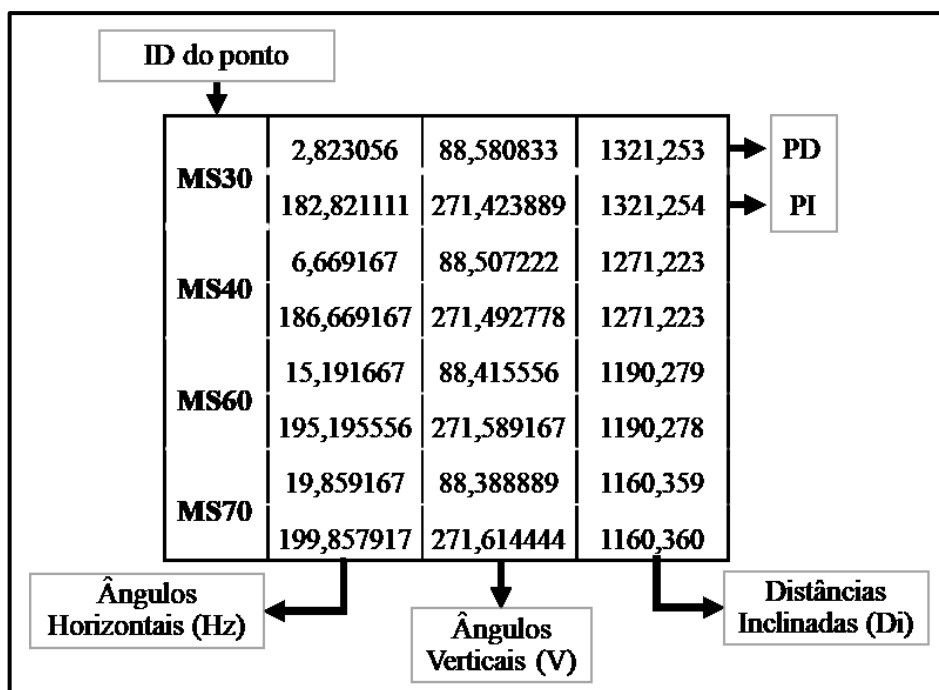
Fonte: O autor.

Todas as observações são gravadas automaticamente pela estação total, conforme a especificação e configuração determinada antes do processo de medição. Posteriormente em escritório as informações de leituras corrigidas, foram utilizadas para cálculos e análises. Vale ressaltar que, foram realizadas apenas um par de leituras conjugadas para cada ponto irradiado.

5.6 Cálculo das coordenadas bidimensionais

Para o cálculo dos pontos monitorados a partir dos métodos 4.4.1 e 4.4.2 foi necessário que os dados obtidos em campo fossem descarregados e analisados. Em cada campanha de levantamento, as direções horizontais, os ângulos verticais, bem como as distâncias inclinadas foram gravadas no instrumento utilizado, sendo elas organizadas em um arquivo de dados como pode ser visto no exemplo da Figura 15 a seguir:

Figura 15 – Exemplo do formato de dados para o cálculo de coordenadas



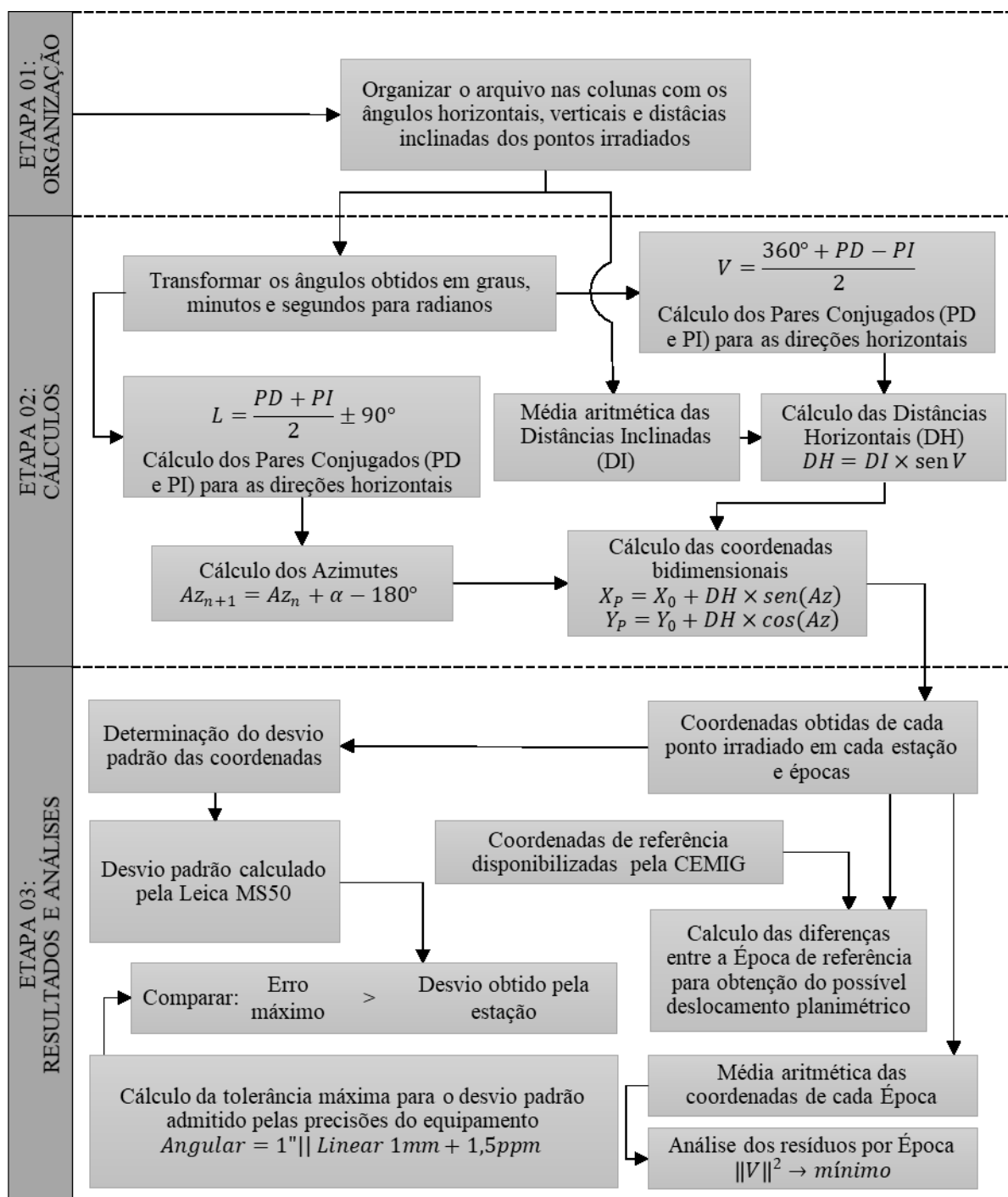
Fonte: O autor.

Dado o elevado volume de observações e ao número de campanhas que serão realizadas, bem como, as análises serem feitas no processo para o cálculo das coordenadas e deslocamentos bidimensionais, utilizou-se o aplicativo em ambiente de planilha eletrônica chamado *Topo_Calc*. Este, efetuou os cálculos para cada uma das metodologias empregadas no monitoramento planimétrico da barragem da UHE Emborcação. Vale ressaltar que, todos os cálculos pela planilha eletrônica foram previamente realizados por meio testes em calculadoras científicas, em que os mesmos, condisseram.

5.6.1 Irradiação 2D

Para melhor representação dos procedimentos adotados no cálculo das coordenadas pelo método da irradiação pelo *Topo_Calc* foi elaborado um fluxograma, o qual pode ser verificado na Figura 16 a seguir:

Figura 16 – Esquema representativo dos procedimentos executados para o cálculo das coordenadas pelo método da irradiação



Fonte: O autor.

A sistemática utilizada para o cálculo das coordenadas pelo método da irradiação se divide em três etapas, cada qual, possui características específicas, de forma explicativa, pontuam-se as abaixo:

01 – Consistiu em organizar os dados, em que, distâncias, ângulos horizontais e verticais, se posicionassem na planilha eletrônica de maneira a simplificar o trabalho, o que otimiza o processo. Isto permitiu que a partir dos dados, fossem efetuados os cálculos de interesse.

02 – *A priori*, para a utilização de operações matemáticas de seno e cosseno, foi necessário a conversão dos ângulos para radianos. Em seguida, efetuou-se os cálculos de compensação das leituras conjugadas PD e PI, tanto nas observações angulares horizontais quanto verticais, estas podem ser vistas respectivamente nas equações 10 e 11 a seguir. Nas distancias inclinadas, para cada par, foi efetuado uma média aritmética simples.

$$L = \frac{PD + PI}{2} \pm 90^\circ \quad (10)$$

$$V = \frac{360^\circ + PD - PI}{2} \quad (11)$$

Após essas correções, por meio do método fundamentado no tópico 4.4.1 foi realizado os cálculos a fim de se obter as coordenadas dos pontos monitorados.

