

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

RAFAEL MARTINS DE CARVALHO ARAUJO

**AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO TEMPORAL DE MARCOS DE APOIO PARA
AUSCULTAÇÃO DE BARRAGENS**

MONTE CARMELO

2019- 2

RAFAEL MARTINS DE CARVALHO ARAUJO

**AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO TEMPORAL DE MARCOS DE APOIO PARA
AUSCULTAÇÃO DE BARRAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Monte Carmelo, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. George Deroco Martins

Coorientador: Prof. Msc. Vinicius Francisco Rofatto

MONTE CARMELO

2019 – 2

RAFAEL MARTINS DE CARVALHO ARAUJO

**AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO TEMPORAL DE MARCOS DE APOIO PARA
AUSCULTAÇÃO DE BARRAGENS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Monte Carmelo, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel.

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Msc. Vinicius Francisco Rofatto, IG/UFU (Coorientador)
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Wagner Carrupt Machado, FECIV/UFU (Membro Convidado)
Universidade Federal de Uberlândia

MONTE CARMELO

2019 – 2

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por que sem ele, não sou nada, e com ele sou uma pessoa melhor a cada dia.

Em segundo agradeço meus pais, Jair Martins de Carvalho Araujo e Walda Helena de Carvalho Araujo, por terem me dado a educação que me deram, mesmo diante das dificuldades, por sempre me guiarem as melhores escolhas, por sempre acreditarem em mim nos momentos tristes e felizes de minha vida e assim serem os melhores amigos que uma pessoa pode ter.

Em terceiro agradeço a minha irmã, Gabriela Martins de Carvalho Araujo, que mesmo sendo mais nova do que eu, viveu coisas que não pude viver, sempre me deu conselhos para não cometer os mesmos erros que ela, e sempre esteve ao meu lado nessa trajetória.

Agradeço também a minha família, desde os meus tios e tias, primos e primas, amigos e colegas que de maneira direta ou indireta, estiveram me auxiliando.

Em especial, agradeço aos meus amigos Kairon Carlos, Lucas Rodrigues, Marco Aurélio, Pablo Henrique, Samuel Rodrigues e Vinicius Werneck, que sempre estiveram ao meu lado nos momentos de dificuldades e descontração dentro e fora da universidade.

Ao grupo de Jovens Shalom e meus amigos contidos nele, sempre sendo a base para minha fé, e o motivo por qual acredito que a amizade verdadeira vai além dos pros diagnósticos exigidos pela sociedade.

E a Universidade Federal de Uberlândia, ao curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, a 9ª Turma da qual faço parte onde encontrei várias amizades que levarei para o resto da vida, e aos professores e alunos que auxiliaram para que esse projeto desse certo, em especial ao docente João Paulo pelo auxílio no campo e aos docentes George Deroco pela orientação, Vinicius Roffato pela coorientação, Gabriel Guimarães pelas dicas na abordagem do tema, e a Wagner Carrupt pelas orientações nos projetos de iniciação científica, e por ter aberto meus olhos para o mundo da pesquisa, através de seus conselhos e de sua amizade.

Tudo é possível aquele que crê.

(Jesus Cristo, Marcos 9:23)

RESUMO

Este estudo teve por objetivo detectar possíveis deslocamentos horizontais nos marcos superficiais da barragem da UHE de Emborcação, por meio da comparação entre as campanhas. Para isto foi realizada em um primeiro momento uma campanha para levantamento das observações referentes aos marcos de centragem forçada da barragem, pelo método de irradiação bidimensional, e em segundo momento a aquisição dos dados de Vieira (2018), referentes a três levantamentos nos marcos superficiais da área de estudo. Os resultados encontrados após o ajustamento e controle de qualidade das campanhas e posterior comparação entre elas, indicaram valores acima do tolerável pela literatura para os marcos analisados, implicando possíveis problemas no modelo funcional utilizado, que por sua vez pode não ter se adequado a realidade física do estudo, sendo assim, difícil afirmar possíveis deslocamentos horizontais nos marcos superficiais da barragem. Entretanto, a metodologia aplicada tem viés para ser usada em outros estudos de caso para barragens de terra e enrocamento, devido as técnicas aplicadas possuírem grande confiabilidade estatística.

Palavras Chaves: Monitoramento de estruturas; Irradiação bidimensional; Controle de qualidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Deslocamento horizontal da crista da barragem	16
Figura 2 – Método de Irradiação 2D	18
Figura 3 – Representação do método polar	18
Figura 4 - Mapa de Localização da UHE de Emborcação	26
Figura 5 – T21	27
Figura 6 – T31	27
Figura 7 – MIRANTE	28
Figura 8 – Marco Superficial MS-150	28
Figura 9 – Leica Nova MS50	29
Figura 10 – Prisma circular e base nivelante	29
Figura 11 – Adaptadores para encaixe da estação e base nivelante dos prismas, com centragem forçada nos marcos	29
Figura 12 – Fluxograma da primeira parte da metodologia	30
Figura 13 - Fluxograma da segunda parte da metodologia	31
Figura 14 - Método de medição	32
Figura 15 – Estacionada em Mirante	33
Figura 16 – Estacionada em T21	34
Figura 17 – Estacionada em T31	34
Figura 18 – Trecho das observações na estação T31	35
Figura 19 – Ajustamento pelo Método Paramétrico	37
Figura 20 – Teste Global do Ajustamento	37
Figura 21 – Teste do Data Snooping	38
Figura 22 – Distribuição dos pontos em bom estado da UHE Emborcação	39
Figura 23 – Levantamento pelo método de irradiação nos alvos a montante	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Campanhas de monitoramento na UHE de Emborcação.....	39
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas dos marcos de centragem forçada T21, T31 e MIRANTE	32
Tabela 2 – Coordenadas ajustadas para os marcos de centragem forçada	38
Tabela 3 – Coordenadas dos pontos a serem monitorados	40
Tabela 4 – Coordenadas ajustadas para a primeira campanha	43
Tabela 5 – Coordenadas ajustadas para a segunda campanha	43
Tabela 6 – Coordenadas ajustadas para a terceira campanha	44
Tabela 7 – Somatório dos resíduos das observações nas campanhas	44
Tabela 8 – Variação das coordenadas para as componentes X e Y das Épocas 2, 3 e CEMIG em relação à Época 1	45
Tabela 9 – Valores aceitos para variação máxima tolerável em deslocamentos horizontais	48
Tabela 10 – Variação das coordenadas para as componentes X e Y das Épocas 1, 2 e 3 em relação à Época CEMIG	49
Tabela 11 – Valores aceitos para variação máxima tolerável	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação das coordenadas para a componente X das Épocas 2, 3 e CEMIG em relação à Época 1 para os pontos monitorados	46
Gráfico 2 – Variação das coordenadas para a componente Y das Épocas 2, 3 e CEMIG em relação à Época 1 para os pontos monitorados	47
Gráfico 3 – Variação das coordenadas para a componente X das Épocas 1, 2 e 3 em relação à Época CEMIG para os pontos monitorados	50
Gráfico 4 – Variação das coordenadas para a componente 4 das Épocas 1, 2 e 3 em relação à Época CEMIG para os pontos monitorados	51

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
FINAPE	Financiadora de Estudos e Projetos
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GO	Goiás
LTGEO	Laboratório de Topografia e Geodésia
MG	Minas Gerais
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MW	Megawatt
NBR	Norma Brasileira
PD	Posição Direta
PI	Posição Inversa
RN	Referência de Nível
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
VALE	Companhia Vale do Rio Doce

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	JUSTIFICATIVA	14
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
4.1	Deformação temporal de marcos de apoio em barragens	15
4.2	Levantamento topográfico	17
4.2.1	Levantamento por irradiações	17
4.3	Ajustamento de observações	19
4.3.1	Método dos Mínimos Quadrados	20
4.4	Controle de Qualidade	22
4.4.1	Teste Global do Ajustamento	22
4.4.2	Teste do <i>Data Snooping</i>	23
5	MATERIAL E MÉTODOS	26
5.1	Área de Estudo	26
5.1.1	Marcos de apoio da barragem de Emborcação	26
5.2	Material	27
5.3	Métodos	30
5.3.1	Levantamento dos dados dos Marcos de Centragem Forçada	32
5.3.1.1	Etapa de Campo	32
5.3.1.2	Aquisição e Processamento dos dados	34
5.3.1.3	Ajustamento e Controle de Qualidade dos Marcos de Centragem Forçada	36
5.3.2	Levantamento dos dados dos Marcos Superficiais da Barragem	38
5.3.2.1	Processamento dos dados	41
5.3.2.2	Ajustamento e Controle de Qualidade dos Marcos Superficiais da Barragem	41
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
6.1	Análise 1	45
6.2	Análise 2	49
6.3	Discussões	52

7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
	REFERÊNCIAS	55
	ANEXO A	58
	APÊNDICE A	59
	APÊNDICE B	60
	APÊNDICE C	61
	APÊNDICE D	62

1 INTRODUÇÃO

O homem e sua busca incansável por conhecimento estão transformando o meio em que vivemos em um ambiente cada vez mais tecnológico e produtivo. As grandes construções são um forte exemplo, onde a associação entre tecnologia disponível mais conhecimento adquirido, está gerando memoriosos projetos de engenharia, como exemplo, a Usina Hidrelétrica de Três Gargantas na China, o Canal Dubai nos Emirados Árabes Unidos, a Ponte Rio-Niterói no Rio de Janeiro e a Usina Hidrelétrica de Itaipu no Paraná.

Com o objetivo de promover benefícios tanto à sociedade quanto às empresas envolvidas, estas grandes obras demandam um alto investimento financeiro, sendo necessários profissionais de amplas áreas de conhecimento, para seu planejamento, construção e posterior monitoramento. Tomando por exemplo as hidroelétricas, vemos como a inserção de pessoas com conhecimento nas áreas de Geologia, Topografia, Construção Civil e Geodésia se julgam importante, devido à complexidade das variáveis físicas e ambientais envolvidas.

Estas áreas são responsáveis pelo estudo, medição, construção e monitoramento destas estruturas neste meio. Os profissionais habilitados a exercê-las, participam desde a fase de planejamento geológico, medição da área de impacto, construção do barramento, da casa de força e do vertedouro, à fase final de monitoramento da estrutura ao longo dos anos. Esta última etapa é realizada de maneira contínua, onde são utilizados marcos superficiais na barragem, e estações topográficas de referência em locais específicos da usina, para posteriores medições, a fim de identificar possíveis deslocamentos no maciço.

Destacam-se nesse processo, a forma de execução deste monitoramento, que hoje utiliza técnicas geodésicas convencionais, baseando no uso de instrumentos como estações totais e níveis, com a aplicação de métodos de triangulação, trilateração, poligonação e nivelamento geométrico. Além destas técnicas temos o emprego do GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e o laser scanner, sendo estes mais recentes, demandando uma maior precisão (NADAL, 2017).

Neste contexto, ressaltam-se os estudos de GRANEMANN (2005), RIBEIRO (2008) e SIGUEL (2013), onde são utilizadas as técnicas mais recentes para o monitoramento destas estruturas, sendo que o primeiro busca estabelecer uma rede geodésica para o monitoramento na barragem da UHE (Usina Hidrelétrica) de Salto de Caxias, no segundo a à busca por uma metodologia para verificação da estabilidade dos pilares da rede geodésica da UHE de Itaipu e a última para o monitoramento da barragem da UHE de Mauá. Tais estudos fazem uso das

técnicas topográficas e geodésicas de forma conjunta, onde mostram a importância destas áreas para análise de possíveis deslocamentos, reforçando o ideal da instrumentação e segurança para a auscultação de barragens.

Dessa forma, o estudo das eventuais mudanças de posição do barramento, e das estações topográficas de referência, visa garantir a prevenção e previsão de possíveis medidas a serem adotadas, caso a barragem venha a se romper, evitando perdas financeiras, humanas e ambientais, promovendo assim o funcionamento contínuo e seguro destas grandes construções.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O objetivo do estudo foi detectar possíveis deslocamentos horizontais nos marcos superficiais da barragem da UHE de Emborcação, pertencente a CEMIG (Companhia Elétrica do Estado de Minas Gerais), por meio da comparação entre as campanhas.

2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram realizados os objetivos específicos, a seguir:

- ❖ Detectar possíveis deslocamentos temporais nos marcos superficiais da estrutura.
- ❖ Avaliar o potencial dos equipamentos topográficos e da metodologia utilizada para detecção desses possíveis deslocamentos.

3 JUSTIFICATIVA

Grandes estruturas são projetadas de modo, que possíveis movimentos de contração e dilatação possam suceder, em seu meio. Isso ocorre, em razão da propriedade dos materiais envolvidos, onde alguns ao serem submetidos a grandes variações térmicas mudam a sua forma original, ficando mais finos ou mais espessos dependendo de suas atribuições e propriedades.

Em barragens de terra e enrocamento os materiais obtidos, são extraídos do meio natural. Fomentados por milhares e milhares de anos, através de processos químicos e físicos, os aglomerados de terra são agrupados no formato de taludes, semelhante as minas a céu aberto, recobertos pelos enrocamentos (blocos de rocha), compactados de forma a dar sustentação e estabilidade ao maciço (GOMES, 2015).

Estas matérias primas por possuírem propriedades únicas, podem causar movimentação em determinadas regiões da barragem. As ombreiras, por exemplo, estando localizadas nas extremidades do barramento, de modo consequente, sofrem com a ação das variações térmicas, ambientais e movimentos de fluência ou rastejo. Como resultado, as estruturas construídas sobre esta região estarão sujeitas aos mesmos efeitos, podendo desta forma, influenciar em possíveis medições para fins de monitoramento (SILVEIRA, 2017).

Logo, os marcos de centragem forçada construídas sobre as ombreiras, podem ou não sofrer as ações desses movimentos, sendo necessárias verificações de rotina para comprovar este princípio de deslocamento. Sendo de fundamental importância, essa ação reforça a confiabilidade das medidas no monitoramento dos marcos superficiais de uma barragem, pois são através destes marcos de centragem forçada, que são realizadas as leituras e determinado o quanto o barramento está deslocando.

Neste sentido, a Cemig possui um programa de Segurança de Barragens, que desenvolve atividades de monitoramento naquelas que compõem o sistema de suas usinas hidroelétricas, onde essas práticas visam garantir a segurança no processo de operação, estrutural e hidrológico do barramento, detectando em um prazo imediato, mudanças no comportamento da barragem, que possam afetar negativamente em seus deslocamentos previstos (DIVINO, 2010).

Isto torna rápido o efeito corretivo, caso haja um possível rompimento, como aconteceram nas barragens de Mariana em novembro de 2015 e na de Brumadinho em janeiro de 2019, em território brasileiro, ambas de rejeito e controladas pela Samarco Mineração S.A e pela VALE S.A (Companhia Vale do Rio Doce), respectivamente. Esses efeitos evitam assim, perdas ambientais e humanas, causadas por estes grandes empreendimentos em possíveis rompimentos, gerando maior segurança e menor receio à população que mora próxima a elas.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Deformação temporal de marcos de apoio em barragens

Estações topográficas de referência, marcos de apoio ou pilares, são locais utilizados para a realização de medidas, ângulos e distâncias, entre um ponto de referência e um ponto a ser observado, seja este realizado por uma estação total, um receptor GNSS ou um nível eletrônico. Por meio deles é possível determinar as coordenadas dos alvos e assim detectar possíveis deslocamentos na estrutura de interesse. No processo de identificação, os marcos da estrutura, muitas vezes, são assumidos como estáveis, sem o conhecimento prévio desta

condição, o que pode causar equívocos nas interpretações e análise dos resultados (RIBEIRO, 2008).

