

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NIARKIOS LUIZ SANTOS DE SALLES GRAÇA

VALIDAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS
RELATIVOS EM OBRAS DE ENGENHARIA OBTIDOS COM TÉCNICA
GEODÉSICA E MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA

CURITIBA

2014

NIARKIOS LUIZ SANTOS DE SALLES GRAÇA

VALIDAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS
RELATIVOS EM OBRAS DE ENGENHARIA OBTIDOS COM TÉCNICA
GEODÉSICA E MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Área de Concentração em Geodésia, Departamento de Geomática, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luis Faggion

CURITIBA

2014

G729v

Graça, Niarkios Luiz Santos de Salles

Validação da determinação de deslocamentos relativos em obras de engenharia obtidos com técnica geodésica e medidores triortogonais de junta/
Niarkios Luiz Santos de Salles Graça. – Curitiba, 2014.

106 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, 2014.

Orientador: Pedro Luís Faggion .

Bibliografia: p. 103-106.

1. Crosta terrestre - Deslocamento e deformações. 2. Pesos e medidas - Instrumentos. 3. Monitoramento geodésico. 4. Geologia estrutural - Paraná. I. Universidade Federal do Paraná. II. Faggion, Pedro Luís. III. Título.

CDD: 551.840284

TERMO DE APROVAÇÃO

NIARKIOS LUIZ SANTOS DE SALLES GRAÇA

"VALIDAÇÃO DA DETERMINAÇÃO DE DESLOCAMENTOS RELATIVOS EM OBRAS DE ENGENHARIA OBTIDOS COM TÉCNICA GEODÉSICA E MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA"

Dissertação nº 269 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:



Prof. Dr. Pedro Luis Faggion
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga
Departamento de Geomática, UFPR



Prof. Dr. Regiane Dalazoana
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 26 de fevereiro de 2014.

*Aos meus pais, Luiz
Alfredo e Delta, irmãos, Aulus e
Yorgos, dedico este trabalho.*

Agradecimentos

Agradeço pela oportunidade da vida.

Aos meus pais pelo suporte e incentivo.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, e a Universidade Federal do Paraná, pelos conhecimentos transmitidos;

À amiga e secretária do Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas Mônica Verali por toda ajuda, apoio, suporte e dedicação ao seu trabalho e aos alunos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- CAPES pelo suporte financeiro no primeiro mês de vínculo ao programa de pós graduação.

Ao projeto: LEVANTAMENTO GEOLÓGICO – ESTRUTURAL DA REGIÃO E ENTORNO DA BARRAGEM DA UHE MAUÁ, UMA ABORDAGEM INOVADORA PARA O MONITORAMENTO GEODÉSICO NOS PONTOS DE RISCO, pelo apoio financeiro até o termino do vinculo com o programa de pós graduação.

Aos colegas e amigos Wander, Alyne, Raquel e Érica pelo auxilio dentro e fora do campo.

Aos dedicados alunos de iniciação científica: Letícia, Marcelo e Leandro pelo inestimável auxilio na coleta dos dados de campo, desenhos e valiosas risadas.

Ao amigo Edson Mitishita pelas conversas e pescarias (quando possível, pois tempo foi precioso nesta empreitada).

A Natália, pelo companheirismo e bons momentos compartilhados.

Ao professor. Dr. Carlos Aurélio Nadal, por suas elucubrações.

Ao professor. Dr. Luis A. K Veiga, por suas contribuições.

Ao professor. Dr. Pedro Luis Faggion por ter me acolhido como orientado e pela Amizade.

Não por menos, um agradecimento especial aos amigos João Bravo, Ilich Contreras, Roberto Barios e família, por terem proporcionado momentos que fazem a vida não ser contada apenas pelo comprimento dos dias.

“Nascer, morrer,
renascer ainda e progredir
sempre, tal é a lei”.

(Alan Kardec)

RESUMO

O presente trabalho objetiva validar a determinação de deslocamentos relativos obtidos através de técnica Geodésica (poligonação e irradiação) em relação aos derivados de leituras em Medidores Triortogonais de Junta - MTJ. Estes medidores estão instalados nas juntas de dilatação entre blocos, no interior da galeria da barragem da Usina Hidrelétrica Mauá, localizada no Rio Tibagi, na divisa dos municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira, estado do Paraná. Para isso, foi definido e implementado um sistema de referência local, apoiado nos pilares da Rede Geodésica de Monitoramento existente. A partir de um destes pilares e tendo outro como orientação, seguiu-se com uma poligonal por dentro da galeria da barragem e através da técnica de irradiação 3D levantou-se pontos de monitoramento instalados próximos aos MTJ. A partir das coordenadas dos pontos, foram determinadas as componentes de vetores espaciais as quais são usadas para a determinação dos deslocamentos relativos entre os blocos, com respeito a uma época de referência. Estes deslocamentos foram confrontados, em um Diagrama de Caixa, com os deslocamentos obtidos através de leituras nos MTJ. Com base nos resultados encontrados, os diagramas mostraram que os deslocamentos 2D e 3D obtidos por topografia apresentaram magnitude entorno de cinco e nove vezes maior que os medidos pelos MTJ e com um grau de dispersão de valores também superior.