03 – Os resultados e análises se compuseram de:

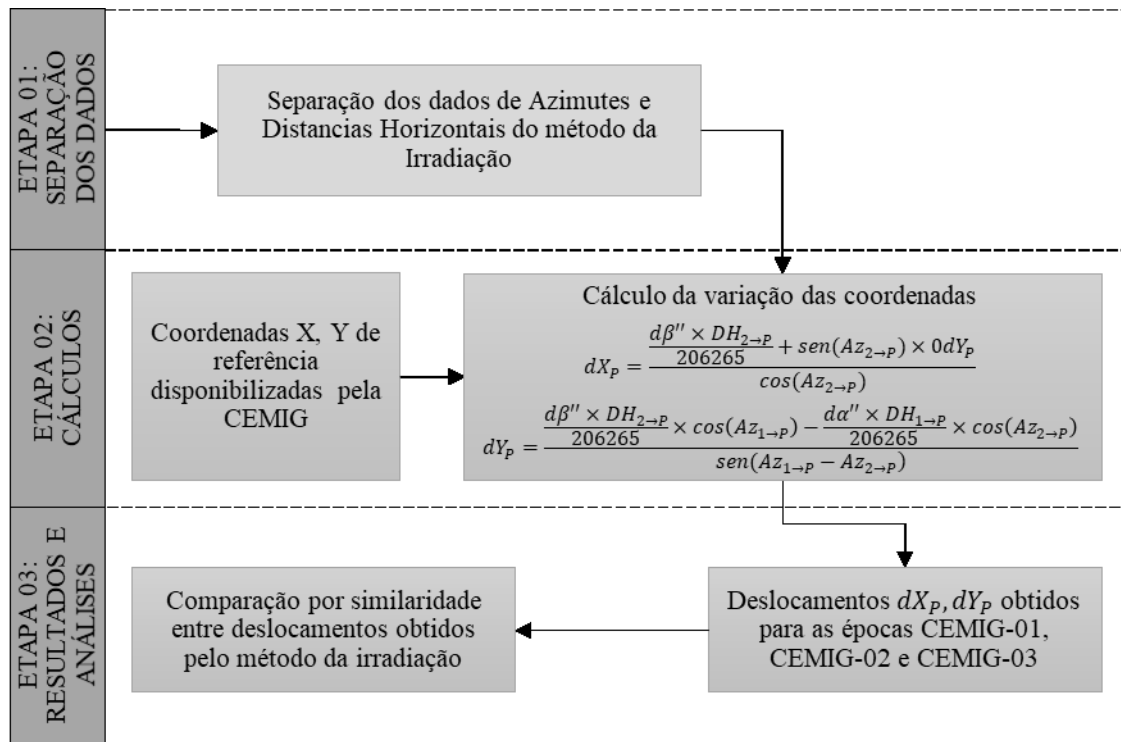
- Coordenadas de cada ponto monitorado para diferentes épocas;
- Desvio padrão (σ_X , σ_Y) a partir da MS50;
- Comparação dos desvios padrão obtidos do item anterior com o máximo permitido pelo instrumento;
- Variação posicional dos pontos em relação a época de referência disponibilizada pela CEMIG; e
- Coordenadas médias de para cada uma das três épocas e seus resíduos.

A posteriori, estes itens foram organizados, tabulados e descritos no tópico 8.

5.6.2 Variação de Coordenadas

Pelo *Topo_Calc* também foi possível o cálculo da variação de coordenadas, e esta rotina foi dividida também em três etapas, as quais podem ser vistas a seguir:

Figura 17 – Esquema representativo dos procedimentos executados para o cálculo das coordenadas pelo método da variação de coordenadas



Fonte: O autor.

01 – Consistiu em organizar os dados, em que, ângulos horizontais e distâncias do método da irradiação se posicionassem no *Topo_Calc* de maneira a simplificar o trabalho, o que otimiza o processo. Isto permitiu que a partir dos dados, fossem efetuados os cálculos de interesse.

02 – A partir das coordenadas de referência disponibilizadas pela CEMIG, calculou-se as N interseções para a obtenção dos deslocamentos das campanhas da seguinte maneira:

- $T31_{CEMIG}, T21_{CEMIG} - T31_{ÉPOCA N}, T21_{ÉPOCA N}$;
- $T31_{CEMIG}, MIRANTE_{CEMIG} - T31_{ÉPOCA N}, MIRANTE_{ÉPOCA N}$; e
- $T21_{CEMIG}, MIRANTE_{CEMIG} - T21_{ÉPOCA N}, MIRANTE_{ÉPOCA N}$.

Por se tratar de três épocas de levantamento, foram realizados nove cálculos relação às coordenadas de referência da CEMIG.

03 – Os resultados e análises se compuseram de:

- Variação posicional dos pontos em relação a época de referência disponibilizada pela CEMIG; e
- Comparação entre os resultados obtidos entre este e o método da irradiação.

A posteriori, estes itens foram organizados e tabulados para serem descritos no tópico 8.

5.7 Validação da precisão e deslocamento dos pontos monitorados

A validação da precisão dos pontos monitorados, foi feita por meio da propagação de incertezas, onde foi estimado o erro máximo que as coordenadas X, Y pudessem atingir a partir da precisão da estação robótica MS50, a qual estabelece precisão angular de para cada visada pela pontaria da luneta de 1" e linear de 1mm + 1,5ppm em leituras utilizando prisma. Através da equação (8) e baseado nas fórmulas (1) e (2) temos que:

$$\sigma_{X_P} = \sqrt{\left(\frac{\partial X_P}{\partial DH}\right)^2 \times (0,001m + 1,5ppm * DH)^2 + 2 \times \left(\frac{\partial X_P}{\partial Az}\right)^2 \times \left(\frac{1'' \times \pi}{3600 \times 180}\right)^2}$$

$$\sigma_{Y_P} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y_P}{\partial DH}\right)^2 \times (0,001m + 1,5ppm * DH)^2 + 2 \times \left(\frac{\partial Y_P}{\partial Az}\right)^2 \times \left(\frac{1'' \times \pi}{3600 \times 180}\right)^2}$$

Combinando as duas variáveis para se obter a tolerância planimétrica para o ponto P:

$$\sigma_{tolerância} = \sqrt{(\sigma_{X_P})^2 + (\sigma_{Y_P})^2}$$

Este cálculo foi realizado para cada um dos dezessete pares de coordenadas obtidos por meio das campanhas de levantamento referenciadas nos pilares T31, MIRANTE e T21. As quais podem ser vistas no tópico 8 a seguir.

Por último, no tocante à avaliação dos deslocamentos a mesma se embasará no documento intitulado “Instrumentos de Auscultação das obras civis, valores de controle para leituras dos instrumentos” elaborado pela COPEL (1998) citado por Siguel (2013), o qual especifica que, a variação máxima tolerável de deslocamentos horizontais adotados nestes projetos é de 15 milímetros.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio do *Topo_Calc* foi possível calcular as coordenadas e deslocamentos dos pontos passíveis ao monitoramento presentes a jusante da barragem da UHE Emborcação. A seguir, estes foram separados por método para ser analisados.

- *Irradiação*

A seguir, nas tabelas 3 a 11, estão presentes as coordenadas calculadas pelo *Topo_Calc* separadas pela posição onde o instrumento foi instalado, ou seja, distribuídos em relação a posição determinada por meio dos pilares $T31_{\text{ÉPOCA } 1}$, $T31_{\text{ÉPOCA } 2}$, $T31_{\text{ÉPOCA } 3}$ e assim para os demais, MIRANTE e T21. Foi realçado em negrito os resultados onde o desvio padrão foi menor do que o calculado no tópico 5.7 pela tolerância máxima da estação robótica.

Tabela 3 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas pelo método da irradiação a partir do marco de centragem forçada T31 na Época 01

T31	ÉPOCA 01		DESVIO PADRÃO	TOLERÂNCIA
	X (m)	Y (m)	$\sigma_{x,y}$ (m)	$\sigma_{\text{tolerância}}$ (m)
MS30	83.911,7449	158.147,5635	0,0052	0,0022
MS40	83.994,2483	158.090,4479	0,0109	0,0022
MS60	84.158,5025	157.976,3284	0,0076	0,0030
MS70	84.240,5983	157.918,9729	0,0014	0,0035
MS80	84.322,4892	157.861,9276	0,0105	0,0041
MS90	84.404,9744	157.804,5357	0,0400	0,0046
MS100	84.486,8559	157.747,7643	0,0169	0,0052
MS110	-	-	-	-
MS120	84.626,7007	157.651,2397	0,0267	0,0063
MS130	84.733,3143	157.525,2703	0,0276	0,0072
MS140	84.757,2960	157.454,2088	0,0343	0,0075
MS150	84.772,4391	157.387,7718	0,0138	0,0078
MS101	84.463,0212	157.711,2717	0,0081	0,0051
MS111	84.544,0483	157.655,3128	0,0176	0,0057
MS121	84.602,2409	157.615,2479	0,0003	0,0062
MS131	84.699,7212	157.493,8716	0,0028	0,0071
MS141	84.718,5850	157.424,8910	0,0513	0,0073

Fonte: O autor.

A observação do ponto de monitoramento MS110 a partir do marco T31 não foi possível na época 01, devido a sobreposição com o ponto posterior pelo operador, o que fez apagar a leitura realizada no ponto.

Tabela 4 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada T31 na Época 02

T31	ÉPOCA 02		DESVIO PADRÃO	TOLERÂNCIA
	X (m)	Y (m)	$\sigma_{x,y}$ (m)	$\sigma_{tolerância}$ (m)
MS30	83.911,7814	158.147,5430	0,0206	0,0022
MS40	83.994,2559	158.090,4356	0,0100	0,0022
MS60	84.158,5192	157.976,2957	0,0142	0,0030
MS70	84.240,6110	157.918,9370	0,0040	0,0035
MS80	84.322,4855	157.861,8955	0,0138	0,0041
MS90	84.404,9655	157.804,4810	0,0266	0,0046
MS100	84.486,8451	157.747,7557	0,0402	0,0052
MS110	84.593,7852	157.673,8151	0,0356	0,0060
MS120	84.626,6615	157.651,1576	0,0369	0,0063
MS130	84.733,2835	157.525,2116	0,0477	0,0072
MS140	84.757,2538	157.454,1257	0,0463	0,0075
MS150	84.772,3998	157.387,7249	0,0018	0,0078
MS101	84.463,0298	157.711,2428	0,0319	0,0051
MS111	84.544,0379	157.655,2652	0,0289	0,0057
MS121	84.602,2250	157.615,1952	0,0294	0,0062
MS131	84.699,6548	157.493,8464	0,0399	0,0071
MS141	84.718,5799	157.424,8577	0,0453	0,0073

Fonte: O autor.