Em hidroelétricas, os fatores que influenciam no deslocamento destes marcos muitas vezes estão relacionados ao meio natural. Estudos como Martini et. al (2006), demonstram a importância das técnicas geotécnicas para análise da suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa nas áreas de influência das UHEs, onde a investigação na usina de Quebra Queixo, Santa Catarina, serviu para indicar quais locais devem ter um monitoramento mais intensivo. Como exemplo, temos os marcos topográficos construídos em encostas, que por serem classificados como locais de alta suscetibilidade a processos erosivos, necessitam de periódicas medições de posição, com instrumentos de precisão, estação total (AUGUSTO FILHO, 1995, *apud* MARTINI et.al, 2006).

Já os marcos superficiais, são geralmente instalados ao longo da crista da barragem e a jusante das bermas, para detectar os deslocamentos horizontais presentes na estrutura, após a sua fase de construção, no período de enchimento do seu reservatório e de operação (SILVEIRA, 2017). Estas análises são importantes para os órgãos responsáveis por essas estruturas, onde estudos de tal magnitude podem detectar variações entre a fase antes e depois do enchimento, como em Divino (2010), que cita um deslocamento de um marco superficial instalado a montante da barragem de Emborcação, de 66 cm para jusante, após o enchimento total do reservatório, e no seu oposto na mesma posição a jusante de 1m para jusante, figura 1.

Figura 1 – Deslocamento horizontal da crista da barragem



Fonte: (DIVINO, 2010)

Por meio destas análises, vemos como a deformação temporal dos marcos de apoio em barragens se mostra notável nos diversos meios, sejam em levantamentos topográficos para diagnóstico dos componentes de uma hidroelétrica, ou em levantamentos geodésicos para fins de nivelamento. Destacam-se as técnicas para investigação e manutenção dos mesmos, onde temos as geotécnicas para análise da suscetibilidade do solo, e o levantamento topográfico para eventuais mudanças de posição, sendo esta última, abordada para o presente estudo, para os marcos que compõem a UHE de Emborcação.

4.2 Levantamento topográfico

A Topografia é uma ciência exata, que busca definir e materializar pontos no terreno, a fim de identificar seus acidentes naturais ou artificiais, por meio de sistemas de medição apropriados. Uma definição mais robusta indica que, “A Topografia tem por finalidade determinar o contorno, dimensão e posição relativa de uma porção limitada da superfície terrestre, sem levar em conta a curvatura resultante da esfericidade terrestre” (ESPARTEL 1987, p.3).

Por meio deste princípio, e da instrumentação adequada, temos o que chamamos de levantamento topográfico. Ele é dado como um conjunto de métodos e processos, que através da exatidão pretendida, materializa primordialmente pontos de apoio no terreno, e assim, suas coordenadas topográficas. A estas coordenadas planimétricas são associados pontos de detalhes no terreno, representando a parte altimétrica que é feita por intermédio das curvas de nível, buscando numa escala pretendida a exata representação do terreno (NBR13133, 1994).

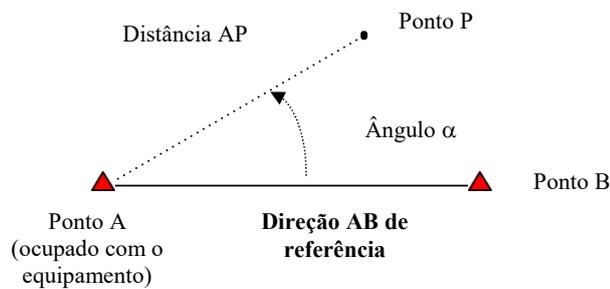
A determinação das coordenadas topográficas é feita por meio dos métodos que compõem o levantamento planimétrico, onde são definidos de acordo com a área e as condições do trabalho. Os métodos mais conhecidos e utilizados são a triangulação, a interseção e a irradiação, empregados em condições que se fazem necessários amarrações de detalhes e medições de pontos inacessíveis ou de difícil acesso.

4.2.1 Levantamento por irradiações

O método de levantamento por irradiações consiste em, a partir de uma linha de referência conhecida fazer a medição de ângulos e distâncias entre pontos de interesse, Figura 2. Semelhante a um sistema de coordenada polar, as suas distâncias são medidas por meio de trenas, distanciômetros ou por meio de instrumentação eletrônica (estação total). Neste, o

instrumento fica estacionado em um ponto de referência, e a partir dele, faz-se uma espécie de “varredura” das feições próximas a ele, medindo ângulos e distâncias para cada feição a ser representada (VEIGA et al., 2007).

Figura 2 – Método de Irradiação 2D

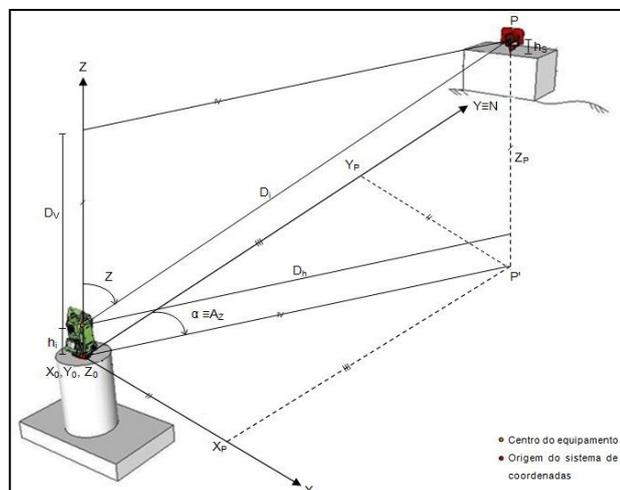


Fonte: (VEIGA et al., 2007).

Já no método de irradiação 3D, três eixos (retas orientadas) ortogonais entre si, formam um sistema de coordenadas tridimensionais para fornecer as coordenadas espaciais deste ponto, definindo assim a sua posição no espaço. Para que sua posição seja única, é necessário determinar suas coordenadas cartesianas X, Y e Z, denominadas respectivamente de abscissa, ordenada e cota (MIRANDA et al., 2009).

Neste sistema, trabalha-se com coordenadas polares, que são: ângulo horizontal (α) medido no plano XY, ângulo zenital (Z) medido no plano vertical que contém o eixo Z e o ponto observado, e a distância inclinada (D_i) medida do equipamento ao ponto considerado, representados na Figura 3, (SIGUEL, 2013).

Figura 3 – Representação do método polar



Fonte: (SIGUEL, 2013).

A determinação das coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos, são obtidas através das equações 1, 2 e 3, (SIGUEL, 2013):

$$X_p = X_0 + D_i \operatorname{sen} Z \cdot \operatorname{sen} A_z \quad (1)$$

$$Y_p = Y_0 + D_i \operatorname{sen} Z \cdot \cos A_z \quad (2)$$

$$Z_p = Z_0 + (h_i - h_s + D_i \cos Z) \quad (3)$$

Onde:

X_p, Y_p, Z_p - Coordenadas do ponto P no referencial local

X_0, Y_0, Z_0 - Coordenadas da origem do sistema de referência local

h_i - Altura do instrumento

h_s - Altura do sinal

D_i - Distância Inclinada

A_z - Azimute (considerando que o eixo Y está orientado para a direção norte)

Z - Ângulo Zenital

4.3 Ajustamento de Observações

Partindo do princípio que nenhuma medida é fixa, que elas possuem erros, outliers, sejam estes aleatórios, sistemáticos, grosseiros e que por essa inconsistência, os sistemas matemáticos que visam modelar estes fenômenos, se tornam redundantes, tornou-se necessário a criação de um ramo na ciência para estudar as formas de ajustar estas medidas, denominado de ajustamento de observações.

Buscando resolver estes sistemas inconsistentes, o ajustamento surge como uma solução única para problemas onde temos muitas equações e sistemas com pouca consistência. Avalia também o grau de qualidade da solução, através da expansão do método dos mínimos quadrados, e busca soluções para problemas onde as observações excedem o mínimo requerido para a solução (DALMOLIN, 2002).

Com base neste fundamento, necessitamos expressar a realidade física do problema, na forma de um sistema de equações lineares que possuam observações redundantes. Ao conjunto destas equações lineares damos o nome de modelo matemático, que pode envolver tanto o modelo funcional, quanto o estocástico. O primeiro é definido como o conjunto de equações que determinam as condições do ajustamento, podendo elas serem conhecidas ou estipulas. Já

o segundo, consiste na especificação das variâncias e covariâncias, e por consequente, dos pesos das observações (GHILANI; WOLF, 2006).

Definido o modelo, o próximo passo é determinar o método a ser utilizado no ajustamento. O mais utilizado e aceito é aquele que minimiza a soma do quadrado dos resíduos, ponderando pelos respectivos pesos das observações, seguindo o princípio dos mínimos quadrados. A este dá-se o nome de Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) que será abordado a seguir.

4.3.1 Método dos Mínimos Quadrados

Num modelo ou sistema de equações lineares em que as observações são redundantes e inconsistentes, as possíveis soluções para seus subsistemas, se apresentariam de formas distintas. Nenhuma solução única seria possível, sem que um critério pudesse ser introduzido. A estas situações, a aplicação do princípio básico do ajustamento pelo MMQ se torna possível, para derivar um único conjunto de estimativas a todas as variáveis do modelo, com certas propriedades, como estimativa não tendenciosa e de variância mínima (CAMARGO, 2000).

Tomando como exemplo o sistema anterior, ao conjunto original de observações, damos o nome de L_b , que é formado por observações redundantes e inconsistentes, que após o ajustamento é substituído por um conjunto de estimativas que satisfaça o modelo, denominado de L_a . A diferença entre esses dois conjuntos forma o que chamamos de V , denotado de vetor das correções ou vetor dos resíduos:

$$V = L_a - L_b \quad (4)$$

Com isso, temos que:

$$L_a = L_b + V \quad (5)$$

A escolha de L_a que satisfaça o modelo depende diretamente da escolha do vetor V . Para tal escolha, seguimos o critério de Gemael (1994), em “Aceitar como melhor estimativa de L_a o valor que torna mínima a soma dos quadrados dos resíduos”. Através deste critério, temos denotado, o princípio do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) que estabelece:

$$\Phi = V^T P V = \text{mínimo} \quad (6)$$

Conhecida como forma quadrática fundamental do MMQ, onde V é o vetor já definido e P a matriz dos pesos das observações, dada por:

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_{L_b}^{-1} \quad (7)$$

Onde, σ_0^2 é um escalar conhecido como fator variância a priori e Σ_{L_b} a matriz variância-covariância (MVC) das observações.

Segundo Camargo 2000, assim que os modelos (estocástico e funcional) são estabelecidos, os métodos de ajustamento trabalham com um conjunto de funções e equações que descrevem o modelo funcional. Estas equações são distinguidas entre as de condições e as de injunções, formando dois grupos de técnicas de ajustamento. Estes são intitulados de ajustamento pelos mínimos quadrados com condições, e ajustamento pelos mínimos quadrados com injunção. Dependendo das variáveis (observações ou parâmetros) envolvidas no modelo, o 1ª grupo do modelo pode ser dividido em método dos correlatos, método combinado e método paramétrico.

No Método Paramétrico, a equação de condição envolve observações e parâmetros, mas as observações são funções explícitas dos parâmetros, isto é:

$$L_a = F(X_a) \quad (8)$$

onde, temos que:

$$L_b + V = F(X_a) \quad (9)$$

Já no segundo grupo, a equação de injunção, em conjunto com a de condição, irá proporcionar os métodos acima citados, porém com injunção. A equação de injunção, que é formada só de parâmetros, é representada pelo modelo:

$$G(X_a) = 0 \quad (10)$$

4.4 Controle de Qualidade

O controle de qualidade é um método robusto, feito após o processo de ajustamento das observações, que tem como objetivo a identificação de possíveis erros, que não foram modelados no sistema, visando adaptá-los (MACHADO e MONICO, 2004).

Os primeiros trabalhos utilizando este conceito no ajustamento de observações geodésicas são referidos a Baarda (1968) *apud* Matsuoka (2014), para detecção de erros nas observações. Ele propõe o β -Method, que faz uso do teste global do ajustamento e do teste do *data snooping*, para detecção de erros no ajustamento e nas observações, partindo do pressuposto que apenas uma observação está contaminada por erros a cada vez. Isto resulta em iterativos ajustamentos e testes estatísticos, até as observações com erros serem identificadas (KLEIN, 2012).

4.4.1 Teste Global do Ajustamento

O Teste Global do Ajustamento é utilizado para analisar se o fator da variância a priori σ_0^2 , arbitrado pelas observações, tem significativa diferença em relação ao verdadeiro fator de variância σ^2 , desconhecido, mas estimado por $\hat{\sigma}^2$. Caso haja discrepância ($\hat{\sigma}^2 > \sigma^2$) aplica-se um teste de hipótese unilateral, baseado na distribuição χ^2 , para discriminar se a discrepância é significativa a um certo nível de confiança (KLEIN, 2012).

Desta forma, temos que o teste estatístico χ^2 testa a hipótese nula H_o :

$$H_o : \hat{\sigma}^2 \leq \sigma_o^2 \quad (11)$$

Contra a hipótese alternativa H_a :

$$H_a : \hat{\sigma}^2 > \sigma_o^2 \quad (12)$$

Para testar se a hipótese nula é rejeitada ou não, a um nível de significância α , compara-se o valor calculado por:

$$T = \left(\frac{\hat{\sigma}^2}{\sigma_o^2} \right) (n - u) = \frac{v^T PV}{\sigma_o^2} \quad (13)$$

com o valor teórico da distribuição $\chi^2_{(n-u, \alpha)}$. Onde:

n: é o número de observações;

u: é o número de parâmetros;

V: é o vetor (n x 1) dos resíduos das observações e

P: é a matriz peso das observações ($P = \sigma_o^2 \Sigma_{L_b}^{-1}$)

A hipótese nula, não é rejeitada a um nível de significância α , caso:

$$T < \chi^2_{(n-u, \alpha)} \quad (14)$$

Caso contrário, significa dizer que há problemas no ajustamento. Desta forma, uma verificação deve ser feita para analisar as possíveis razões que levaram a falha no teste. Algumas destas são citadas em Matsuoka (2014), como:

- ❖ Verificar se o modelo funcional é adequado à realidade física;
- ❖ Se existem erros grosseiros ou sistemáticos no processo do ajustamento;
- ❖ Se existem erros de cálculo no processo de ajustamento.

É importante dizer que o teste em si, apenas detecta o problema, mas não especifica qual é ele. Desta forma, surge a necessidade de utilização de outro teste, como o *data snooping* para identificar as observações com erro grosseiro (outlier). Segundo KLEIN (2012) ele deve ser utilizado sendo o teste global do ajustamento aceito ou não, pois a existência de um resíduo elevado nos conjuntos observações, pode fazer com que o mesmo seja negligenciado no teste global, quando o número de graus de liberdade se mostra elevado.