Tabela 5 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada T31 na Época 03

T31	ÉPOCA 03		DESVIO PADRÃO	TOLERÂNCIA
	X (m)	Y (m)	$\sigma_{x,y}$ (m)	$\sigma_{tolerância}$ (m)
MS30	83.911,7631	158.147,5547	0,0206	0,0022
MS40	83.994,2580	158.090,4435	0,0100	0,0022
MS60	84.158,5175	157.976,3139	0,0142	0,0030
MS70	84.240,6125	157.918,9642	0,0044	0,0035
MS80	84.322,4872	157.861,9179	0,0138	0,0041
MS90	84.404,9729	157.804,5476	0,0266	0,0046
MS100	84.486,8364	157.747,7497	0,0402	0,0052
MS110	84.593,7861	157.673,8632	0,0356	0,0060
MS120	84.626,6721	157.651,2140	0,0369	0,0063
MS130	84.733,2856	157.525,2457	0,0477	0,0072

continua

conclusão

MS140	84.757,2754	157.454,2141	0,0463	0,0075
MS150	84.772,4077	157.387,7751	0,0018	0,0078
MS101	84.463,0127	157.711,2691	0,0319	0,0051
MS111	84.544,0342	157.655,2978	0,0289	0,0057
MS121	84.602,2286	157.615,2309	0,0294	0,0062
MS131	84.699,6756	157.493,9065	0,0399	0,0071
MS141	84.718,5882	157.424,9276	0,0453	0,0073

Fonte: O autor.

Tabela 6 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada MIRANTE na Época 01

MIRANTE	ÉPOCA 01		DESVIO PADRÃO	TOLERÂNCIA
	X (m)	Y (m)	$\sigma_{x,y}$ (m)	$\sigma_{tolerância}$ (m)
MS30	83.911,7278	158.147,5089	0,0581	0,0091
MS40	83.994,2442	158.090,4000	0,0052	0,0087
MS60	84.158,4161	157.976,3273	0,0625	0,0082
MS70	84.240,5655	157.918,9626	0,0259	0,0081
MS80	84.322,4411	157.861,9122	0,0670	0,0080
MS90	84.404,9091	157.804,5508	0,0064	0,0079
MS100	84.486,8187	157.747,7662	0,0268	0,0080
MS110	84.593,7614	157.673,8727	0,0409	0,0081
MS120	84.626,6418	157.651,2377	0,0396	0,0082
MS130	84.733,2901	157.525,2725	0,0191	0,0083
MS140	84.757,2706	157.454,2223	0,0476	0,0082
MS150	84.772,4223	157.387,7843	0,0544	0,0081
MS101	84.462,9670	157.711,2884	0,0238	0,0077
MS111	84.543,9738	157.655,2529	0,0413	0,0078
MS121	-	-	-	-
MS131	84699,6114	157493,9361	0,0498	0,0080
MS141	84718,5627	157424,9232	0,0224	0,0079

Fonte: O autor.

A observação do ponto de monitoramento MS121 a partir do marco MIRANTE não foi possível na época 01, devido a sobreposição com o ponto posterior pelo operador, o que fez apagar a leitura realizada no ponto.

Tabela 7 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada MIRANTE na Época 02

MIRANTE	ÉPOCA 02		DESVIO PADRÃO	TOLERÂNCIA
	X (m)	Y (m)	$\sigma_{x,y}$ (m)	$\sigma_{tolerância}$ (m)
MS30	83.911,7672	158.147,4918	0,0473	0,0091
MS40	83.994,2847	158.090,3866	0,0258	0,0087

continua

				conclusão
MS60	84.158,4568	157.976,2949	0,0484	0,0082
MS70	84.240,5556	157.918,9514	0,0521	0,0081
MS80	84.322,4660	157.861,8968	0,0434	0,0080
MS90	84.404,9395	157.804,5186	0,0235	0,0079
MS100	84.486,8231	157.747,7461	0,0319	0,0080
MS110	84.593,7722	157.673,8537	0,0697	0,0081
MS120	84.626,6556	157.651,2140	0,0426	0,0082
MS130	84.733,2706	157.525,2709	0,0337	0,0083
MS140	84.757,2503	157.454,2228	0,0439	0,0082
MS150	84.772,4212	157.387,7605	0,0591	0,0081
MS101	84.462,9962	157.711,2684	0,0110	0,0077
MS111	84.544,0123	157.655,3044	0,0146	0,0078
MS121	84.602,1993	157.615,2589	0,0259	0,0079
MS131	84.699,6636	157.493,8917	0,0340	0,0080
MS141	84.718,5778	157.424,9068	0,0316	0,0079

Fonte: O autor.

Tabela 8 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada MIRANTE na Época 03

MIRANTE	ÉPOCA 03		DESVIO PADRÃO	TOLERÂNCIA
	X (m)	Y (m)	$\sigma_{x,y}$ (m)	$\sigma_{tolerância}$ (m)
MS30	83.911,7367	158.147,4945	0,0473	0,0091
MS40	83.994,2010	158.090,4019	0,0258	0,0087
MS60	84.158,4506	157.976,2893	0,0484	0,0082
MS70	84.240,5543	157.918,9441	0,0521	0,0081
MS80	84.322,4344	157.861,9044	0,0434	0,0080
MS90	84.404,9223	157.804,5246	0,0235	0,0079
MS100	84.486,8095	157.747,7530	0,0319	0,0080
MS110	84.593,7537	157.673,8764	0,0694	0,0081
MS120	84.626,6471	157.651,2193	0,0426	0,0082
MS130	84.733,2804	157.525,2597	0,0337	0,0083
MS140	84.757,2603	157.454,2088	0,0493	0,0082
MS150	84.772,4691	157.387,7666	0,0591	0,0081
MS101	84.462,9833	157.711,2753	0,0214	0,0077
MS111	84.544,0026	157.655,3073	0,0146	0,0078
MS121	84.602,2159	157.615,2306	0,0259	0,0079
MS131	84.699,6618	157.493,9022	0,0340	0,0080
MS141	84.718,5809	157.424,9170	0,0316	0,0079

Fonte: O autor.

Tabela 9 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada T21 na Época 01

T21	ÉPOCA 01		DESVIO PADRÃO	TOLERÂNCIA
	X (m)	Y (m)	$\sigma_{x,y}$ (m)	$\sigma_{tolerância}$ (m)
MS30	83.911,7020	158.147,5010	0,0702	0,0090
MS40	-	-	-	-
MS60	84.158,4236	157.976,3088	0,0098	0,0069
MS70	84.240,5173	157.918,9695	0,0491	0,0062
MS80	84.322,3814	157.861,9246	0,0408	0,0055
MS90	84.404,8862	157.804,5468	0,0358	0,0048
MS100	84.486,7561	157.747,7814	0,0317	0,0041
MS110	84.593,7121	157.673,9029	0,0235	0,0033
MS120	84.626,6000	157.651,2557	0,0183	0,0030
MS130	84.733,2329	157.525,3099	0,0136	0,0019
MS140	84.757,2145	157.454,2563	0,0121	0,0014
MS150	84.772,3676	157.387,8376	0,0074	0,0009
MS101	-	-	-	-
MS111	-	-	-	-
MS121	-	-	-	-
MS131	-	-	-	-
MS141	-	-	-	-

Fonte: O autor.

A observação do ponto de monitoramento MS40 a partir do marco T21 não foi possível na época 01, devido a sobreposição com o ponto posterior pelo operador, o que fez apagar a leitura realizada no ponto.

Tabela 10 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada T21 na Época 02

T21	ÉPOCA 02		DESVIO PADRÃO	TOLERÂNCIA
	X (m)	Y (m)	$\sigma_{x,y}$ (m)	$\sigma_{tolerância}$ (m)
MS30	83.911,6990	158.147,4912	0,0021	0,0090
MS40	83.994,1927	158.090,4090	0,0367	0,0097
MS60	84.158,4383	157.976,3025	0,0410	0,0069
MS70	84.240,5269	157.918,9611	0,0422	0,0062
MS80	84.322,4032	157.861,9173	0,0283	0,0055
MS90	84.404,8820	157.804,5388	0,0267	0,0048
MS100	84.486,7564	157.747,7758	0,0287	0,0041
MS110	84.593,7208	157.673,8998	0,0234	0,0033
MS120	84.626,6097	157.651,2589	0,0190	0,0030
MS130	84.733,2461	157.525,3100	0,0068	0,0019

continua

				conclusão
MS140	84.757,2385	157.454,2509	0,0041	0,0014
MS150	84.772,3713	157.387,8324	0,0023	0,0009
MS101	-	-	-	-
MS111	-	-	-	-
MS121	-	-	-	-
MS131	-	-	-	-
MS141	-	-	-	-

Fonte: O autor.

Tabela 11 – Coordenadas dos pontos de monitoramento calculadas a partir do marco de centragem forçada T21 na Época 03

T21	ÉPOCA 03		DESVIO PADRÃO	TOLERÂNCIA
	X (m)	Y (m)	$\sigma_{x,y}$ (m)	$\sigma_{tolerância}$ (m)
MS30	83.911,7045	158147,4942	0,0021	0,0090
MS40	-	-	-	-
MS60	84.158,4179	157.976,3013	0,0410	0,0069
MS70	84.240,5139	157.918,9589	0,0422	0,0062
MS80	84.322,3967	157.861,9228	0,0283	0,0055
MS90	84.404,8809	157.804,5461	0,0267	0,0048
MS100	84.486,7668	157.747,7825	0,0289	0,0041
MS110	84.593,7216	157.673,8982	0,0234	0,0033
MS120	84.626,6040	157.651,2541	0,0190	0,0030
MS130	84.733,2417	157.525,3121	0,0068	0,0019
MS140	84.757,2329	157.454,2538	0,0041	0,0014
MS150	84.772,3784	157.387,8400	0,0023	0,0009
MS101	-	-	-	-
MS111	-	-	-	-
MS121	-	-	-	-
MS131	-	-	-	-
MS141	-	-	-	-

Fonte: O autor.

A observação do ponto de monitoramento MS40 a partir do marco T21 não foi possível na Época 01, devido a sobreposição com o ponto posterior pelo operador, o que fez apagar a leitura realizada no ponto.

Em suma, os resultados obtidos pelo método da irradiação se demonstraram um tanto quanto desfavoráveis, pois, na maioria dos casos, o desvio padrão obtido por meio do método da irradiação foi maior que o tolerável, o que implica problemas acerca das medidas nesse estudo de caso. Pode-se considerar este efeito, como consequência das intempéries registradas em campo, uma vez que, ficou inviabilizado devido ao tempo de duração das campanhas a

realização de mais que um par de leituras conjugadas (PD e PI) em um mesmo ponto de monitoramento, em vias que, nas literaturas como a de Corrêa (2012) e Siguel (2013) e recomendam respectivamente, no mínimo 4 e 10 séries de medidas.

Foi efetuado as diferenças entre as coordenadas da época de referência obtida pela CEMIG, e a das campanhas de levantamento com a estação robótica MS50 instalada nos pilares T31, T32 e T33, obtendo assim, os deslocamentos que podem ser visualizadas nas Tabelas 12, 13 e 14 a seguir. Os valores que foram menores que o limite tolerável especificado em 15 milímetros estão realçados em negrito.

Tabela 12 – Variações das coordenadas entre as épocas CEMIG-01, CEMIG-02 E CEMIG-03 obtidos pelo T31

T31	ÉPOCA 01		ÉPOCA 02		ÉPOCA 03	
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔX (m)	ΔY (m)
MS30	-0,0024	-0,0722	-0,0389	-0,0517	-0,0206	-0,0634
MS40	-0,0234	-0,0630	-0,0310	-0,0507	-0,0331	-0,0586
MS60	-0,0464	-0,0427	-0,0631	-0,0100	-0,0614	-0,0282
MS70	-0,0547	-0,0302	-0,0674	0,0057	-0,0689	-0,0215
MS80	-0,0744	-0,0584	-0,0707	-0,0263	-0,0724	-0,0487
MS90	-0,0749	-0,0302	-0,0660	0,0245	-0,0734	-0,0421
MS100	-0,0789	-0,0373	-0,0681	-0,0287	-0,0594	-0,0227
MS110	-0,0718	-0,0340	-0,0511	0,0327	-0,0520	-0,0154
MS120	-0,0647	-0,0307	-0,0255	0,0514	-0,0361	-0,0050
MS130	-0,0624	-0,0205	-0,0316	0,0382	-0,0337	0,0041
MS140	-0,0589	-0,0079	-0,0167	0,0752	-0,0383	-0,0132
MS150	-0,0589	0,0082	-0,0196	0,0551	-0,0275	0,0049
MS101	-0,0527	-0,0520	-0,0613	-0,0231	-0,0442	-0,0494
MS111	-0,0536	-0,0578	-0,0432	-0,0102	-0,0395	-0,0428
MS121	-0,0618	-0,0501	-0,0459	0,0026	-0,0495	-0,0331
MS131	-0,0892	-0,0112	-0,0228	0,0140	-0,0436	-0,0461
MS141	-0,0434	-0,0089	-0,0383	0,0244	-0,0466	-0,0455

Fonte: O autor.

Tabela 13 – Variações das coordenadas entre as épocas CEMIG-01, CEMIG-02 E CEMIG-03 obtidos pelo MIRANTE

MIRANTE	ÉPOCA 01		ÉPOCA 02		ÉPOCA 03	
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔX (m)	ΔY (m)
MS30	0,0147	-0,0176	-0,0247	-0,0005	0,0058	-0,0032
MS40	-0,0193	-0,0151	-0,0598	-0,0017	0,0239	-0,0170
MS60	0,0400	-0,0416	-0,0007	-0,0092	0,0055	-0,0036
MS70	-0,0219	-0,0199	-0,0120	-0,0087	-0,0107	-0,0014

continua

	conclusão					
MS80	-0,0263	-0,0430	-0,0512	-0,0276	-0,0196	-0,0352
MS90	-0,0096	-0,0453	-0,0400	-0,0131	-0,0228	-0,0191
MS100	-0,0417	-0,0392	-0,0461	-0,0191	-0,0325	-0,0260
MS110	-0,0273	-0,0249	-0,0381	-0,0059	-0,0196	-0,0286
MS120	-0,0058	-0,0287	-0,0196	-0,0050	-0,0111	-0,0103
MS130	-0,0382	-0,0227	-0,0187	-0,0211	-0,0285	-0,0099
MS140	-0,0335	-0,0214	-0,0132	-0,0219	-0,0232	-0,0079
MS150	-0,0421	-0,0043	-0,0410	0,0195	-0,0889	0,0134
MS101	0,0015	-0,0687	-0,0277	-0,0487	-0,0148	-0,0556
MS111	0,0209	0,0021	-0,0176	-0,0494	-0,0079	-0,0523
MS121	0,0207	-0,0368	-0,0202	-0,0611	-0,0368	-0,0328
MS131	0,0206	-0,0757	-0,0316	-0,0313	-0,0298	-0,0418
MS141	-0,0211	-0,0411	-0,0362	-0,0247	-0,0393	-0,0349

Fonte: O autor.

Tabela 14 – Variações das coordenadas entre as épocas CEMIG-01, CEMIG-02 E CEMIG-03 obtidos pelo T21

T21	ÉPOCA 01		ÉPOCA 02		ÉPOCA 03	
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔX (m)	ΔY (m)
MS30	0,0405	-0,0097	0,0435	0,0001	0,0380	-0,0029
MS40	0,0365	-0,0164	0,0322	-0,0241	0,0381	-0,0092
MS60	0,0325	-0,0231	0,0178	-0,0168	0,0382	-0,0156
MS70	0,0263	-0,0268	0,0167	-0,0184	0,0297	-0,0162
MS80	0,0334	-0,0554	0,0116	-0,0481	0,0181	-0,0536
MS90	0,0133	-0,0413	0,0175	-0,0333	0,0186	-0,0406
MS100	0,0209	-0,0544	0,0206	-0,0488	0,0102	-0,0555
MS110	0,0220	-0,0551	0,0133	-0,0520	0,0125	-0,0504
MS120	0,0360	-0,0467	0,0263	-0,0499	0,0320	-0,0451
MS130	0,0190	-0,0601	0,0058	-0,0602	0,0102	-0,0623
MS140	0,0226	-0,0554	-0,0014	-0,0500	0,0042	-0,0529
MS150	0,0126	-0,0576	0,0089	-0,0524	0,0018	-0,0600

Fonte: O autor.

Do mesmo modo que a análise anterior, os valores de tolerância se mostram inconclusivos pois grande parte excede o limite tolerável pela bibliografia. No amplo dos dados, verifica-se que as variações máximas chegam a ordem do centímetro (8,9 cm), enquanto que as variações mínimas são da ordem do centésimo do milímetro (-0,01 mm).

Utilizando o somatório dos deslocamentos ao quadrado para cada pilar, com intuito de encontrar o que possuiu a menor variação no decorrer das três campanhas tem-se que o T31, MIRANTE e T21 possuem respectivamente 0,160m², 0,055m² e 0,091m², ou seja, o pilar que

obteve as coordenadas com o menor deslocamento em relação a época de referência da CEMIG é o MIRANTE, em contrapartida, o T31 obteve o maior deslocamento relativo.

Ao se comparar dos deslocamentos obtidos, separadamente, é possível verificar que a precisão das coordenadas varia de forma aleatória em uma mesma campanha, ou seja, não há como afirmar qual dos marcos de centragem forçada permite obter informações que resultem em coordenadas mais precisas. Além de que, por meio da incerteza sobre “valor verdadeiro” não há como dizer qual das coordenadas, ou qual dos marcos, fornecem resultados mais acurados. Com isso, como resultado final para as coordenadas dos pontos monitorados, definiu-se a média das mesmas para cada época, as quais podem ser vistas nas Tabelas 15, 16 e 17.

Tabela 15 – Coordenadas médias dos pontos de monitoramento da Época 01 em relação aos marcos T31, MIRANTE e T21

ÉPOCA 01	COORDENADAS MÉDIAS		DESVIO PADRÃO DA MÉDIA
	X (m)	Y (m)	$\sigma_{x,y}$ (m)
MS30	83.911,7249	158.147,5245	0,0445
MS40	83.994,2462	158.090,4239	0,0081
MS60	84.158,4474	157.976,3215	0,0266
MS70	84.240,5604	157.918,9683	0,0255
MS80	84.322,4372	157.861,9215	0,0394
MS90	84.404,9232	157.804,5445	0,0274
MS100	84.486,8103	157.747,7707	0,0251
MS110	84.593,7368	157.673,8878	0,0322
MS120	84.626,6475	157.651,2444	0,0282
MS130	84.733,2791	157.525,2842	0,0201
MS140	84.757,2604	157.454,2292	0,0313
MS150	84.772,4097	157.387,7979	0,0252
MS101	84.462,9941	157.711,2801	0,0160
MS111	84.544,0110	157.655,2828	0,0295
MS121	84.602,2409	157.615,2479	0,0003
MS131	84.699,6663	157.493,9039	0,0263
MS141	84.718,5739	157.424,9071	0,0369

Fonte: O autor.