4.4.2 Teste do Data Snooping

Assumindo que apenas uma observação é suspeita de estar contaminada por um erro (não-aleatório) a cada vez, temos que o teste estatístico deve ser calculado para todas as n observações. Esse procedimento é denominado *data snooping* (BAARDA, 1968, *apud* MATSUOKA, 2004).

Para identificar a i -ésima observação com outlier, baseamos o cálculo na seguinte expressão (TEUNISSEN, 2000, *apud* MATSUOKA, 2004):

$$W_{Ib(i)} = \frac{c_{Ib(i)}^T P V}{\sqrt{c_{Ib(i)}^T P \Sigma V P c_{Ib(i)}}} \quad (15)$$

onde,

P : matriz dos pesos das observações;

Σv : matriz variância-covariância dos resíduos;

$c_{Ib(i)}$: vetor $n -$ dimensional contendo um valor unitário na linha da i -ésima, observação a ser testada e zero nas demais.

Este vetor é dado, da seguinte forma:

$$c_{Ib(i)}^T = [0_1 0_2 \dots \dots 1_i \dots \dots 0_{n-1} 0_n] \quad (16)$$

Já a matriz variância-covariância dos resíduos é dada por (KLEIN, 2011, *apud* LEICK, 2004), abaixo, sendo para este estudo utilizado a variância *a priori*. Justifica-se a escolha da variância *a priori*, pois o uso da *posteriori* camufla possíveis erros não aleatórios na identificação de outliers.

$$\Sigma v = \sigma_0^2 (P^{-1} - (A(A^T P A)^{-1} A^T)) \quad (17)$$

onde,

A : Matriz das derivadas parciais.

Em alguns casos a matriz variância-covariância é diagonal, ou seja, não se considera, ou não existe correlação entre as observações. Assim a equação (15) se reduz a seguinte forma (TEUNISSEN, 2000, *apud* MATSUOKA, 2004):

$$W_{Ib(i)} = \frac{V_i}{\sigma_{vi}} \quad (18)$$

Onde, V_i é o resíduo da i -ésima observação a ser testada e σ_{vi} é o respectivo, desvio padrão deste resíduo.

Segundo Matsuoka (2004), a estatística $W_{Ib(i)}$ tem como distribuição a raiz quadrada da distribuição F , com graus de liberdade igual a 1 e ∞ (infinito). Desta forma, a raiz quadrada

da distribuição F, tem distribuição normal padrão, ou seja, $\sqrt{F_{\alpha_0(1,\infty)}} = N_{\alpha_0/2}(0,1)$. Assim, (TEUNISSEN, 2000, *apud* MATSUOKA, 2004):

$$W_{Ib(i)} \sim N_{\alpha_0/2}(0,1) \quad (19)$$

Desta afirmação, testam-se as hipóteses abaixo, onde na hipótese nula H_0 a i -ésima observação não contém outlier $\nabla_{Ib(i)}$ e na hipótese alternativa o oposto.

$$H_0 : \nabla_{Ib(i)} = 0 \quad \text{contra} \quad \nabla_{Ib(i)} \neq 0 \quad (20)$$

A hipótese básica não é rejeitada a um determinado nível de significância α_0 ($\alpha = n \alpha_0$), onde desigualdade de Bonferroni (CHEN et al., 1987 *apud* KLEIN, 2012) se (TEUNISSEN, 2000, *apud* MATSUOKA, 2004):

$$|W_{Ib(i)}| \leq N_{\alpha_0/2}(0,1) \quad (21)$$

Caso contrário a i -ésima observação é suspeita de possuir um outlier. Por se tratar de um teste que verifica uma observação por vez, pode acontecer de mais de uma observação, ou todas, excederem o valor crítico $N_{\alpha_0/2}(0,1)$, após o cálculo do valor de $W_{Ib(i)}$. Neste caso, a observação suspeita, será aquela que possuir maior valor de $W_{Ib(i)}$, dado pela equação (21) (TEUNISSEN, 2006):

$$w = \max_{i \in \{1, \dots, n\}} |W_{Ib(i)}| \quad (22)$$

Assim, pode-se definir que a i -ésima observação será suspeita de erro grosseiro se (TEUNISSEN, 2000, *apud* MATSUOKA, 2004):

$$|W_{Ib(j)}| > N_{\alpha_0/2}(0,1) \text{ e } |W_{Ib(j)}| \geq |W_{Ib(i)}|, \forall i \quad (23)$$

Após as comparações, retira-se a observação suspeita, e o teste deve ser repetido até que todas as observações suspeitas sejam retiradas (MATSUOKA, 2004).

5 MATERIAL E MÉTODOS

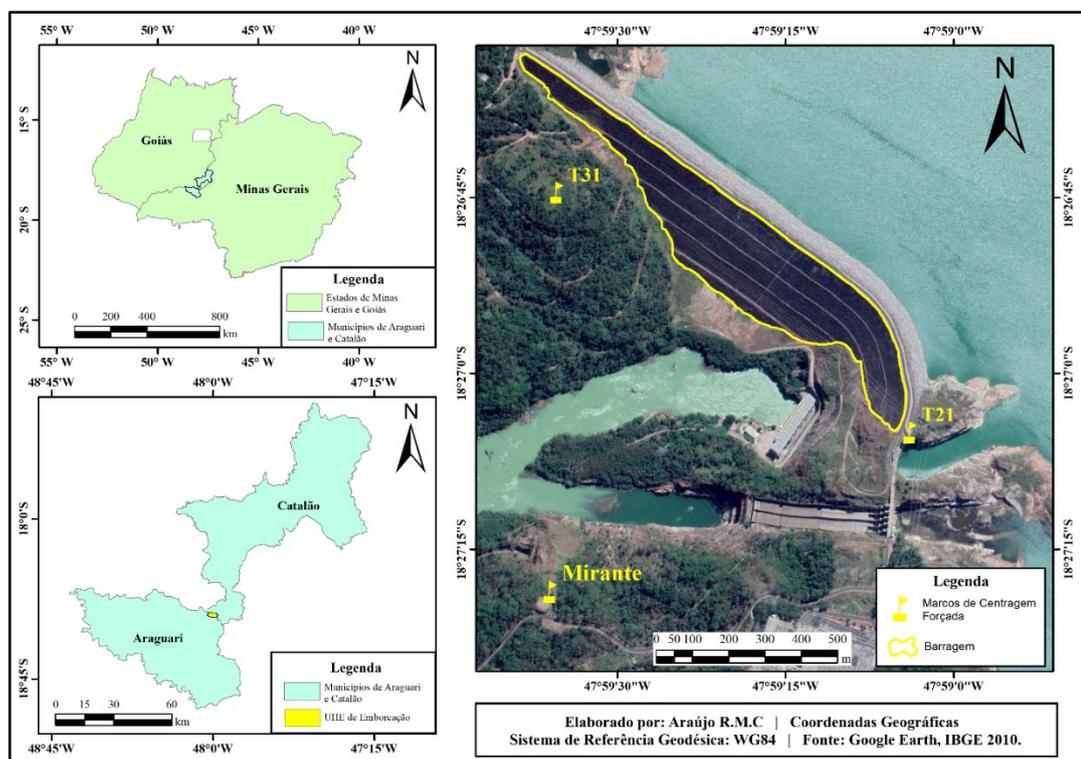
5.1 Área de Estudo

Construída nos anos 70, no Rio Paranaíba, a UHE de Emborcação se tornou a usina de maior potencial energético para o complexo de usinas da CEMIG, chegando aos 1192 MW de energia produzida.

Localizada na divisa dos municípios de Araguari (Minas Gerais) e Catalão (Goiás), Figura 4, iniciou suas operações em 1982, com o propósito de atender a demanda hídrica da região Sudeste, tendo um custo final de 72 bilhões de cruzeiros (moeda da época), contando com o financiamento da ELETROBRAS, BID, BNDES e FINEP, além dos próprios recursos de sua companhia elétrica, (ELETROBRAS, 1989).

Sua obra tem como características mais significativas, a construção da barragem no formato de terra e enrocamento (Anexo A), um vertedouro para tomada d'água, e uma casa de força para as turbinas e geradores. Foram também instalados três pilares de referência no entorno da UHE de Emborcação e marcos superficiais ao longo da barragem, para o monitoramento de seus deslocamentos horizontais.

Figura 4 - Mapa de Localização da UHE de Emborcação



Fonte: O autor

5.1.1 Marcos de apoio da barragem de Emborcação

Marcos de apoio em barragens são locais utilizados para medição de deslocamentos superficiais, que podem ser horizontais ou verticais (recalques), sendo o primeiro calculado por meias triangulações ou colimações geodésicas, e o último por nivelamentos de precisão (SILVEIRA, 2017).

Na área de estudo, foram identificados três marcos de centragem forçada denominados por T21, T31 e MIRANTE, Figuras 5, 6 e 7, respectivamente. Já no barramento, 74 marcos superficiais compõem a estrutura, com 47 situados na crista, em direção à jusante, 10 na primeira berma; 7 na segunda berma; 6 na terceira e 4 na última berma (VIEIRA, 2018). A Figura 8 mostra um exemplo de um destes marcos superficiais.

Figura 5 – T21



Fonte: O autor.

Figura 6 – T31



Fonte: O autor.

Figura 7 – MIRANTE



Fonte: O autor.

Figura 8 – Marco Superficial MS-150



Fonte: O autor.

5.2 Material

Para o presente estudo, foram utilizados os seguintes instrumentos, disponibilizados pelo LTGEO (Laboratório de Topografia e Geodésia) da Universidade Federal de Uberlândia:

- Estação Robótica Leica Nova MS50 (Figura 9);
- Prismas Circulares AVR com offset de 0 mm a 30 mm (Figura 10);
- Bases nivelantes para encaixe dos prismas (Figura 10);
- Adaptadores para encaixe da estação e das bases nivelantes dos prismas, com centragem forçada nos marcos (Figura 11).

Figura 9 – Leica Nova MS50



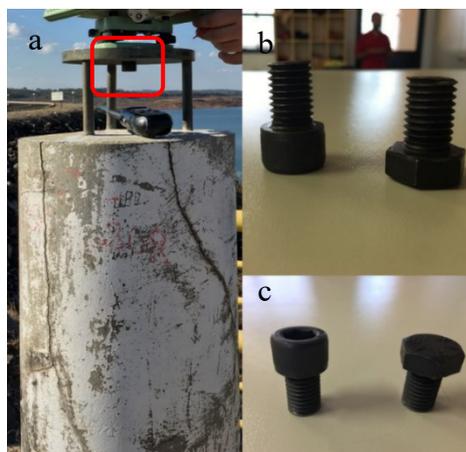
Fonte: O autor.

Figura 10 – Prisma circular e base nivelante



Fonte: O autor.

Figura 11 – Adaptadores para encaixe da estação e base nivelante dos prismas, com centragem forçada nos marcos



Fonte: O autor.

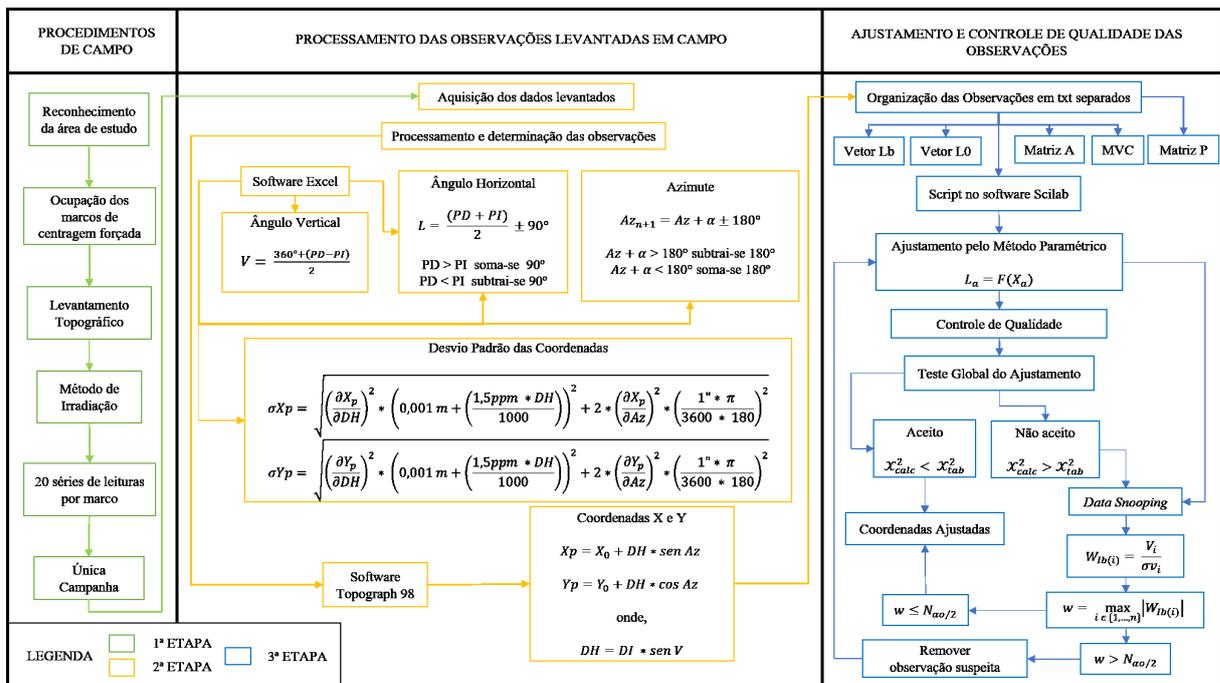
A Estação Robótica Leica MS50, produzida pela empresa Suíça Leica Geosystems, é uma estação de alta tecnologia, que permite funções como, scaneamento 3D, imagem digital, conectividade GNSS e capacidade extensiva e precisa em suas medidas, além de contar com um sistema de eliminação de erros de forma automática. As principais especificações técnicas deste aparelho são:

- ✓ Precisão angular: 1”
- ✓ Precisão linear: com prisma 1 mm + 1,5 ppm, em qualquer superfície 2 mm + 2 ppm.
- ✓ Distância máxima de leitura: com prisma de 1,5 m até 10 km, e em qualquer superfície de 1,5 m até 2000 m.

5.3 Métodos

A metodologia deste estudo foi dividida em duas partes. As Figuras 12 e 13 mostram o Fluxograma que apresenta a divisão do processo, referente à campanha realizada para fins de monitoramento dos marcos de centragem forçada da UHE de Emborcação.