Tabela 16 – Coordenadas médias dos pontos de monitoramento da Época 02 em relação aos marcos T31, MIRANTE e T21

ÉPOCA 02	COORDENADAS MÉDIAS		DESVIO PADRÃO DA MÉDIA
	X (m)	Y (m)	$\sigma_{x,y}$ (m)
MS30	83.911,7492	158.147,5087	0,0233
MS40	83.939,2920	158.128,4663	0,0242

continua

	conclusão		
MS60	84.158,4714	157.976,2977	0,0345
MS70	84.240,5645	157.918,9498	0,0328
MS80	84.322,4516	157.861,9032	0,0285
MS90	84.404,9290	157.804,5128	0,0256
MS100	84.486,8082	157.747,7592	0,0336
MS110	84.593,7594	157.673,8562	0,0429
MS120	84.626,6423	157.651,2102	0,0328
MS130	84.733,2668	157.525,2642	0,0294
MS140	84.757,2475	157.454,1998	0,0314
MS150	84.772,3974	157.387,7726	0,0211
MS101	84.463,0130	157.711,2556	0,0215
MS111	84.544,0251	157.655,2848	0,0218
MS121	84.602,2122	157.615,2271	0,0277
MS131	84.699,6592	157.493,8691	0,0370
MS141	84.718,5789	157.424,8823	0,0385

Fonte: O autor.

Tabela 17 – Coordenadas médias dos pontos de monitoramento da Época 03 em relação aos marcos T31, MIRANTE e T21

ÉPOCA 03	COORDENADAS MÉDIAS		DESVIO PADRÃO
	X (m)	Y (m)	DA MÉDIA
MS30	83.911,7348	158.147,5145	$\sigma_{x,y}$ (m) 0,0233
MS40	83.994,2295	158.090,4227	0,0179
MS60	84.158,4620	157.976,3015	0,0345
MS70	84.240,5602	157.918,9558	0,0329
MS80	84.322,4394	157.861,9150	0,0285
MS90	84.404,9254	157.804,5394	0,0256
MS100	84.486,8042	157.747,7617	0,0337
MS110	84.593,7538	157.673,8793	0,0428
MS120	84.626,6411	157.651,2291	0,0328
MS130	84.733,2692	157.525,2725	0,0294
MS140	84.757,2562	157.454,2256	0,0332
MS150	84.772,4184	157.387,7939	0,0211
MS101	84.462,9980	157.711,2722	0,0267
MS111	84.544,0184	157.655,3025	0,0218
MS121	84.602,2222	157.615,2307	0,0277
MS131	84.699,6687	157.493,9043	0,0370
MS141	84.718,5846	157.424,9223	0,0385

Fonte: O autor.

Foi calculado também o vetor dos resíduos (V), que consiste na relação da diferença em que as coordenadas médias de cada época estão em relação aos valores encontrados de cada pilar em sua respectiva época. Esses valores podem ser vistos no Apêndice A.

Partindo-se do pressuposto do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), o qual estabelece como solução única para os parâmetros estimados a menor soma dos quadrados dos resíduos, temos que para as Épocas 01, 02 e 03 os valores respectivos, 0,0498m², 0,0739m² e 1,6445m², ou seja, assumindo que a média dos valores são os que mais se aproximam da realidade, pode-se afirmar que os resultados mais prováveis e com o menor índice de erros grosseiros ou sistemáticos para as quantidades ajustadas são os valores para as coordenadas da Época 01.

- *Variação de coordenadas*

Nas Tabelas 21 a 23 podem ser visualizadas os deslocamentos dos dezessete pontos a jusante da barragem da UHE em relação a época de referência da CEMIG. Estas, foram calculadas a partir das interseções, T31-MIRANTE, T31-T21 e T21-MIRANTE nas diferentes épocas de levantamento. Os deslocamentos que foram menores que o limite tolerável especificado em 15 milímetros estão realçados em negrito.

Tabela 18 – Deslocamentos calculados a partir dos pontos T31 e MIRANTE em relação a referência da CEMIG nas épocas 01, 02 e 03 de levantamento.

T31	ÉPOCA 01		ÉPOCA 02		ÉPOCA 03	
MIRANTE	dX (m)	dY (m)	dX (m)	dY (m)	dX (m)	dY (m)
MS30	0,0045	0,0038	0,0066	-0,0050	0,0016	-0,0014
MS40	0,0050	0,0015	0,0205	0,0337	0,0088	0,0134
MS60	0,0141	-0,0007	-0,0008	-0,0048	0,0018	0,0001
MS70	0,0022	-0,0052	0,0007	-0,0049	0,0021	-0,0021
MS80	-0,0055	-0,0157	0,0077	-0,0064	-0,0051	-0,0130
MS90	-0,0011	-0,0099	0,0057	-0,0059	-0,0041	-0,0129
MS100	-0,0051	-0,0130	0,0014	-0,0111	-0,0020	-0,0085
MS110	-	-	0,0033	-0,0066	-0,0043	-0,0066
MS120	-0,0052	-0,0117	-0,0062	-0,0109	-0,0027	-0,0032
MS130	-0,0087	-0,0088	-0,0049	-0,0056	0,0011	-0,0026
MS140	-0,0079	-0,0059	-0,0137	-0,0130	-0,0054	-0,0059
MS150	0,0000	-0,0058	-0,0003	-0,0125	0,0147	-0,0097
MS101	0,0012	-0,0179	-0,0046	-0,0092	-0,0041	-0,0155

continua

conclusão

MS111	-0,0095	-0,0175	0,0012	-0,0065	-0,0020	-0,0143
MS121	-	-	0,0059	-0,0050	-0,0088	-0,0107
MS131	0,0102	-0,0176	0,0005	-0,0015	-0,0106	-0,0134
MS141	-0,0008	-0,0079	-0,0014	-0,0010	-0,0143	-0,0120

Fonte: O autor.

Tabela 19 – Deslocamentos calculados a partir dos pontos T31 e T21 em relação a referência da CEMIG nas épocas 01, 02 e 03 de levantamento.

T31	ÉPOCA 01		ÉPOCA 02		ÉPOCA 03	
T21	dX (m)	dY (m)	dX (m)	dY (m)	dX (m)	dY (m)
MS30	0,0046	0,0041	0,0085	0,0037	0,0033	0,0065
MS40	-	-	0,0514	0,0848	-	-
MS60	0,0067	-0,0037	0,0035	-0,0030	0,0055	0,0015
MS70	0,0050	-0,0047	0,0040	-0,0043	0,0057	-0,0014
MS80	0,0142	-0,0151	0,0120	-0,0063	0,0160	-0,0124
MS90	0,0120	-0,0109	0,0057	-0,0059	0,0127	-0,0142
MS100	0,0132	-0,0158	0,0103	-0,0125	0,0133	-0,0109
MS110	-	-	0,0064	-0,0073	0,0074	-0,0093
MS120	0,0112	-0,0158	0,0075	-0,0144	0,0060	-0,0054
MS130	0,0047	-0,0137	0,0033	-0,0086	0,0011	-0,0026
MS140	0,0058	-0,0117	0,0054	-0,0212	0,0022	-0,0092
MS150	0,0026	-0,0071	0,0024	-0,0138	0,0014	-0,0031

Fonte: O autor.

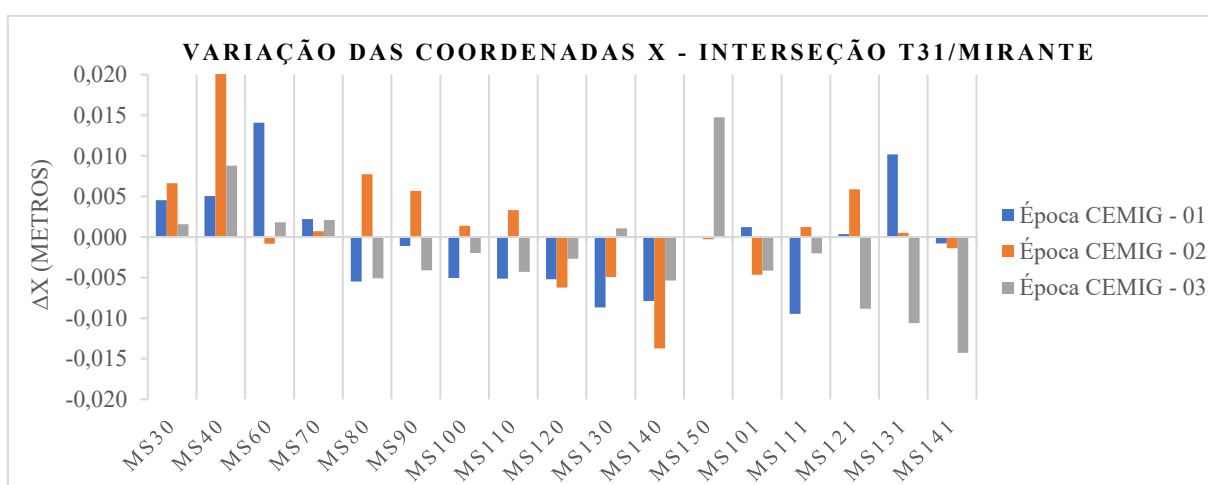
Tabela 20 – Deslocamentos calculados a partir dos pontos T21 e MIRANTE em relação a referência da CEMIG nas épocas 01, 02 e 03 de levantamento.

T21	ÉPOCA 01		ÉPOCA 02		ÉPOCA 03	
MIRANTE	dX (m)	dY (m)	dX (m)	dY (m)	dX (m)	dY (m)
MS30	0,0045	0,0041	0,0071	0,0051	0,0021	0,0078
MS40	-	-	0,0015	0,0123	-	-
MS60	0,0117	-0,0095	0,0006	0,0003	0,0030	0,0043
MS70	0,0032	-0,0025	0,0018	-0,0017	0,0033	0,0014
MS80	0,0021	0,0007	0,0093	-0,0029	0,0030	0,0045
MS90	0,0045	-0,0002	0,0057	-0,0058	0,0030	-0,0005
MS100	0,0037	-0,0004	0,0056	-0,0050	0,0054	0,0020
MS110	0,0012	-0,0003	0,0051	-0,0045	0,0025	0,0011
MS120	0,0051	-0,0009	0,0024	-0,0018	0,0028	0,0025
MS130	0,0021	-0,0004	0,0017	-0,0004	0,0011	-0,0026
MS140	0,0038	0,0022	0,0026	-0,0018	0,0011	-0,0015
MS150	0,0024	-0,0044	0,0021	-0,0110	0,0028	-0,0170

Fonte: O autor.

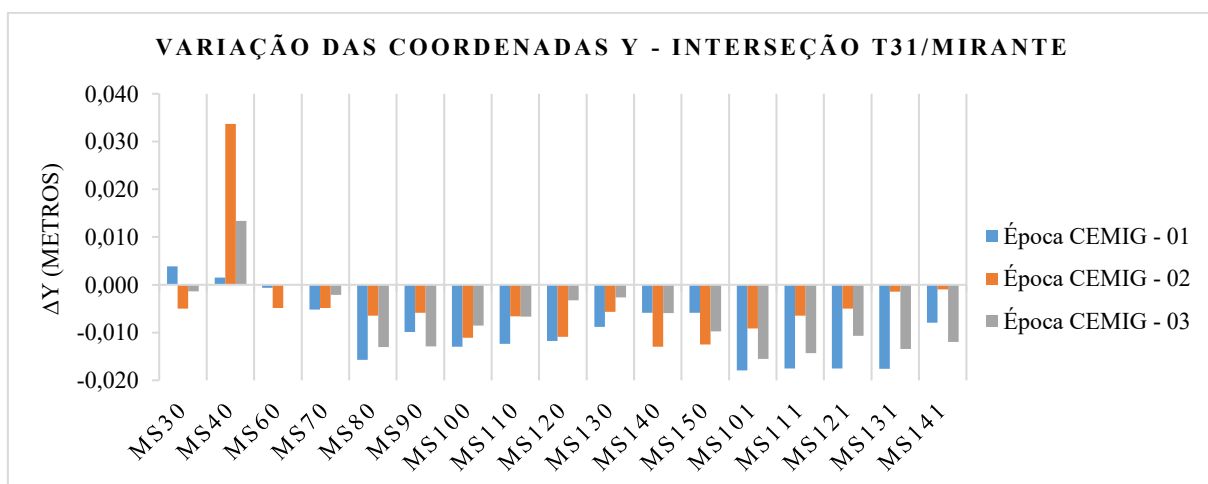
No caso do método da variação de coordenadas, os resultados se demonstram bastante otimistas em relação ao método da irradiação, pois, grande parte de seus valores estão dentro da tolerância de 15mm, em contrapartida, a dificuldade de se obter o desvio padrão do deslocamento inviabiliza este método pela questão da confiabilidade no processo e de sua resultante. A seguir, estão os Gráficos 1 ao 6, estes representam a variação das coordenadas em relação a época de referência e suas interseções.

Gráfico 1 – Variações das coordenadas X nas Épocas de levantamento 01 02 e 03 em relação a referência CEMIG, Intersecção T31/MIRANTE



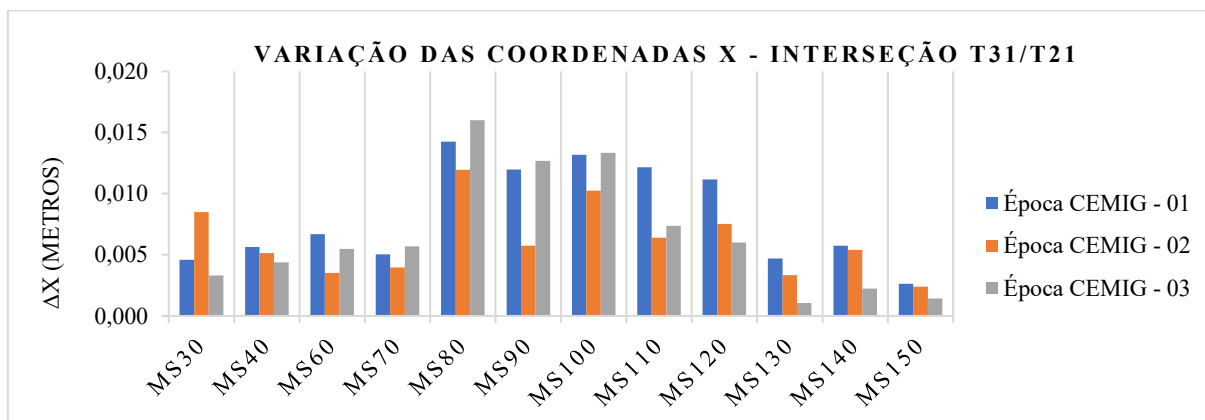
Fonte: O autor.

Gráfico 2 – Variações das coordenadas Y nas Épocas de levantamento 01 02 e 03 em relação a referência CEMIG, Intersecção T31/MIRANTE



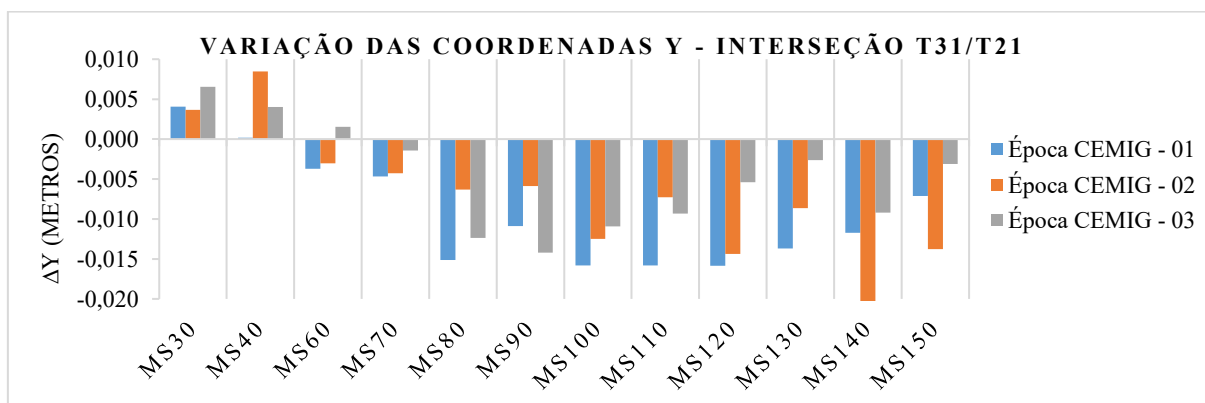
Fonte: O autor.

Gráfico 3 – Variações das coordenadas X nas Épocas de levantamento 01 02 e 03 em relação a referência CEMIG, Intersecção T31/T21



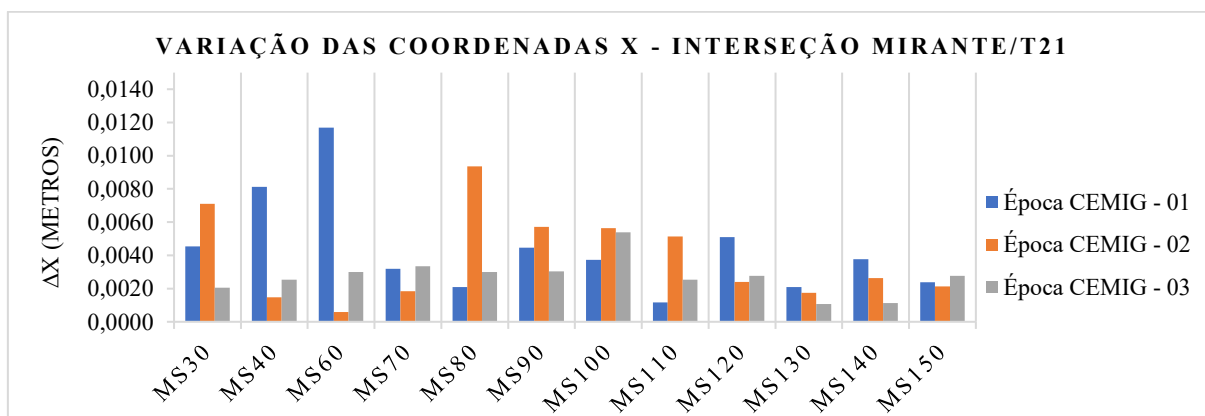
Fonte: O autor.

Gráfico 4 – Variações das coordenadas Y nas Épocas de levantamento 01 02 e 03 em relação a referência CEMIG, Intersecção T31/T21



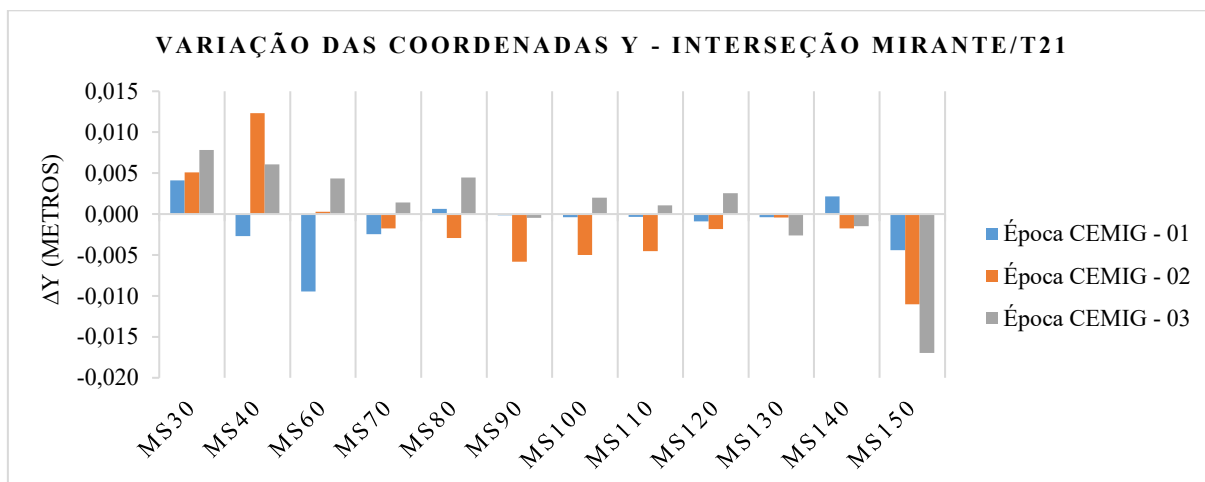
Fonte: O autor.