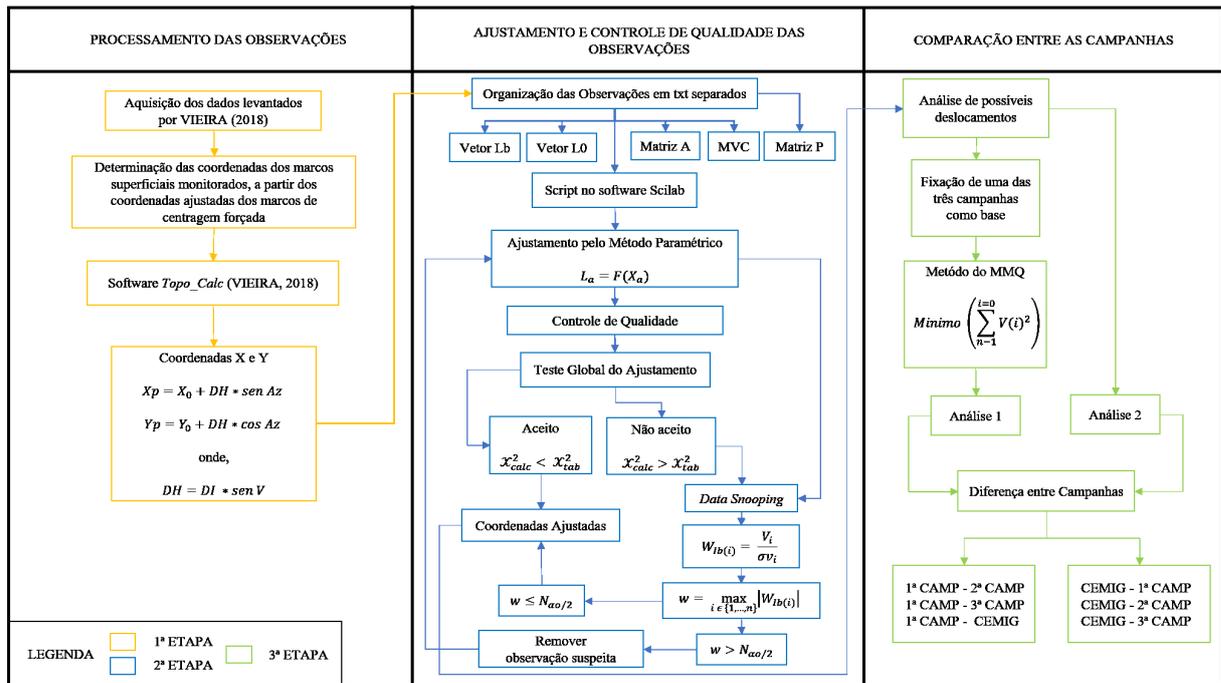
Figura 12– Fluxograma da primeira parte da metodologia



Fonte: O autor.

A 1ª Etapa é composta pelo levantamento das observações, referentes aos marcos de centragem forçada T31, T21 e MIRANTE; 2ª Etapa, pelo processamento dessas observações, para determinação das coordenadas X e Y deles; 3ª Etapa, pelo ajustamento e controle de qualidade destas coordenadas, a fim de ajustá-las para a segunda parte da metodologia.

Figura 13– Fluxograma da segunda parte da metodologia



Fonte: O autor.

A segunda parte da metodologia é composta do monitoramento dos marcos superficiais da barragem de Emborcação, com fins de análise de possíveis deslocamentos, por meio da comparação entre as campanhas. A 1ª Etapa é composta da aquisição e processamento das observações cedidas por VIEIRA (2018), a fim de determinar as coordenadas dos marcos superficiais monitorados na barragem, para ambas as campanhas; 2ª Etapa, pelo ajustamento e controle de qualidade destas coordenadas, tendo em vista a eliminação de possíveis outliers; 3ª Etapa, pela comparação entre as campanhas, com vista em duas análises, uma entre as campanhas realizadas e a outra com base na realizada pela CEMIG a fim de detectar possíveis deslocamentos no barramento.

5.3.1 Levantamento dos dados dos marcos de centragem forçada

Para a primeira parte do estudo, a CEMIG disponibilizou as coordenadas dos marcos de centragem forçada, T21, T31 e MIRANTE, Tabela 3, que estão referenciadas a um plano topográfico local isentas de variações ao longo do tempo.

Tabela 1 – Coordenadas dos marcos de centragem forçada T21, T31 e MIRANTE

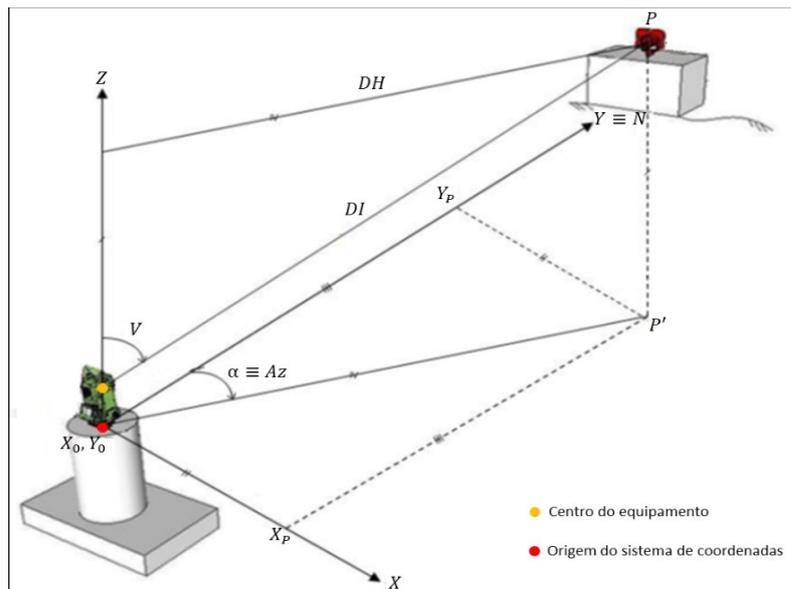
	T21	MIRANTE	T31
X (m)	84784,563	83845,792	83846,489
Y (m)	157262,732	156828,279	157846,842

Fonte: CEMIG, acervo particular.

5.3.1.1 Etapa de Campo

Em razão das referências estarem vinculadas a um plano topográfico local, a determinação das coordenadas cartesianas foi realizada de forma bidimensional, como mostra a Figura 14, baseando-se no método de irradiação tridimensional e pares conjugados PD (Posição Direta) e PI (Posição Inversa), considerando a coordenada Z_p com o valor 0.

Figura 14 – Método de medição



Fonte: VIEIRA (2018), adaptado de SIGUEL (2013, p.36).

A determinação das coordenadas cartesianas bidimensionais dos pontos, são obtidas através das equações 24 e 25, (SIGUEL, 2013).

$$X_p = X_0 + DH \cdot \text{sen } A_z \quad (24)$$

$$Y_p = Y_0 + DH \cdot \text{cos } A_z \quad (25)$$

Onde:

X_p, Y_p - Coordenadas do ponto P no referencial local

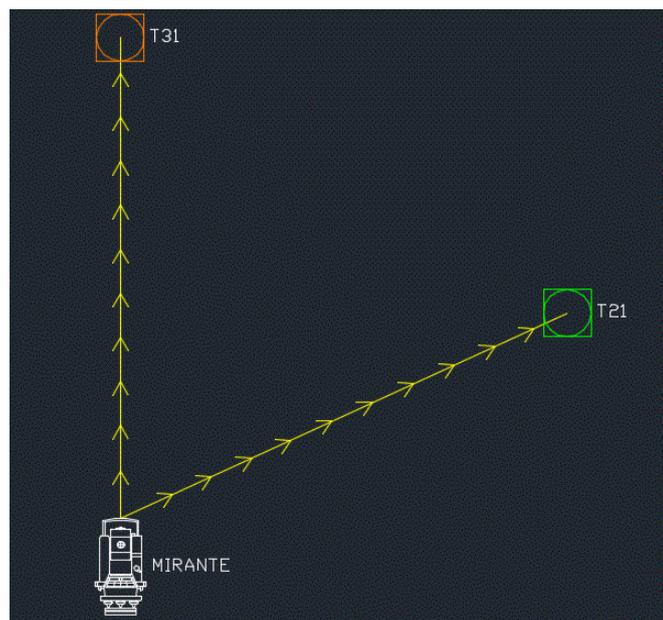
X_0, Y_0 - Coordenadas da origem

DH - Distância Horizontal

A_z - Azimute (considerando que o eixo Y está orientado para a direção norte)

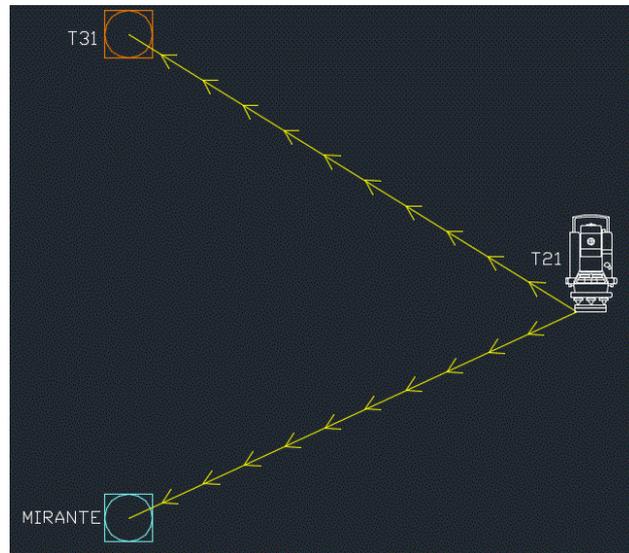
Nas Figuras 15, 16 e 17, é apresentado como foram feitas as tomadas de leituras entre os marcos de centragem forçada para a campanha única realizada em no dia 24/09/2018. Nelas podemos observar que a cada estacionada são realizadas 10 séries de leituras na posição de ré e 10 na posição de vante, tendo assim 20 séries de leituras de ângulos horizontais (Hz), verticais (V) e distância inclinada. Estes são realizados na posição direta e inversa, sendo assim, 40 leituras por marco, totalizando 120 leituras ao final do levantamento.

Figura 15 – Estacionada em Mirante



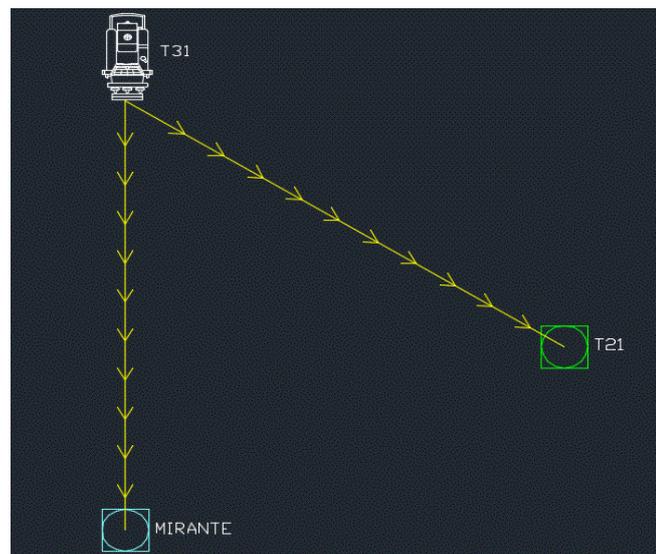
Fonte: O autor.

Figura 16 – Estacionada em T21



Fonte: O autor.

Figura 17 – Estacionada em T31



Fonte: O autor.

5.3.1.2 Aquisição e Processamento dos dados

Após o levantamento, as observações foram descarregadas da estação robótica MS50, no formato txt para etapa de processamento. A Figura 18 mostra um exemplo do trecho das observações para a estacionada no marco T31, onde temos que, PV (Ponto Visado), HZ (Ângulo Horizontal), VT (Ângulo Vertical) e DI (Distância Inclinada). Salienta-se que a primeira linha

indica a leitura na posição direta (PD), e a segunda na posição inversa (PI), e assim sucessivamente.

Figura 18 - Trecho das observações na estação T31

PV :t21	HZ=359.5956	VT= 89.3001	DI= 1105.137
PV :t21	HZ=179.5953	VT=270.3019	DI= 1105.137
PV :t21	HZ=359.5956	VT= 89.3002	DI= 1105.137
PV :t21	HZ=179.5957	VT=270.3020	DI= 1105.137
PV :mir	HZ= 58.0748	VT= 91.1841	DI= 1018.820
PV :mir	HZ=238.0750	VT=268.4140	DI= 1018.820
PV :mir	HZ= 58.0749	VT= 91.1845	DI= 1018.820
PV :mir	HZ=238.0750	VT=268.4139	DI= 1018.819

Fonte: O autor

Após este processo, as observações foram processadas no software EXCEL, onde ângulos horizontais foram calculados pela equação 26, (VEIGA et al., 2007):

$$L = \frac{(LPD + LPI)}{2} \pm 90^\circ \quad (26)$$

onde a leitura na:

$$PD > PI \text{ soma-se } 90^\circ \quad | \quad PD < PI \text{ subtrai-se } 90^\circ$$

Os ângulos verticais pela equação 27, (VEIGA et al., 2007):

$$V = \frac{360^\circ + (PD - PI)}{2} \quad (27)$$

E o azimute pela equação 28, (VEIGA et al., 2007):

$$Az_{n+1} = Az_n + \alpha \pm 180^\circ \quad (28)$$

onde:

$$Az_n + \alpha > 180^\circ \text{ subtrai-se } 180^\circ \quad | \quad Az_n + \alpha < 180^\circ \text{ soma-se } 180^\circ$$

Já os desvios padrões das coordenadas X e Y, foram calculadas pelo método da propagação das incertezas, dado pela equação 29 e 30, (VIEIRA, 2018):

$$\sigma X_p = \sqrt{\left(\frac{\partial X_p}{\partial DH}\right)^2 * \left(0,001 m + \left(\frac{1,5ppm * DH}{1000}\right)^2 + 2 * \left(\frac{\partial X_p}{\partial Az}\right)^2 * \left(\frac{1'' * \pi}{3600 * 180}\right)^2}\right)} \quad (29)$$

$$\sigma Y_p = \sqrt{\left(\frac{\partial Y_p}{\partial DH}\right)^2 * \left(0,001 m + \left(\frac{1,5ppm * DH}{1000}\right)^2 + 2 * \left(\frac{\partial Y_p}{\partial Az}\right)^2 * \left(\frac{1'' * \pi}{3600 * 180}\right)^2}\right)} \quad (30)$$

onde:

DH = Distância Horizontal em Quilômetros (km)

Az = Azimute

$\frac{\partial X_p}{\partial DH}$ e $\frac{\partial Y_p}{\partial DH}$ = Derivada parcial da Coordenada Xp e Yp em relação a DH (m)

$\frac{\partial X_p}{\partial Az}$ e $\frac{\partial Y_p}{\partial Az}$ = Derivada parcial da Coordenada Xp e Yp em relação a Az

E a sua tolerância dada pela equação 31, (VIEIRA, 2018):

$$\sigma_{tolerância} = \sqrt{(\sigma X_p)^2 + (\sigma Y_p)^2} \quad (31)$$

onde:

σX_p = Desvio padrão de Xp

σY_p = Desvio padrão de Yp

Calculados os ângulos horizontais, verticais e azimutes bem como seus desvios, menores que a tolerância, o próximo passo foi determinar as coordenadas bidimensionais X e Y, onde foi utilizado o software Topograph 98, que retornou 60 coordenadas X e 60 coordenadas Y, sendo 20 coordenadas X e Y para cada marco de centragem forçada, que foram usadas na etapa 3ª da metodologia.