Gráfico 5 – Variações das coordenadas X nas Épocas de levantamento 01 02 e 03 em relação a referência CEMIG, Intersecção MIRANTE/T21



Fonte: O autor.

Gráfico 6 – Variações das coordenadas Y nas Épocas de levantamento 01 02 e 03 em relação a referência CEMIG, Intersecção MIRANTE/T21



Fonte: O autor.

Ao analisar os gráficos, no amplo dos dados verifica-se que as variações máximas chegam a ordem do centímetro (3,3 cm), enquanto que as variações mínimas são da ordem do centésimo do milímetro (-0,05 mm).

- *Análises sobre os métodos utilizados*

Por fim, nota-se que a viabilidade do monitoramento estrutural na barragem da UHE Emborcação por meio de técnicas topográficas no plano horizontal, está ligado principalmente ao empenho no processo, o qual deve ser bem elaborado e fielmente seguido de acordo bibliografias, pois se bem empregado, demonstra a validez do método.

A aplicação do método topográfico da irradiação na auscultação de barragens, o qual já é amplamente utilizado, se demonstra bastante positivo para tal fim, pois é um método rápido em comparação a outros como GNSS, o qual proporciona observações diretas e com a qualidade facilmente obtida pelo usuário acerca do mensurando, e que também, podem ser utilizadas como suporte para outras técnicas de monitoramento. Quanto a variação de coordenadas demonstra resultados aparentemente aceitáveis, tendo que ser estes, melhor estudados para que possa se obter uma forma de serem validados e certificados sobre o quão próximo estão do deslocamento real.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A elaboração deste projeto teve por objetivo elaborar a metodologia acerca do monitoramento bidimensional e comportamento dos pontos a jusante da barragem da Usina Hidrelétrica de Emborcação por meio do método da irradiação e a comparação com os resultados obtidos da variação de coordenadas.

Para alcançar o objetivo proposto foi estabelecido uma rotina para o monitoramento geodésico na região da usina. Este, foi realizado através dos marcos de centragem forçada com coordenadas topográficas conhecidas, considerados estáveis e isentos de deslocamentos por influência do barramento, os quais já tinham sido estabelecidos pela CEMIG.

Entre os 74 prismas presentes na estrutura da UHE Emborcação, estabeleceram-se 17 para a realização deste trabalho, os quais foram definidos de forma que ficassem espaçados por todo o barramento cerca de 50 a 100m, e intervisíveis por pelo menos dois pilares, permitindo o monitoramento distribuído dos pontos por toda a estrutura.

No que se trata do levantamento topográfico por meio da estação total robotizada, realização do método de irradiação tridimensional concomitantemente com a variação de coordenadas, tornou o monitoramento dos 17 pontos presentes na jusante da barragem, mais rápido e eficiente. Pois a MS50, é de fácil manuseio e interface amigável o que melhora o rendimento em campo, minimizando a influência do observador o que acaba por melhorar a precisão das observações, principalmente em tarefas simples como inverter em posições diretas e inversas a orientação do aparelho.

Quanto ao cálculo das coordenadas dos pontos monitorados, desenvolveu-se uma planilha eletrônica a qual permitiu automatizar e efetuar todos os cálculos necessários dos dados observados em campo. Com isso, tornou-se rápido todos os processos e análises antes da obtenção final das coordenadas de cada um dos pontos situados jusante da barragem. Outra contribuição deste é que se tornou possível introduzir e compreender melhor como os softwares comerciais atuam nesse âmbito.

As coordenadas obtidas por meio do método da irradiação, na maioria dos casos, não foram satisfatórias quando comparados com o desvio padrão tolerável calculado pela propagação de erros da MS50. Este fato, pode ser devido à não realização redundante dos pares de leituras conjugadas que demonstram necessários conforme nas literaturas de Corrêa (2012) e Siguel (2013). A não realização destes, é explicada pela duração por época das campanhas, pois devido ao transporte cedido, a mesma tinha que ser realizada impreterivelmente num mesmo dia, cerca de 6 horas de levantamento compunham o deslocamento médio de 1,5 km

entre os pilares e distâncias percorridas pelos auxiliares entre os pontos monitorados presentes na crista e berma.

Ainda se tratando do método da irradiação, as coordenadas médias obtidas da Época 01 se mostraram mais confiáveis que as demais, devido ao menor valor da soma do quadrado dos resíduos. Quanto ao método da variação de coordenadas, o mesmo demonstrou ser bastante otimista na estima dos movimentos estruturais do barramento, precisando ser melhor estudado e analisado para que possam demonstrar resultados que sejam válidos que demonstrem qualquer comportamento em recalques.

Em suma, apesar dos resultados não satisfatórios neste estudo de caso, pode se afirmar que o material e métodos empregados neste trabalho, servem como apoio para trabalhos futuros de monitoramento estrutural por meio de equipamentos topográficos, que a nível de graduação, carece de uma literatura de apoio simples e enxuta. Também tem como possibilidade que a mesma seja replicada em outros estudos de caso, fazendo com que a rotina elaborada seja aperfeiçoada e que os mesmos erros não sejam cometidos.

Visto as dificuldades enfrentadas para a realização deste trabalho, recomenda-se:

- a) Realizar estudos sobre o comportamento da rede geodésica e seus pilares em épocas distintas, utilizando diversos métodos seja eles por satélites, Geodésia ou por meio de Topografia;
- b) Buscar automatizar a coleta de dados, o que ajuda a eliminar erros grosseiros causados pela cópia manual de dados e a partir destes elaborar uma rotina para converter os dados de para que sejam passíveis de cálculo pelo software utilizado;
- c) Pesquisar outros métodos e testes estatísticos que possam ser aplicados nos resultados das coordenadas e deslocamentos obtidos;
- d) Realizar campanhas de levantamentos em temperaturas mais amenas para minimizar a influência do fenômeno de refração atmosférica, bem como, efetivar estudos para determinar qual a influência da mesma nas medidas realizadas e como corrigi-las; e
- e) Verificar qualitativamente e quantitativamente os erros que se propagam durante todo o processo de aplicação do método de irradiação aplicado ao monitoramento de estruturas.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13133**: Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro, 1994. 35 f.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. **ISO GUM 95**. Terceira Edição Brasileira. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO. Edição Revisada. Agosto de 2003. 120p.

ANA. Agência Nacional das Águas. **Fatos e Tendências**. 2. ed. Brasília: ANA. set. 2009. 36 f. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/fatosetendencias/edicao_2.pdf>. Acesso em: 18/04/2018.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Diretrizes para a Construção de Barragens: Manual do Empreendedor Sobre Segurança de Barragens**. Brasília: ANA, 2016. 72 f. 6 v. Disponível em: <<http://www.snish.gov.br/portal/snish/downloads/volume-vi-diretrizes-para-a-construcao-de-barragens>>. Acesso em: 14/04/2018.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Guia do Empreendedor de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Brasília: ANEEL, 2003. 703 f. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/Guia_empreendedor_PCH_2003.pdf/feab74d9-2b01-4c45-a24f-d0e47adc5ce5>. Acesso em: 03/05/2018.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: ANEEL, 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf>. Acesso em: 02/04/2018.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Dados Abertos: Geração**. Brasília: ANEEL, 2018. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/web/guest/dados/geracao>>. Acesso em: 10/04/2018.

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. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112334.htm>. Acesso em: 03/05/2018.

BRITO, A. M. A. C. **Compactação de Aterros de Barragens. Novas Metodologias de Controle**. Lisboa: 2006. 233 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade Técnica de Lisboa. Disponível em <<http://repositorio.inec.pt:8080/bitstream/123456789/15540/1/tese%20%20Andreia%20Cistina%20final.pdf>>. Acesso em: 23/05/2018.

CAMPAGNOLI, F.; DINIZ, N.C. **Gestão de Reservatórios de Hidrelétricas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 192 f.

CHAVES, J. C. **Controle de Deformações em Barragens: Métodos de Monitoramento e Viabilidade de Utilização do GPS**. São Paulo. 1994. 197f. Dissertação (Mestrado em Enge-

nharia de Transportes) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CORRÊA, I. C. S. **Topografia Aplicada à Engenharia Civil**. 13. ed. Porto Alegre, 2012. 140 p. (Apostila). Disponível em: <http://www.ufrgs.br/igeo/departamentos/geodesia/trabalhosdidaticos/Topografia_Aplicada_A_Engenharia_Civil/Apostila/TopoAplicada_2012.pdf>. Acesso em: 14/05/2018.

COSTA, T.; LANÇA, R. **Barragens**. Escola Superior de Tecnologia Universidade de Algarve, Portugal, 28 de fevereiro de 2001.

DEPARTMENT OF ARMY – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Manual 1110- 1-1004. **Deformation Monitoring and Control Surveying**. Washington, DC, 1994. Disponível em: <<https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/ADA402107.xhtml>>. Acesso em: 10/05/2018.

ELETROBRÁS. **Concreto Massa no Brasil: Memória Técnica**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1989. 3v.

_____. Centrais Elétricas Brasileiras. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidroelétricas**. Rio de Janeiro: 2003. Disponível em: <<https://www.elektrobras.com/ELB/data/Pages/LUMISF99678B3PTBRIE.htm>>. Acesso em: 03/05/2018.