5.3.1.3 Ajustamento e Controle de Qualidade dos Marcos de Centragem Forçada

Determinadas as coordenadas e seus desvios padrões, o próximo passo foi fazer o ajustamento e o controle de qualidade para ajustar as coordenadas dos marcos de centragem

forçada. Para isso foi necessário, organizar as observações em cinco arquivos de textos descritos abaixo:

- ❖ Vetor L_b (120x1), contendo as observações, coordenadas X e Y.
- ❖ Matriz A (120x6), contendo a derivada parcial das equações $F(X_a) = L_b + V_a$ em relação as observações que se quer determinar, composta por $X_1^a, Y_1^a, X_2^a, Y_2^a, X_3^a, Y_3^a$.
- ❖ Matriz Variância e Covariância das observações (MVC) (120X120), contendo o desvio padrão das coordenadas, elevado ao quadrado.
- ❖ Matriz Peso (P) (120x120), dado por $P = \sigma_0^2 * \sum L_b^{-1}$, onde foi arbitrado $\sigma_0^2 = 1$, sendo $P = (MVC_{L_b})^{-1}$.

Após a separação foi necessário criar um script, Figura 19, com as operações que envolvem o ajustamento pelo Método Paramétrico.

Figura 19 – Ajustamento pelo Método Paramétrico

```
LB = fscanfMat("LB_MIR_T21_T31.txt"); // Matriz LB vetor das observações 120x1
A = fscanfMat("MATRIZA.txt"); // Matriz A das derivadas parciais 120x6
MVC = fscanfMat("MVC.txt"); // MVC de Lb, das observações, desvio padrão ao quadrado, 120x1
MVC = diag(MVC); // MVC das observações na forma diagonal, 120x120
P = fscanfMat("PESO.txt"); // Matriz Peso, 1/MVC, arbitrado 1 como variancia a priori, 120x1
P = diag(P); // Matriz Peso na forma diagonal, 120x120
L0 = fscanfMat("L0.txt"); // Vetor L0, f(Xa), 120x1
L = L0-LB; // Vetor L, 120x1
X = -inv(A'*P*A)*(A'*P*L); // Vetor X das correções aos parâmetros
// Xa = X0 + X, X0 = Vetor dos parâmetros aproximados, como modelo é linear X0 = 0
Xa = X; // Vetor dos parametros ajustados 6x1
```

Fonte: O autor.

Feito o ajustamento, é necessário analisar a sua qualidade, por meio do Teste Global do Ajustamento dados pela equação 13. O nível de significância escolhido foi de $\alpha = 0,012$, para a estatística Qui-Quadrado (χ^2), equação 14, conforme a desigualdade de Bonferroni : $\alpha = n \alpha_0$, sendo $\alpha_0 = 0,001$ o nível de significância para o teste data snooping.. Um script foi criado, mostrado abaixo.

Figura 20 – Teste Global do Ajustamento

```
//=====Análise da Qualidade do Ajustamento =====Teste Global do Ajustamento=====//
V = (A*X)+L; // Vetor V dos residuos 120x1
VPOST= ((V'*P*V)/114); // Fator de Variância a posteriore 1x1 onde n-u = 120-6 = 114 gl
XQUA=VPOST*114; // Teste Qui Quadrado, 1x1
MVCXa = VPOST*inv(A'*P*A); // MVC de Xa dos parametros ajustados 6x6
DPXa = sqrt(MVCXa); // Desvio padrão dos parametros ajustados 6x6
// XQUA > XQTabelado = Ajustamento não aceito
// XQUA < XQTabelado = Ajustamento aceito
```

Fonte: O autor

Caso o ajustamento não seja aceito, recorremos ao Teste do *Data Snooping*, onde identificamos a observação suspeita e a removemos do conjunto de observações. Primeiramente é necessário fazer a normalização dos resíduos, conforme a equação 18. Posteriormente definimos o nível de significância $\alpha_0 = 0,001$, onde o valor crítico tabelado foi de $c_{\alpha_0/2} = 3,30$ (MATSUOKA, 2004). Definido o valor crítico, identificamos o valor máximo, do cálculo do valor de $W_{Ib(i)}$, equação 22, e removemos do conjunto de entrada do ajustamento, conforme a equação 23. Um script foi criado para essa etapa, Figura 21, abaixo.

Figura 21 – Teste do *Data Snooping*

```
//-----Data Snooping-----//
MVCDEV = 1*((A*inv(A'*P*A)*A')-inv(P)); // MVC do vetor V dos residuos 120x120
MVCDEV = sqrt(MVCDEV); // Desvio padrão dos residuos, precisão deles 120x120
V = V'; // Transposta da matriz V dos residuos para calculo do data snooping 1x120
DATASNOPPING= V/MVCDEV; // Normalização dos residuos 1x120 valores da estatística Wib(i) 1x120
DATASNOPPING = DATASNOPPING'; // Transposta dos valores de Wib(i) 120x1
DATASNOPPING = real(DATASNOPPING); // Valores reais de Wib(i) 120x1
DATASNOPPING = abs(DATASNOPPING); // Valores absolutos, inteiros, de Wib(i) 120x1
maximo = max(DATASNOPPING); // Valor máximo a ser removido, observação suspeita.
```

Fonte: O autor

Foram necessárias 65 iterações para o ajustamento ser aceito, onde um controle da etapa de ajustamento é mostrado no Apêndice A, contendo número de iterações, número de observações, valor dos graus de liberdade, valor máximo pela estatística $W_{Ib(i)}$, a posição da linha da observação suspeita e o valor da variância a posteriori; Qui-Quadrado (χ^2) calculado e tabelado; valor crítico, para a primeira iteração. As coordenadas ajustadas e seus desvios padrões, para os marcos de centragem forçada, são mostrados na Tabela 2, abaixo:

Tabela 2 – Coordenadas ajustadas para os marcos de centragem forçada

	X(m)	Y(m)	$\sigma X(m)$	$\sigma Y(m)$
MIRANTE	83845,82024	156828,44456	0,00140	0,00073
T21	84784,65050	157262,81660	0,00123	0,00147
T31	83846,51996	157847,09058	0,00132	0,00138

Fonte: O autor.

5.3.2 Levantamento dos dados para os Marcos Superficiais da Barragem

Para a segunda parte do estudo, foi feita a aquisição dos dados de VIEIRA (2018), utilizados em seu estudo, para fins de monitoramento da barragem da UHE de Emborcação. Este, realizou três campanhas, mostradas no Quadro 1 a seguir.

Quadro 1 – Campanhas de monitoramento na UHE de Emborcação

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

Fonte: (VIEIRA, 2018)

No seu estudo foi feito o monitoramento de 17 marcos superficiais, Figura 22, localizados na crista e berma do barramento, onde foram escolhidos apenas aqueles pontos que são visíveis por pelo menos dois marcos de centragem forçada, para haver redundância nas observações.

Figura 22 – Distribuição dos pontos em bom estado da UHE Emborcação



Fonte: (VIEIRA, 2018)

Sua metodologia, nos levantamentos das campanhas, foi a irradiação 2D, Figura 23, onde foi utilizada a estação robótica Leica MS50, para a tomada das leituras.

Figura 23 – Levantamento pelo método de irradiação nos alvos a montante



Fonte: (VIEIRA, 2018)

Para a comparação das campanhas, o mesmo adotou as coordenadas dos pontos monitorados, disponibilizados pela CEMIG, datada por 09/01/2018, anterior às épocas de suas campanhas, mostradas na tabela 3, abaixo.

Tabela 3 – Coordenadas dos pontos a serem monitorados

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	
	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: (VEIRA, 2018)

5.3.2.1 Processamento dos dados

Para o processamento dos dados de Vieira (2018), foi utilizado um aplicativo em planilha eletrônica chamado *Topo_Calc*, desenvolvido por ele para o cálculo das coordenadas X e Y dos 17 marcos superficiais monitorados nas três campanhas de estudo.

Esta planilha utiliza das equações 24 e 25, onde para a determinação das componentes X e Y, onde foram utilizadas as coordenadas ajustadas dos marcos de centragem forçada Mirante, T31 e T21.

Um total de 86 observações foram determinadas para a 1ª Campanha, 90 para a 2ª Campanha e 90 para a 3ª Campanha, onde a sua utilização foi feita na etapa de Ajustamento e Controle de Qualidade das observações da segunda parte da metodologia, juntamente dos desvios calculados pelas equações 29 e 30 para as três campanhas.

5.3.2.2 Ajustamento e Controle de Qualidade dos Marcos Superficiais da Barragem

Calculado as coordenadas bidimensionais e seus desvios padrões, as observações foram organizadas em cinco arquivos de textos para a etapa de ajustamento das campanhas. Para a primeira campanha temos:

- ❖ Vetor L_b (86x1), contendo as observações, coordenadas X e Y.
- ❖ Matriz A (86x34), contendo a derivada parcial das equações $F(X_a) = L_b + V_a$ em relação as observações que se quer determinar, composta por $X_1^a, Y_1^a, X_2^a, Y_2^a, X_3^a, Y_3^a, X_4^a, Y_4^a, X_5^a, Y_5^a, X_6^a, Y_6^a, X_7^a, Y_7^a, X_8^a, Y_8^a, X_9^a, Y_9^a, X_{10}^a, Y_{10}^a, X_{11}^a, Y_{11}^a, X_{12}^a, Y_{12}^a, X_{13}^a, Y_{13}^a, X_{14}^a, Y_{14}^a, X_{15}^a, Y_{15}^a, X_{16}^a, Y_{16}^a, X_{17}^a, Y_{17}^a$
- ❖ Matriz Variância e Covariância das observações (MVC) (86x86), contendo o desvio padrão das coordenadas elevadas ao quadrado.
- ❖ Matriz Peso (P) (86x86), dado por $P = \sigma_0^2 * \sum L_b^{-1}$, onde foi arbitrado $\sigma_0^2 = 1$, sendo $P = (MVC_{L_b})^{-1}$.

Já para a segunda e terceira campanha temos a seguinte configuração:

- ❖ Vetor L_b (90x1), contendo as observações, coordenadas X e Y.

- ❖ Matriz A (90x34), contendo a derivada parcial das equações $F(X_a) = L_b + V_a$ em relação as observações que se quer determinar, composta por $X_1^a, Y_1^a, X_2^a, Y_2^a, X_3^a, Y_3^a, X_4^a, Y_4^a, X_5^a, Y_5^a, X_6^a, Y_6^a, X_7^a, Y_7^a, X_8^a, Y_8^a, X_9^a, Y_9^a, X_{10}^a, Y_{10}^a, X_{11}^a, Y_{11}^a, X_{12}^a, Y_{12}^a, X_{13}^a, Y_{13}^a, X_{14}^a, Y_{14}^a, X_{15}^a, Y_{15}^a, X_{16}^a, Y_{16}^a, X_{17}^a, Y_{17}^a$
- ❖ Matriz Variância e Covariância das observações (MVC) (90x90), contendo o desvio padrão das coordenadas elevadas ao quadrado.
- ❖ Matriz Peso (P) (90x90), dado por $P = \sigma_0^2 * \sum L_b^{-1}$, onde foi arbitrado $\sigma_0^2 = 1$, sendo $P = (MVC_{L_b})^{-1}$.

O próximo passo foi fazer o ajustamento e controle de qualidade das observações para as campanhas. Foi necessário criar scripts para esta etapa, onde foi utilizado a mesma metodologia da seção “Ajustamento e Controle de Qualidade dos Marcos de Centragem Forçada”, para o Ajustamento, o Teste Global do Ajustamento e o Teste *Data Snooping*.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada campanha foi gerado uma tabela contendo o controle do ajustamento, onde suas informações retratam o número de iterações, número de observações, valor dos graus de liberdade, valor máximo pela estatística $W_{Ib(i)}$, a posição da linha da observação suspeita e o valor da variância a posteriori; Qui-Quadrado (χ^2) calculado e tabelado; valor crítico, para a primeira iteração. Os Apêndices B, C e D mostram este controle para cada uma delas, respectivamente.

Para o ajuste das coordenadas e seus respectivos desvios, foram necessárias 46 iterações para a primeira campanha, 45 para a segunda e 47 para a terceira. O nível de significância escolhido foi de $\alpha = 0,086$, $\alpha = 0,090$ e $\alpha = 0,090$ respectivamente, para a estatística Qui-Quadrado (χ^2), equação 14, conforme a desigualdade de Bonferroni : $\alpha = n \alpha_0$, sendo $\alpha_0 = 0,001$ o nível de significância para o teste *data snooping*. O valor crítico tabelado para todas as campanhas foi de $c_{\alpha_0/2} = 3,30$, (MATSUOKA, 2004).

Após ser realizada a etapa do ajustamento e controle de qualidade as coordenadas foram ajustadas para as campanhas, onde elas e seus desvios padrão, da primeira segunda e terceira campanha são mostradas, nas Tabelas 4, 5 e 6 a seguir. Os pontos e a componente que

apresentaram maior erro (maior resíduo) para a etapa de ajustamento e controle de qualidade em cada campanha, foram destacadas em negrito.

Tabela 4 – Coordenadas Ajustadas para a primeira campanha

PONTO	X(m)	Y(m)	σX (m)	σY (m)
MS30	83911,789	158147,586	0,0067	0,0068
MS40	83994,272	158090,566	0,0011	0,0097
MS60	84158,533	157976,577	0,0047	0,0019
MS70	84240,597	157919,128	0,0026	0,0086
MS80	84322,469	157862,009	0,0029	0,0057
MS90	84404,974	157804,716	0,0038	0,0078
MS100	84486,845	157747,932	0,0027	0,0074
MS110	84593,798	157673,987	0,0022	0,0051
MS120	84626,670	157651,340	0,0062	0,0050
MS130	84733,320	157525,438	0,0009	0,0056
MS140	84757,302	157454,341	0,0006	0,0043
MS150	84772,455	157387,922	0,0004	0,0040
MS101	84463,052	157711,520	0,0064	0,0014
MS111	84544,079	157655,561	0,0067	0,0018
MS121	84602,272	157615,496	0,0070	0,0021
MS131	84699,640	157494,120	0,0069	0,0031
MS141	84718,591	157425,140	0,0071	0,0036

Fonte: O autor.

Tabela 5 – Coordenadas Ajustadas para a segunda campanha

PONTO	X(m)	Y(m)	DX(m)	DY(m)
MS30	83911,795	158147,657	0,0005	0,0101
MS40	83994,313	158090,684	0,0011	0,0041
MS60	84158,550	157976,460	0,0047	0,0091
MS70	84240,614	157919,046	0,0049	0,0059
MS80	84322,493	157862,062	0,0029	0,0083
MS90	84404,969	157804,684	0,0029	0,0079
MS100	84486,846	157747,912	0,0028	0,0074
MS110	84593,809	157674,019	0,0023	0,0068
MS120	84626,697	157651,406	0,0020	0,0018
MS130	84733,306	157525,436	0,0052	0,0056
MS140	84757,282	157454,374	0,0053	0,0033
MS150	84772,459	157387,921	0,0004	0,0030
MS101	84463,061	157711,434	0,0064	0,0072
MS111	84544,069	157655,470	0,0068	0,0068
MS121	84602,228	157615,424	0,0062	0,0064
MS131	84699,689	157494,095	0,0051	0,0031
MS141	84718,608	157425,106	0,0052	0,0036

Fonte: O autor.

Tabela 6 – Coordenadas Ajustadas para a terceira campanha

PONTO	X(m)	Y(m)	DX(m)	DY(m)
MS30	83911,794	158147,579	0,0014	0,0092
MS40	83994,289	158090,692	0,0033	0,0055
MS60	84158,479	157976,455	0,0033	0,0121
MS70	84240,601	157919,044	0,0066	0,0079
MS80	84322,463	157862,070	0,0051	0,0111
MS90	84404,968	157804,690	0,0052	0,0105
MS100	84486,857	157747,919	0,0039	0,0099
MS110	84593,810	157673,983	0,0030	0,0069
MS120	84626,692	157651,385	0,0027	0,0089
MS130	84733,312	157525,425	0,0070	0,0075
MS140	84757,297	157454,338	0,0071	0,0058
MS150	84772,439	157387,928	0,0103	0,0040
MS101	84463,012	157711,518	0,0068	0,0019
MS111	84544,031	157655,473	0,0076	0,0091
MS121	84602,251	157615,479	0,0062	0,0029
MS131	84699,698	157494,155	0,0068	0,0041
MS141	84718,614	157425,176	0,0069	0,0048

Fonte: O autor.

Destaca-se que a componente X apresentou os maiores erros na etapa de ajustamento e controle de qualidade das observações para a primeira, segunda e terceira campanha, onde os marcos superficiais, MS110, MS150, e MS140 tiveram os maiores valores residuais, de ordem 0,0086, 0,0093 e 0,0085 metros, respectivamente, para a primeira, segunda e terceira campanha.

Em seguida buscando detectar possíveis deslocamentos horizontais na barragem da UHE de Emborcação, foram feitas duas análises para comparação das coordenadas entre as campanhas de estudo. Para isso foi fixada uma campanha como base, através do MMQ, equação 3, onde foi assumida aquela que apresenta o valor mínimo para o somatório dos resíduos elevado ao quadrado, Tabela 7, sendo esta, a primeira campanha.

$$\text{Minimo} \left(\sum_{n=1}^{i=0} V(i)^2 \right) \quad (32)$$

Tabela 7 – Somatório dos resíduos das observações nas campanhas

CAMPANHA	SOMÁTÓRIO
PRIMEIRA	0,0001888
SEGUNDA	0,0004898
TERCEIRA	0,0008144

Fonte: O autor.

6.1 Análise 1

Na análise 1, foi fixada a Época 1 como base, para o cálculo da diferença entre as coordenadas dos 17 pontos monitorados, em relação as Épocas 1, 2 e a disponibilizada pela CEMIG. A Tabela 8, mostra essa variação.

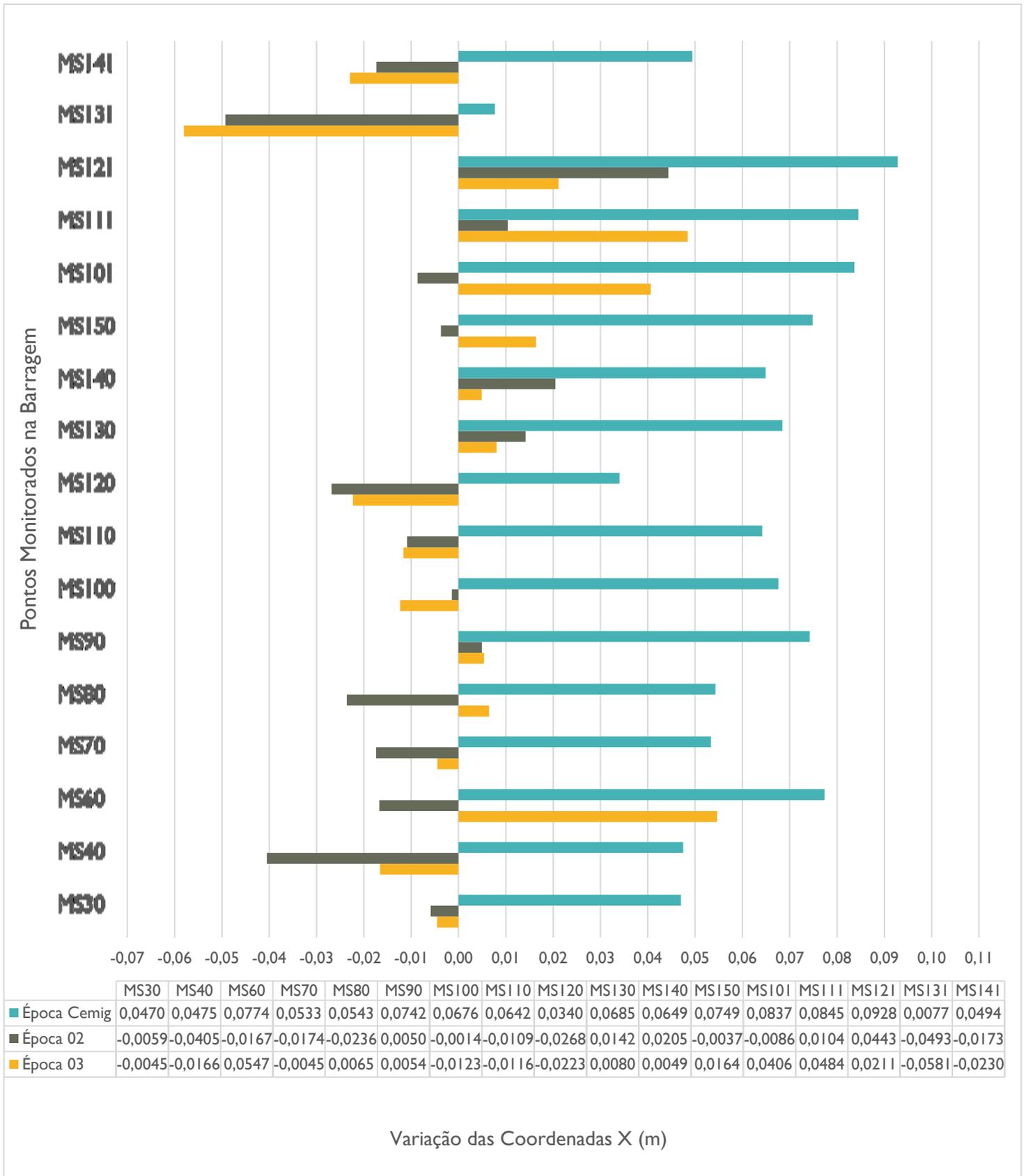
Tabela 8 – Variação das coordenadas para as componentes X e Y das Épocas 2, 3 e CEMIG em relação à Época 1.

PONTO	ÉPOCA 2		ÉPOCA 3		ÉPOCA CEMIG	
	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
MS030	-0,0059	-0,0717	-0,0045	0,0069	0,0470	0,0943
MS040	-0,0405	-0,1186	-0,0166	-0,1265	0,0475	0,1806
MS060	-0,0167	0,1165	0,0547	0,1221	0,0774	0,2912
MS070	-0,0174	0,0825	-0,0045	0,0846	0,0533	0,1855
MS080	-0,0236	-0,0532	0,0065	-0,0608	0,0543	0,1400
MS090	0,0050	0,0323	0,0054	0,0262	0,0742	0,2109
MS100	-0,0014	0,0201	-0,0123	0,0132	0,0676	0,2048
MS110	-0,0109	-0,0318	-0,0116	0,0047	0,0642	0,1397
MS120	-0,0268	-0,0659	-0,0223	-0,0445	0,0340	0,1313
MS130	0,0142	0,0016	0,0080	0,0128	0,0685	0,1883
MS140	0,0205	-0,0333	0,0049	0,0025	0,0649	0,1400
MS150	-0,0037	0,0013	0,0164	-0,0057	0,0749	0,1422
MS101	-0,0086	0,0863	0,0406	0,0026	0,0837	0,3006
MS111	0,0104	0,0914	0,0484	0,0884	0,0845	0,3063
MS121	0,0443	0,0720	0,0211	0,0170	0,0928	0,2987
MS131	-0,0493	0,0251	-0,0581	-0,0349	0,0077	0,2597
MS141	-0,0173	0,0333	-0,0230	-0,0366	0,0494	0,2574

Fonte: O autor.

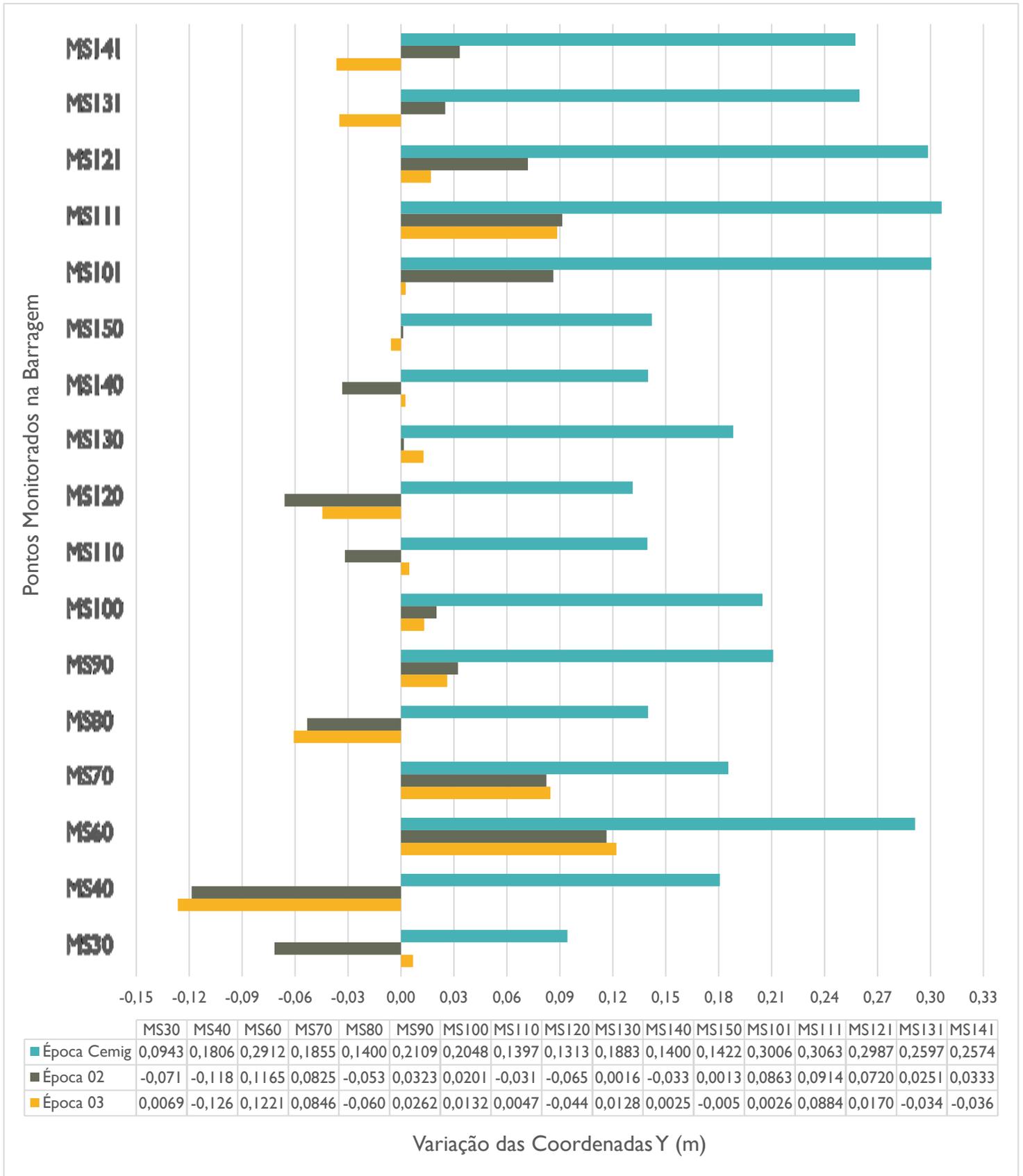
Para facilitar a visualização dos maiores e menores valores da variação das coordenadas, foram gerados dois gráficos, 1 e 2, mostrados abaixo, para as componentes X e Y, respectivamente.

Gráfico 1 – Variação das coordenadas para a componente X das Épocas 2, 3 e CEMIG em relação à Época 1 para os pontos monitorados



Fonte: O autor.

Gráfico 2 – Variação das coordenadas para a componente Y das Épocas 2, 3 e CEMIG em relação à Época 1 para os pontos monitorados



Fonte: O autor.

As variações máximas e mínimas nas coordenadas para a componente X, se deram na ordem de 0,0928 m para o ponto MS121 para Época CEMIG, e -0,0014 m para o ponto MS100 para a Época 02 respectivamente. Já as variações para a componente Y, tiveram valor máximo de 0,3063 m para o ponto MS111 para Época CEMIG e mínima de 0,0013 m para o ponto MS150 na Época 02.

Os valores de variação para as componentes X e Y de 0,0928 m e 0,3063 m, mostraram-se elevados, ao fazer a comparação com a variação máxima aceitável para deslocamentos horizontais para esse tipo de projeto, elaborado pela COPEL (1998) citado por Siguel (2013), que é da ordem de 15 milímetros. Temos que apenas 25 observações das 102 analisadas, obtiveram valores inferiores a variação máxima aceitável, mostrados na Tabela 9, em negrito, a seguir.

Tabela 9 – Valores aceitos para variação máxima tolerável em deslocamentos horizontais

PONTO	ÉPOCA 2		ÉPOCA 3		ÉPOCA CEMIG	
	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
MS030	-0,0059	-0,0717	-0,0045	0,0069	0,0470	0,0943
MS040	-0,0405	-0,1186	-0,0166	-0,1265	0,0475	0,1806
MS060	-0,0167	0,1165	0,0547	0,1221	0,0774	0,2912
MS070	-0,0174	0,0825	-0,0045	0,0846	0,0533	0,1855
MS080	-0,0236	-0,0532	0,0065	-0,0608	0,0543	0,1400
MS090	0,0050	0,0323	0,0054	0,0262	0,0742	0,2109
MS100	-0,0014	0,0201	-0,0123	0,0132	0,0676	0,2048
MS110	-0,0109	-0,0318	-0,0116	0,0047	0,0642	0,1397
MS120	-0,0268	-0,0659	-0,0223	-0,0445	0,0340	0,1313
MS130	0,0142	0,0016	0,0080	0,0128	0,0685	0,1883
MS140	0,0205	-0,0333	0,0049	0,0025	0,0649	0,1400
MS150	-0,0037	0,0013	0,0164	-0,0057	0,0749	0,1422
MS101	-0,0086	0,0863	0,0406	0,0026	0,0837	0,3006
MS111	0,0104	0,0914	0,0484	0,0884	0,0845	0,3063
MS121	0,0443	0,0720	0,0211	0,0170	0,0928	0,2987
MS131	-0,0493	0,0251	-0,0581	-0,0349	0,0077	0,2597
MS141	-0,0173	0,0333	-0,0230	-0,0366	0,0494	0,2574

Fonte: O autor.

6.2 Análise 2

Para a análise 2, foi fixado a Época disponibilizada pela CEMIG para o cálculo da diferença entre as coordenadas bidimensionais dos pontos monitorados, em relação as Épocas 1, 2 e 3 mostrado na Tabela 10, para a variação entre elas.