FAZAN, J. A. **Aplicação do Teste de Congruência Global e Análise Geométrica para Detecção de Deslocamentos em Redes Geodésicas: Estudo de Caso na UHE de Itaipu**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GALLAS, M. R. **Incerteza de Medição**. Notas de Aula da Disciplina de Física IV. IF-UFRGS, 2012.

TIAGO FILHO, G. L. *et al.* **Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos**. 1. ed. Brasília: Minis-tério de Minas e Energia, 2008. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/luzpara todos/downloads/Solucoes_Energeticas_para_a_Amazonia_Hidroeletrico.pdf>. Acesso em: 09/04/2018.

TOGINHO FILHO, D. O., ANDRELLO, A.C. **Catálogo de Experimentos do Laboratório Integrado de Física Geral**. Universidade Estadual de Londrina - Departamento de Física. Março de 2009. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce5702/medicao.pdf>>. Acesso em: 31/10/2018.

GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. 2. ed. Curitiba: Ed. UFPR, 2015. 430 px. (Pesquisa; n.281).

KLEIN, I. **Controle de Qualidade no Ajustamento de Observações Geodésicas**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, UFRGS. 2012. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/srm/ppgsr/publicacoes/dissert.ivandro_klein.pdf>. Acesso em: 10/06/2018

LEICA GEOSYSTEMS® a. **Leica MS50/TS50/TM50 User Manual**. Manual do usuário, versão 1.1.1, inglês. Disponível em: <<http://surveyequipment.com/assets/index/download/id/219/>>. Acesso em: 13/05/2018.

LEICA GEOSYSTEMS® b. **TPS1100+ Technical Reference Manual**. Manual técnico, versão 7.0, inglês. Disponível em: <http://www.gefos-leica.cz/ftp/Totalni_stanice/Navody/EN_Originaly/TPS1200_v7.0/TPS1200+_TechRef_en.pdf>. Acesso em: 13/05/2018.

LIMA JÚNIOR, P.; SILVA, M. T. X.; SILVEIRA, F. L.; VEIT, E. A. **O Laboratório de Mecânica**. Porto Alegre: IF-UFRGS, 2012.

MACHADO, W. G. F. **Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração**. São Paulo: 2007. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São Paulo.

MELLO, F. M. **A Importância dos Reservatórios Formados por Barragens**. Newsletter CBDB (Comitê Brasileiro De Barragens), 3 f, jul. 2013. Disponível em: <http://www.cbdb.org.br/site_antigo_2013/img/47artigo.pdf>. Acesso em: 18/04/2018.

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, nº 4, p.498-513, outubro a dezembro, 2009. Disponível em: <<http://www.idea.ufpr.br/documents/181>>. Acesso em: 17/05/2018

MUGUIO, M. R. **Implantação e Análise da Estação GNSS para o Monitoramento Contínuo da Barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá**. 2012. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/29626>>. Acesso em: 10/06/2018.

NADAL, C. A. *et al.* **Monitoramento Geodésico da Barragem da UHE de Mauá Utilizando Métodos Geodésicos que Permitem a Precisão do Milímetro**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 30., 2015, Foz do Iguaçu, PR: CBDB. 16 f.

RIBEIRO, F. C. D. **Proposta de Metodologia para Verificação da Estabilidade dos Pilares de Redes para Monitoramento Geodésico de Barragens - Estudo de Caso**. São Paulo: 2008. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo.

SIGUEL, A. R. **Monitoramento da Barragem da Usina Hidrelétrica Mauá Utilizando Irradiação Tridimensional**. Curitiba: 2013. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1884/29580>>. Acesso em: 05/05/2018.

SOARES, M. A. *et al.* **Novas Metodologias Aplicadas ao Monitoramento da Barragem de Salto Caxias. Espaço Energia**, Curitiba, 1. ed. Outubro de 2004.

VEIGA, L. A. K., ZANETTI, M. A. Z., FAGGION, P. L. **Fundamentos de Topografia**. Curitiba: UFPR, 2012. 274 f. Apostila. Disponível em: <www.cartografica.ufpr.br/docs/topo2/apos_topo.pdf>. Acesso em: 05/05/2018.

APÊNDICE

APÊNDICE A – TABELAS DOS RESÍDUOS CALCULADOS A PARTIR DOS PILARES T31, MIRANTE E T21 PARA AS ÉPOCAS 01, 02 E 03

Tabela 21 – Resíduos calculados a partir da diferença entre a média das coordenadas e as coordenadas obtidas nos pilares T31, MIRANTE e T21 para a Época 01

ÉPOCA 01	RESÍDUOS (MÉDIA-ÉPOCA)					
	T31		MIRANTE		T21	
	VX (m)	VY (m)	VX (m)	VY (m)	VX (m)	VY (m)
MS30	-0,0200	-0,0390	-0,0029	0,0156	0,0229	0,0235
MS40	-0,0021	-0,0239	0,0021	0,0239	-	-
MS60	-0,0551	-0,0069	0,0313	-0,0058	0,0238	0,0127
MS70	-0,0380	-0,0046	-0,0051	0,0057	0,0431	-0,0011
MS80	-0,0520	-0,0061	-0,0038	0,0092	0,0558	-0,0031
MS90	-0,0512	0,0087	0,0142	-0,0064	0,0370	-0,0023
MS100	-0,0457	0,0063	-0,0085	0,0044	0,0541	-0,0108
MS110	-	-	-0,0246	0,0151	0,0246	-0,0151
MS120	-0,0532	0,0047	0,0057	0,0067	0,0475	-0,0113
MS130	-0,0352	0,0140	-0,0110	0,0117	0,0462	-0,0257
MS140	-0,0356	0,0203	-0,0102	0,0068	0,0458	-0,0271
MS150	-0,0294	0,0261	-0,0127	0,0136	0,0421	-0,0397
MS101	-0,0271	0,0084	0,0271	-0,0084	-	-
MS111	-0,0373	-0,0299	0,0373	0,0299	-	-
MS121	-	-	-	-	-	-
MS131	-0,0549	0,0323	0,0549	-0,0323	-	-
MS141	-0,0111	0,0161	0,0111	-0,0161	-	-

Fonte: O autor.

Tabela 22 – Resíduos calculados a partir da diferença entre a média das coordenadas e as coordenadas obtidas nos pilares T31, MIRANTE e T21 para a Época 02

ÉPOCA 02	RESÍDUOS (MÉDIA-ÉPOCA)					
	T31		MIRANTE		T21	
	VX (m)	VY (m)	VX (m)	VY (m)	VX (m)	VY (m)
MS30	-0,0322	-0,0344	-0,0180	0,0169	0,0502	0,0175
MS40	-0,0115	-0,0252	-0,0402	0,0238	0,0517	0,0014
MS60	-0,0478	0,0020	0,0147	0,0028	0,0331	-0,0048
MS70	-0,0465	0,0128	0,0089	-0,0016	0,0376	-0,0113
MS80	-0,0339	0,0077	-0,0145	0,0064	0,0484	-0,0141
MS90	-0,0365	0,0318	-0,0105	-0,0058	0,0470	-0,0260
MS100	-0,0369	0,0035	-0,0149	0,0131	0,0518	-0,0166

continua

conclusão

MS110	-0,0258	0,0411	-0,0128	0,0025	0,0386	-0,0436
MS120	-0,0193	0,0525	-0,0133	-0,0038	0,0326	-0,0487
MS130	-0,0168	0,0526	-0,0039	-0,0068	0,0207	-0,0458
MS140	-0,0063	0,0741	-0,0028	-0,0230	0,0090	-0,0511
MS150	-0,0023	0,0477	-0,0238	0,0121	0,0261	-0,0598
MS101	-0,0168	0,0128	0,0168	-0,0128	-	-
MS111	-0,0128	0,0196	0,0128	-0,0196	-	-
MS121	-0,0129	0,0319	0,0129	-0,0319	-	-
MS131	0,0044	0,0226	-0,0044	-0,0226	-	-
MS141	-0,0011	0,0246	0,0011	-0,0246	-	-

Fonte: O autor.

Tabela 23 – Resíduos calculados a partir da diferença entre a média das coordenadas e as coordenadas obtidas nos pilares T31, MIRANTE e T21 para a Época 03

RESÍDUOS (MÉDIA-ÉPOCA)

ÉPOCA 03	T31		MIRANTE		T21	
	VX (m)	VY (m)	VX (m)	VY (m)	VX (m)	VY (m)
MS30	-0,0283	-0,0403	-0,0019	0,0200	0,0302	0,0203
MS40	-0,0285	-0,0208	0,0285	0,0208	-	-
MS60	-0,0555	-0,0124	0,0114	0,0122	0,0441	0,0002
MS70	-0,0522	-0,0085	0,0059	0,0116	0,0463	-0,0032
MS80	-0,0478	-0,0028	0,0050	0,0106	0,0428	-0,0078
MS90	-0,0475	-0,0081	0,0030	0,0148	0,0445	-0,0067
MS100	-0,0322	0,0121	-0,0053	0,0087	0,0374	-0,0208
MS110	-0,0323	0,0161	0,0001	0,0028	0,0322	-0,0189
MS120	-0,0311	0,0152	-0,0060	0,0098	0,0371	-0,0250
MS130	-0,0164	0,0268	-0,0111	0,0128	0,0275	-0,0396
MS140	-0,0192	0,0115	-0,0041	0,0168	0,0233	-0,0283
MS150	0,0107	0,0188	-0,0507	0,0273	0,0400	-0,0461
MS101	-0,0147	0,0031	0,0147	-0,0031	-	-
MS111	-0,0158	0,0048	0,0158	-0,0048	-	-
MS121	-0,0064	-0,0002	0,0064	0,0002	-	-
MS131	-0,0069	-0,0022	0,0069	0,0022	-	-
MS141	-0,0036	-0,0053	0,0036	0,0053	-	-

Fonte: O autor.

ANEXO

ANEXO A - ZONAS DA BARRAGEM DA UHE EMBORCAÇÃO