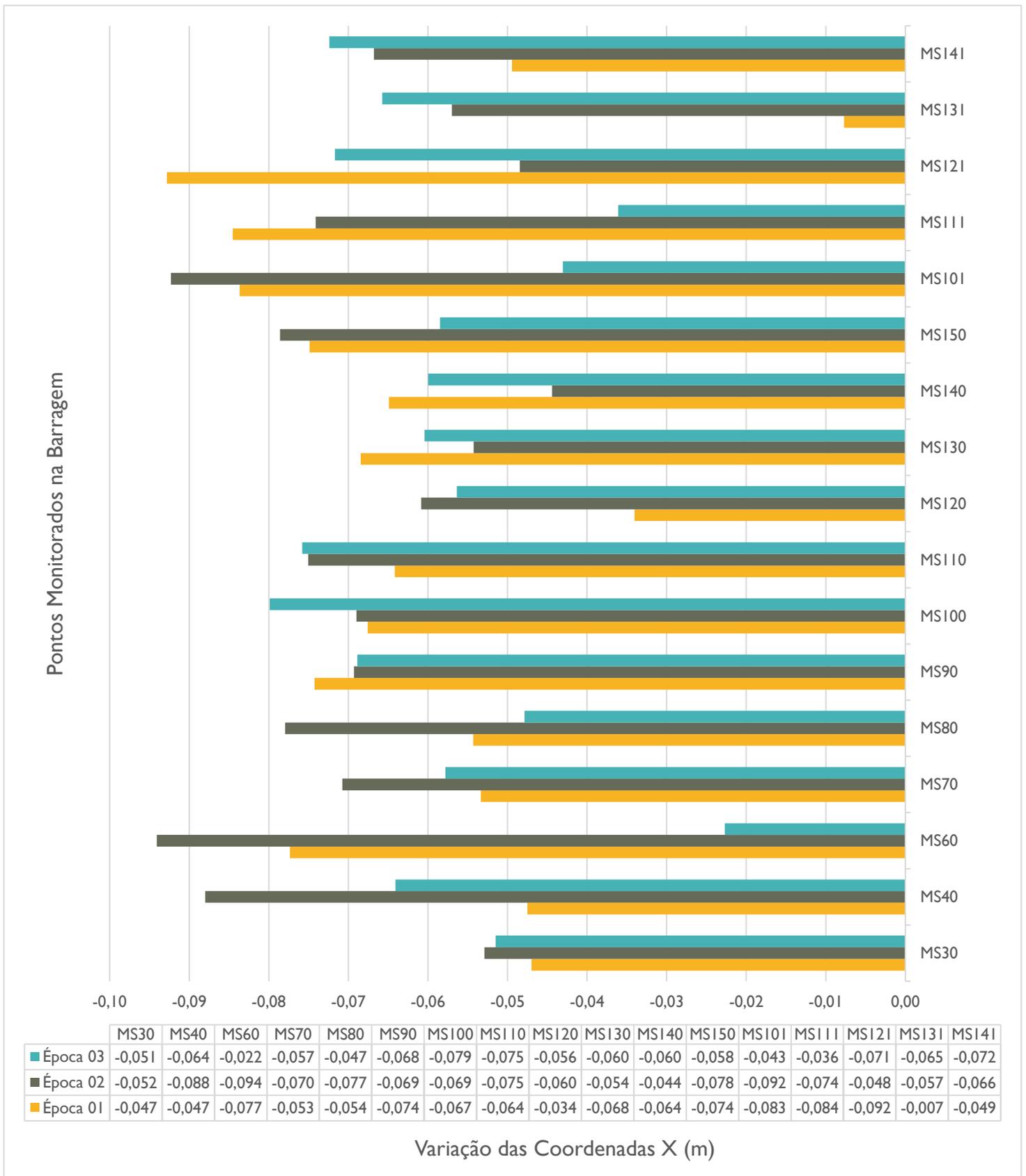
Tabela 10 – Variação das coordenadas para as componentes X e Y das Épocas 1, 2 e 3 em relação à Época CEMIG

PONTO	ÉPOCA 1		ÉPOCA 2		ÉPOCA 3	
	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
MS030	-0,0470	-0,0943	-0,0529	-0,1660	-0,0515	-0,0875
MS040	-0,0475	-0,1806	-0,0880	-0,2993	-0,0641	-0,3072
MS060	-0,0774	-0,2912	-0,0941	-0,1747	-0,0227	-0,1692
MS070	-0,0533	-0,1855	-0,0708	-0,1030	-0,0578	-0,1008
MS080	-0,0543	-0,1400	-0,0779	-0,1931	-0,0479	-0,2008
MS090	-0,0742	-0,2109	-0,0693	-0,1786	-0,0689	-0,1847
MS100	-0,0676	-0,2048	-0,0690	-0,1846	-0,0799	-0,1916
MS110	-0,0642	-0,1397	-0,0750	-0,1715	-0,0758	-0,1350
MS120	-0,0340	-0,1313	-0,0608	-0,1972	-0,0564	-0,1759
MS130	-0,0685	-0,1883	-0,0542	-0,1867	-0,0604	-0,1754
MS140	-0,0649	-0,1400	-0,0444	-0,1733	-0,0600	-0,1375
MS150	-0,0749	-0,1422	-0,0786	-0,1409	-0,0585	-0,1479
MS101	-0,0837	-0,3006	-0,0923	-0,2143	-0,0431	-0,2979
MS111	-0,0845	-0,3063	-0,0741	-0,2150	-0,0361	-0,2179
MS121	-0,0928	-0,2987	-0,0485	-0,2267	-0,0717	-0,2817
MS131	-0,0077	-0,2597	-0,0570	-0,2346	-0,0658	-0,2947
MS141	-0,0494	-0,2574	-0,0668	-0,2241	-0,0724	-0,2941

Fonte: O autor

Para uma melhor visualização das variações máximas e mínimas das coordenadas X e Y foram gerados dois gráficos, 3 e 4, respectivamente, mostrados abaixo.

Gráfico 3 – Variação das coordenadas para a componente X das Épocas 1, 2 e 3 em relação à Época CEMIG para os pontos monitorados



Fonte: O autor.

Gráfico 4 – Variação das coordenadas para a componente 4 das Épocas 1, 2 e 3 em relação à Época CEMIG para os pontos monitorados



Fonte: O autor.

As variações máximas e mínimas para a componente X, feitas para a análise 2, foram de -0,0941 m para o ponto MS60 para Época 02, e -0,0077 m para o ponto MS131 para a Época 01 respectivamente. Já as variações para a componente Y, tiveram valor máximo de -0,3072 m para o ponto MS40 para Época 03 e mínima de -0,0875 m para o ponto MS30 na Época 03.

A alta variação de -0,0941 m para a componente X e -0,3072 m para a componente Y e a baixa quantidade de valores aceitos de 1 em 102 observações analisadas, tabela 11 em negrito, para o limite tolerável de 15 milímetros para projetos dessa ordem, podem indicar possíveis problemas nos processos de levantamento e processamento das observações, questões essas levantadas no tópico a seguir.

Tabela 11 – Valores aceitos para variação máxima tolerável

PONTO	ÉPOCA 1		ÉPOCA 2		ÉPOCA 3	
	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
MS030	-0,0470	-0,0943	-0,0529	-0,1660	-0,0515	-0,0875
MS040	-0,0475	-0,1806	-0,0880	-0,2993	-0,0641	-0,3072
MS060	-0,0774	-0,2912	-0,0941	-0,1747	-0,0227	-0,1692
MS070	-0,0533	-0,1855	-0,0708	-0,1030	-0,0578	-0,1008
MS080	-0,0543	-0,1400	-0,0779	-0,1931	-0,0479	-0,2008
MS090	-0,0742	-0,2109	-0,0693	-0,1786	-0,0689	-0,1847
MS100	-0,0676	-0,2048	-0,0690	-0,1846	-0,0799	-0,1916
MS110	-0,0642	-0,1397	-0,0750	-0,1715	-0,0758	-0,1350
MS120	-0,0340	-0,1313	-0,0608	-0,1972	-0,0564	-0,1759
MS130	-0,0685	-0,1883	-0,0542	-0,1867	-0,0604	-0,1754
MS140	-0,0649	-0,1400	-0,0444	-0,1733	-0,0600	-0,1375
MS150	-0,0749	-0,1422	-0,0786	-0,1409	-0,0585	-0,1479
MS101	-0,0837	-0,3006	-0,0923	-0,2143	-0,0431	-0,2979
MS111	-0,0845	-0,3063	-0,0741	-0,2150	-0,0361	-0,2179
MS121	-0,0928	-0,2987	-0,0485	-0,2267	-0,0717	-0,2817
MS131	-0,0077	-0,2597	-0,0570	-0,2346	-0,0658	-0,2947
MS141	-0,0494	-0,2574	-0,0668	-0,2241	-0,0724	-0,2941

Fonte: O autor

6.3 Discussões

Os resultados obtidos na análise 1 e 2 mostram-se uns quanto elevados para o método de irradiação na análise dos pontos monitorados na barragem, quando comparados com a máxima tolerável de 15 mm para deslocamentos horizontais, descrita no documento elaborado pela COPEL (1998) citado por Siguel (2013), para a barragem de concreto da usina hidrelétrica de Salto de Caxias.

As altas variações demonstram possíveis problemas na etapa de levantamento e processamento das campanhas. A explicação para estes, pode estar relacionada ao modelo funcional utilizado na etapa de ajustamento e controle de qualidade nas campanhas, não ter se adequado a realidade física do problema, onde mesmo com a remoção de possíveis erros sistemáticos da etapa de levantamento pelo teste *data snooping*, o ajuste final das coordenadas pode ter gerado coordenadas em tese inconsistentes para a verdadeira realidade física do estudo.

Com isso se torna difícil afirmar possíveis deslocamentos horizontais no corpo da barragem, mesmo que na análise 1 e 2 um número considerável de valores para variação de coordenadas, estejam abaixo do limite tolerável de 15 milímetros. Entretanto, salienta-se que o uso deste processo de maneira mais rigorosa, nas etapas deste estudo, conforme alguns estudos sugerem, pode produzir resultados promissores, próximos do deslocamento real, como no estudo de Siguel (2013) para o monitoramento da UHE MAUÁ, onde foi utilizada uma estação robotizada para a o levantamento dos pontos previamente monitorados da barragem, obtendo resultados de variação de coordenada planialtimétrica, abaixo do valor admissível adotado, para um levantamento utilizando o método de irradiação tridimensional.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado tinha por objetivo primário o monitoramento dos marcos de centragem forçadas da UHE de Emborcação, através de três campanhas, para fins de deslocamento nos mesmos, mas infelizmente devido a parceria não ter tido continuidade, foi possível apenas a realização de uma campanha neles.

Assim, surgiu o objetivo secundário de realizar o monitoramento dos marcos superficiais da barragem, por meio da aquisição dos dados de Vieira (2018), que realizou o monitoramento dos marcos superficiais dela, através de métodos topográficos, realizando campanhas distintas para a leitura das observações.

Para tal objetivo, foram processadas as observações da campanha de monitoramento dos três marcos de centragem forçada e fixadas às coordenadas e seus desvios padrão, por meio do ajustamento e controle de qualidade das observações. Através delas, foram calculadas as novas coordenadas para os dezessete marcos superficiais do barramento para as três campanhas e aplicado o ajustamento e controle de qualidade nelas. Como produto, foram obtidas as coordenadas ajustadas para as três campanhas de monitoramento dos marcos superficiais, onde

estas foram comparadas, fixando a primeira campanha como base, análise 1, e em uma segunda análise, fixando a campanha da Cemig.

Os resultados obtidos em ambas as análises, foram em suma, maiores que o tolerável de 15 mm para estes projetos, o que demonstrou possíveis problemas nas etapas de levantamento e processamento dos dados. Estes podem estar relacionados ao modelo funcional utilizado não ter se adequado a realidade física do estudo, podendo ter gerado coordenadas ajustadas inconsistentes para as campanhas. Com isso os deslocamentos calculados pela comparação entre as campanhas, em tese, não podem ser validados como os deslocamentos reais no barramento da UHE de Emborcação.

Entretanto, a metodologia aqui abordada demonstra um grande potencial para aplicação em outros estudos de caso, conveniente ao método de levantamento de irradiações ser mais rápido que a aplicação das técnicas de rastreamento GNSS, que em conjunto com o ajustamento e controle de qualidade, pode produzir resultados com o mesmo nível de precisão e qualidade das técnicas geodésicas de monitoramento.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13.133: Execução de levantamento topográfico**. Rio de Janeiro, 1994. 35 p.
- AUGUSTO FILHO, O. Escorregamentos em encostas naturais e ocupadas: análise e controle. **Curso de geologia aplicada ao meio ambiente**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 1995.
- BAARDA, W. A testing procedure for use in geodetic networks. **Publications on Geodesy, New Series**, v. 2, n. 5, Delft: Netherlands Geodetic Commission, 1968.
- CAMARGO, P. O. **Ajustamento de observações**. UNESP: Presidente Prudente, 2000.
- CHEN, Y.Q.; KAVOURAS, M.; CHRZANOWSKI, A. A strategy for detection of outlying observations in measurements of high precision. **The Canadian Surveyor**, Ottawa, v.41, n.4, p.529-540, winter 1987.
- COPEL. COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. Usina Hidrelétrica de Salto Caxias. **Instrumentos de auscultação das obras civis, valores de controle para leituras dos instrumentos**. Novembro de 1998.
- DALMOLIN, Q. **Ajustamento por Mínimos Quadrados**. Curitiba: Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas/UFPR, 2002. 175p.
- DIVINO, P. L. **Comportamento de enrocamentos em barragens** - Estudo de caso da barragem de Emborcação. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 226p., 2010.
- ELETROBRÁS. **Concreto Massa no Brasil: Memória Técnica**. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS, 1989. 3v.
- ESPARTEL, L. **Curso de Topografia**. 9 ed. Rio de Janeiro, Globo, 1987.
- GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994. 319p.
- GOMES, R.C. **Barragens de Terra e Enrocamento**. 2015. Notas de Aula. Departamento de Engenharia Civil/UFOP.
- GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Adjustment Computations: Spatial Data Analysis**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2006. 611p.
- GRANEMANN, D. C. **Estabelecimento de uma Rede Geodésica para o Monitoramento de Estruturas: Estudo de Caso na Usina Hidrelétrica Salto Caxias**. 2005. 114 p. 2005. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

KLEIN, I. Controle de Qualidade no Ajustamento de Observações Geodésicas.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, UFRGS. 2012.

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: 30/11/2018.

MACHADO, W. C.; MONICO, J. F. G . Controle de qualidade do ajustamento recursivo de observações GPS em linhas de base curta. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 10, n. 2, p. 123-140, 2004.

MARTINI, L.; UBERTI, A.; SCHEIBE, L.; COMIN, J.; OLIVEIRA, M. Avaliação da suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa: decisão multicriterial suportada em sistemas de informações geográficas. **Geologia USP. Série Científica**, v. 6, n. 1, p. 41-52, 1 jul. 2006.

MATSUOKA, M. T. **Controle de Qualidade Aplicado no Ajustamento de Observações pelo Método Paramétrico para Aplicações Geodésicas**. UFRGS: Porto Alegre, 2004.

MENEZES, A. V. S. **Metodologia para implantação de uma rede planimétrica de precisão**. Monografia (Conclusão de Curso), Engenharia de Cartográfica e de Agrimensura, UFPE. 2017.

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

NADAL, M. A. D.; et al. Emprego de estações totais robotizadas na automação, controle e aquisição de dados, voltado ao monitoramento de barragens. **Brazilian Journal of Geomatics**, v. 5, n. 1, p. 18-30, 2017.

RIBEIRO, F. C. D. **Proposta de metodologia para verificação da estabilidade dos pilares de redes para monitoramento geodésico de barragens-estudo de caso**. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

ROFATTO, V.F. et al. **A half-century of Baarda's concept of reliability: a review, new perspectives, and applications**. *Survey Review*, p. 1-18, 2018.
DOI:<https://doi.org/10.1080/00396265.2018.1548118>.

SIGUEL, A. R. **Monitoramento da barragem da usina hidrelétrica Mauá utilizando irradiação tridimensional**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná; Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 2013.171p.

SILVEIRA, J. F. A. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. Oficina de Textos, 2017.

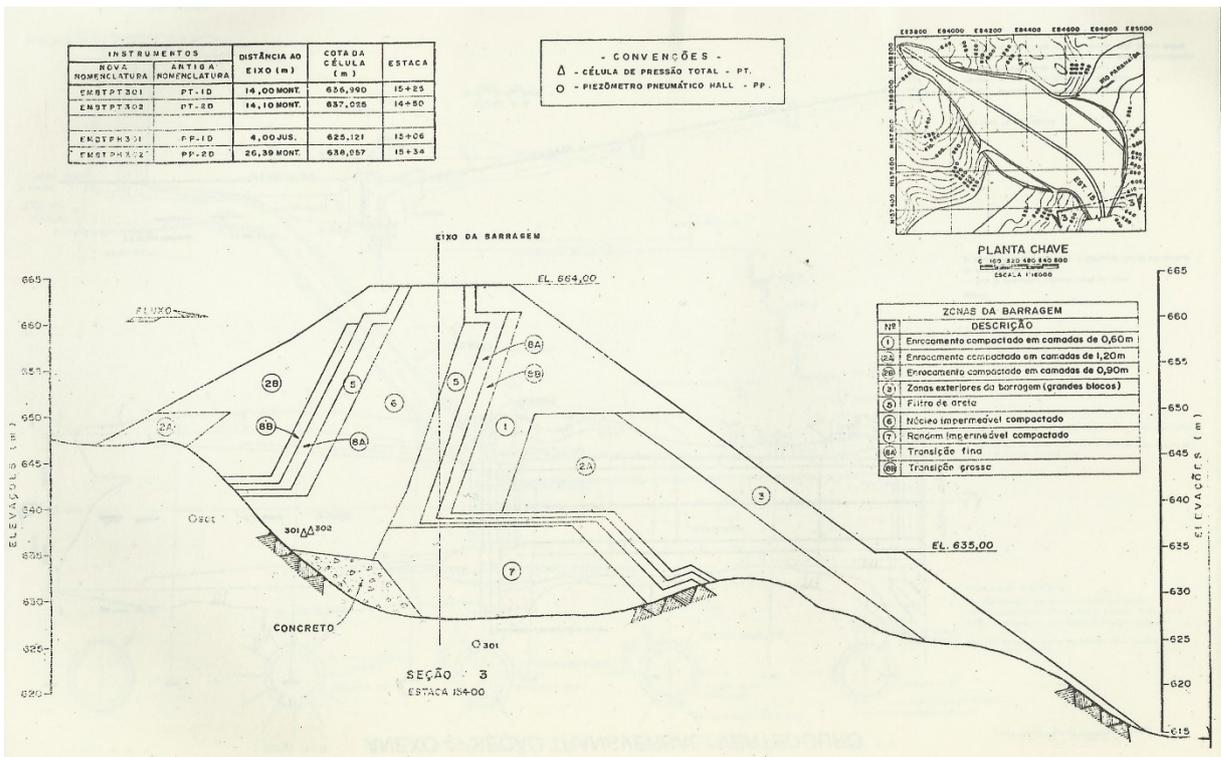
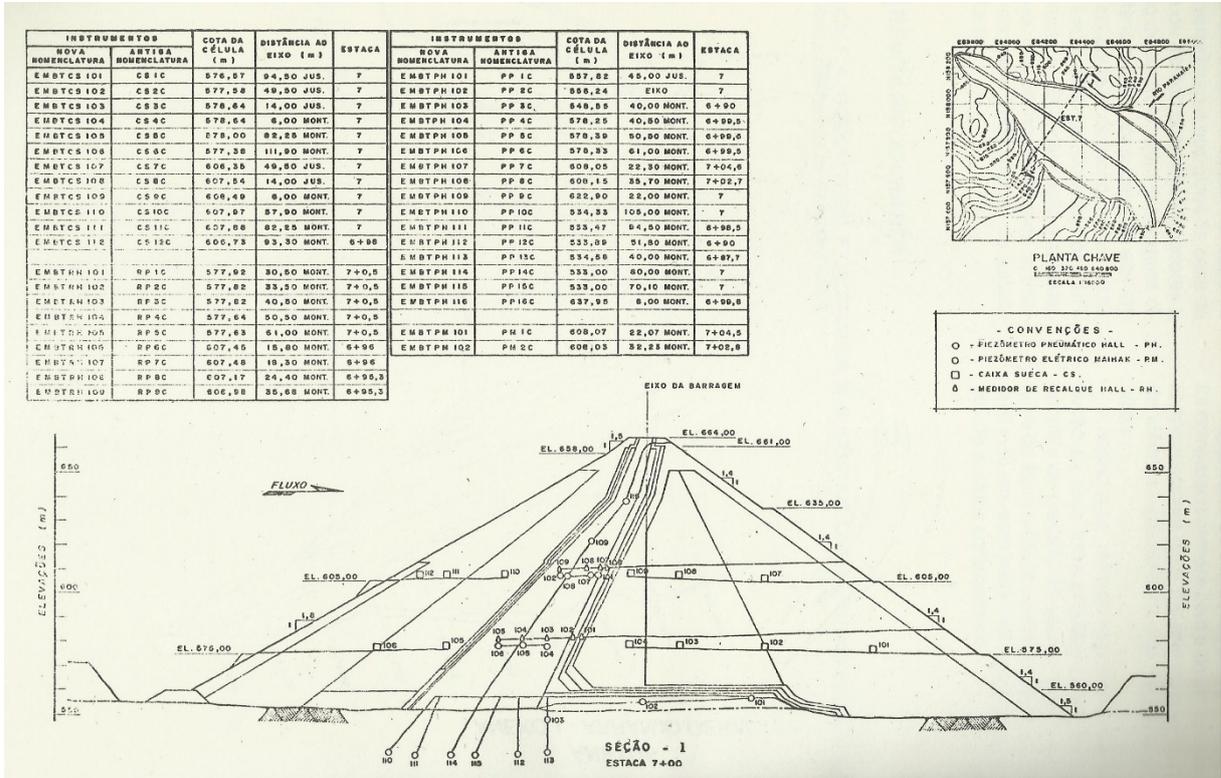
TEUNISSEN, P.J.G. **Testing Theory: an introduction**. 2000. Editora: Delft University Press. Delft, Holanda.

TEUNISSEN, P. J. G. **Testing theory: an introduction**. 2. ed. Delft: Ed. VSSD, 147 p, 2006.

VEIGA, L. K.; ZANETTI, M. A Z.; FAGGION, P. **Fundamentos de Topografia**. Apostila. 2007. 205p.

VIEIRA, J. P. **Auscultação planimétrica de barragens por meio de levantamentos topográficos. Estudo de Caso: Uhe Emborcação**. Dissertação (Conclusão de Curso), Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, UFU. 2018.

ANEXO A - BARRAGEM DE TERRA E ENROCAMENTO OMBREIRA DIREITA E OMBREIRA ESQUERDA



**APÊNDICE A – CONTROLE DO AJUSTAMENTO PARA A CAMPANHA DOS
MARCOS DE CENTRAGEM FORÇADA**

ITERAÇÃO	N-OBS	GL	VCMAX	OBS-S	VPOST	QQ-CALC	QQ-T	VC
1	120	114	1319250,203	88	1,129E+11	1,287E+13	101,600	3,300
2	119	113	1456578,928	84				
3	118	112	1625547,061	81				
4	117	111	1838341,537	86				
5	116	110	4219,303	29				
6	115	109	4448,587	28				
7	114	108	4713,284	22				
8	113	107	2363,874	81				
9	112	106	1802,221	47				
10	111	105	1058,093	79				
11	110	104	1281,647	80				
12	109	103	965,516	9				
13	108	102	1011,516	2				
14	107	101	1063,957	7				
15	106	100	445,988	40				
16	105	99	497,295	37				
17	104	98	456,217	39				
18	103	97	523,649	36				
19	102	96	100,032	36				
20	101	95	124,408	35				
21	100	94	164,398	35				
22	99	93	214,754	35				
23	98	92	104,041	35				
24	97	91	89,704	94				
25	96	90	92,263	92				
26	95	89	95,422	91				
27	94	88	103,219	91				
28	93	87	108,914	89				
29	92	86	119,465	88				
30	91	85	131,930	91				
31	90	84	146,677	89				
32	89	83	163,949	89				
33	88	82	181,566	88				
34	87	81	73,977	67				
35	86	80	110,611	65				
36	85	79	58,236	19				
37	84	78	53,763	20				
38	83	77	53,554	63				
39	82	76	41,518	18				
40	81	75	44,752	20				
41	80	74	48,423	18				
42	79	73	52,829	18				
43	78	72	57,881	18				
44	77	71	41,137	2				
45	76	70	42,094	3				
46	75	69	41,293	5				
47	74	68	43,792	3				
48	73	67	46,867	2				
49	72	66	50,327	1				
50	71	65	54,447	1				
51	70	64	25,273	41				
52	69	63	23,661	48				
53	68	62	22,537	48				
54	67	61	24,099	43				
55	66	60	25,846	46				
56	65	59	28,097	41				
57	64	58	27,770	43				
58	63	57	30,526	43				
59	62	56	30,965	41				
60	61	55	34,421	41				
61	60	54	9,166	2				
62	59	53	5,039	1				
63	58	52	3,680	38				
64	57	51	3,488	8				
65	56	50	3,295					

APÊNDICE B – CONTROLE DO AJUSTAMENTO PARA 1ª CAMPANHA

ITERAÇÃO	N-OBS	GL	VCMAX	OBS-S	VPOST	QQ-CALC	QQ-T	VC
1	86	52	58,034	28	1996,262141	103805,6313	66,430	3,300
2	85	51	54,585	49				
3	84	50	54,189	22				
4	83	49	52,995	38				
5	82	48	52,561	6				
6	81	47	52,127	14				
7	80	46	51,431	29				
8	79	45	47,779	49				
9	78	44	43,127	54				
10	77	43	38,497	59				
11	76	42	37,538	10				
12	75	41	34,374	1				
13	74	40	23,336	63				
14	73	39	20,883	8				
15	72	38	19,799	22				
16	71	37	18,892	19				
17	70	36	18,598	64				
18	69	35	16,848	36				
19	68	34	15,298	10				
20	67	33	15,174	54				
21	66	32	14,530	23				
22	65	31	14,189	25				
23	64	30	14,043	63				
24	63	29	12,719	33				
25	62	28	12,313	3				
26	61	27	12,146	25				
27	60	26	12,073	12				
28	59	25	11,901	39				
29	58	24	11,891	13				
30	57	23	11,760	44				
31	56	22	11,498	15				
32	55	21	10,086	33				
33	54	20	10,046	24				
34	53	19	8,161	34				
35	52	18	8,069	30				
36	51	17	7,697	37				
37	50	16	7,329	40				
38	49	15	7,317	17				
39	48	14	5,271	7				
40	47	13	5,215	34				
41	46	12	4,975	42				
42	45	11	4,465	24				
43	44	10	4,194	5				
44	43	9	4,062	42				
45	42	8	3,357	2				
46	41	7	3,193					

APÊNDICE C - CONTROLE DO AJUSTAMENTO DA 2ª CAMPANHA

ITERAÇÃO	N-OBS	GL	VCMAX	OBS-S	VPOST	QQ-CALC	QQ-T	VC
1	90	56	54,393	40	1168,073	65412,104	70,650	3,300
2	89	55	50,477	6				
3	88	54	49,056	27				
4	87	53	46,381	15				
5	86	52	43,777	20				
6	85	51	35,944	29				
7	84	50	28,993	40				
8	83	49	28,669	3				
9	82	48	25,629	9				
10	81	47	23,803	48				
11	80	46	23,682	60				
12	79	45	21,848	42				
13	78	44	21,061	7				
14	77	43	19,762	51				
15	76	42	19,312	12				
16	75	41	16,366	47				
17	74	40	15,963	6				
18	73	39	13,145	57				
19	72	38	11,426	13				
20	71	37	11,302	4				
21	70	36	11,292	9				
22	69	35	10,544	57				
23	68	34	10,188	63				
24	67	33	10,154	38				
25	66	32	10,125	16				
26	65	31	9,805	18				
27	64	30	9,756	22				
28	63	29	9,717	19				
29	62	28	9,466	22				
30	61	27	9,356	60				
31	60	26	8,855	14				
32	59	25	7,502	44				
33	58	24	7,500	41				
34	57	23	6,896	25				
35	56	22	6,567	28				
36	55	21	6,443	10				
37	54	20	6,383	31				
38	53	19	5,751	6				
39	52	18	5,374	40				
40	51	17	5,123	43				
41	50	16	4,811	44				
42	49	15	4,010	23				
43	48	14	3,949	19				
44	47	13	3,921	30				
45	46	12	2,516					

APÊNDICE D – CONTROLE DO AJUSTAMENTO PARA 3ª CAMPANHA

ITERAÇÃO	N-OBS	GL	VCMAX	OBS-S	VPOST	QQ-CALC	QQ-T	VC
1	90	56	61,103	34	2108,470	118074,337	70,650	3,300
2	89	55	56,207	22				
3	88	54	55,735	27				
4	87	53	54,113	16				
5	86	52	52,931	6				
6	85	51	49,071	59				
7	84	50	48,673	35				
8	83	49	46,981	46				
9	82	48	46,722	40				
10	81	47	45,470	1				
11	80	46	43,284	60				
12	79	45	38,703	49				
13	78	44	36,714	5				
14	77	43	25,886	76				
15	76	42	25,620	10				
16	75	41	23,565	71				
17	74	40	20,767	67				
18	73	39	20,668	14				
19	72	38	19,882	6				
20	71	37	17,662	62				
21	70	36	17,566	57				
22	69	35	16,658	17				
23	68	34	15,582	21				
24	67	33	13,379	48				
25	66	32	11,713	31				
26	65	31	11,266	3				
27	64	30	10,831	27				
28	63	29	10,620	9				
29	62	28	10,612	11				
30	61	27	10,490	15				
31	60	26	10,452	18				
32	59	25	9,506	22				
33	58	24	9,334	29				
34	57	23	9,096	37				
35	56	22	8,513	35				
36	55	21	8,314	18				
37	54	20	7,567	7				
38	53	19	7,308	23				
39	52	18	6,621	39				
40	51	17	6,618	30				
41	50	16	6,530	40				
42	49	15	6,259	27				
43	48	14	6,219	12				
44	47	13	5,939	31				
45	46	12	5,454	8				
46	45	11	5,057	12				
47	44	10	2,993					