Palavras - Chave: Deslocamentos, Medidores Triortogonais, Monitoramento Geodésico

ABSTRACT

The present study aims to validate the determination of relative displacements obtained by Geodesic techniques (traverse and irradiations), compared to those derived from readings on Joint Gauges-JG. This JG are installed on the contraction joints between blocks, inside the gallery of the Mauá Power Plant Dam, at the Rio Tibagi, border of the cities of Telêmaco Borba and Ortigueira, Parana State. For this, a local reference system was defined and implemented, supported on pillars of the existing Local Geodetic Network. From one of these pillars and taking another as orientation, a traverse was conducted thru the inside of the inspection gallery of the dam and 3D coordinates of monitoring points installed close to the JG were surveyed. From the coordinates of the points, were calculated spatial vectors components, which would be used for the determination of the relative displacements between blocks with respect to a reference epoch. These displacements along with the displacements obtained through readings on JG were verified in a box plot diagram. Based on these results, the diagrams showed that the 2D and 3D displacements obtained by topography showed a magnitude of five and nine times higher than those measured through the JG and a degree of dispersion also with superior values

Key Words: Displacements, Joint Gauges, and Geodetic Monitoring

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MEDIDOR TIPO TRIORTOGONAL DE JUNTA E ORIENTAÇÃO DOS RESPECTIVOS EIXOS.	22
FIGURA 2 – RELÓGIO COMPARADOR DIGITAL SENDO USADO PARA EFETUAR LEITURA EM UM MEDIDOR TRIORTOGONAL DE JUNTA NA BARRAGEM DA USINA DE ITAIPU	23
FIGURA 3 – ERRO DE FECHAMENTO LINEAR (ϵ_L) EM UMA POLIGONAL FECHADA, PARTINDA DE UMA ORIGEM “OPP” TENDO COMO VÉRTICES OS PONTOS “E01” A “E05”, DECOMPOSTO NAS COMPONENTES “X” (ϵ_X) E “Y” (ϵ_Y).	26
FIGURA 4 – GRÁFICO PARA INTERPOLAÇÃO DE CORREÇÕES NAS DISTÂNCIAS.	29
FIGURA 5 – ORGANOGRAMA DAS ETAPAS DE TRABALHO.	30
FIGURA 6 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA UHE MAUÁ.	31
FIGURA 7 - FIGURA DA GEOMETRIA DA REDE DE MONITORAMENTO DA UHE MAUÁ.	33
FIGURA 8 – SISTEMAS DE EIXOS DOS REFERENCIAIS ENVOLVIDOS E VISTA EM PLANTA DA REDE GEODÉSICA DE MONITORAMENTO.	34
FIGURA 9 -DETALHE DA PARTE INTERNA E EXTERNA DA POLIGONAL..	38
FIGURA 10 - DETALHE DA CONSTRUÇÃO DO PILAR (PGG01) A JUSANTE DA BARRAGEM.	38
FIGURA 11 - GEOMETRIA DA PARTE EXTERNA DA POLIGONAL.	39
FIGURA 12 - ESTAÇÃO GEODÉSICA NA ENTRADA DA GALERIA NA MARGEM DIREITA E ESTAÇÃO DE VANTE.	40
FIGURA 13 - FIXAÇÃO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO JUNTO AO INSTRUMENTAL GEOTÉCNICO.	40
FIGURA 14 - CONJUNTO CONTENDO OS SENSORES AMBIENTAIS USADOS NOS TRABALHOS.	41
FIGURA 15 – DATALOGGER FIXADO NA PARTE SUPERIOR DA ESTAÇÃO TOTAL TS15	41

FIGURA 16 - ESQUEMA DE UMA POLIGONAL DE SEIS PONTOS USADO PARA DEDUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DO AJUSTAMENTO DOS DESNÍVEIS.	46
FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO DE UM BOXPLOT	56
FIGURA 18 - COMPORTAMENTO DAS COORDENADAS DOS VÉRTICES DA POLIGONAL PARA AS ÉPOCAS LEVANTADAS.....	60
FIGURA 19 - DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE EIXOS PARA PONTOS DE JUSANTE	70
FIGURA 20 - DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE EIXOS PARA PONTOS DE MONTANTE	71
FIGURA 21 - COMPORTAMENTO DAS RESULTANTES 2D DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA	78
FIGURA 22 - COMPORTAMENTO DAS RESULTANTES 2D OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.	79
FIGURA 23 -COMPORTAMENTO DA RESULTANTES 3D DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA.....	80
FIGURA 24 - COMPORTAMENTO DAS RESULTANTES 3D OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.	81
FIGURA 25 -COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DX OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.	83
FIGURA 26 - COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DLX DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA.....	84
FIGURA 27 COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DY OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.	85
FIGURA 28 -COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DLY DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA.....	86
FIGURA 29 - COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DZ OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.	87
FIGURA 30 - COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DLZ DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA.....	88
FIGURA 31 - COMPORTAMENTO DAS NOVAS RESULTANTES 2D OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.....	92

FIGURA 32 - COMPORTAMENTO DAS NOVAS RESULTANTES 2D DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA.....	93
FIGURA 33 -COMPORTAMENTO DAS NOVAS RESULTANTES 3D OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.....	94
FIGURA 34 - COMPORTAMENTO DAS NOVAS RESULTANTES 3D DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA.....	95
FIGURA 35 - BOXPLOT PARA OS DESLOCAMENTOS 2D.....	96
FIGURA 36- DIAGRAMA DE DISPERSÃO DOS DESLOCAMENTOS 2D	97
FIGURA 37 - BOXPLOT PARA OS DESLOCAMENTOS 3D.....	97
FIGURA 38 - DIAGRAMA DE DISPERSÃO DOS DESLOCAMENTOS 3D	98

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - COORDENADAS DOS PILARES DA REDE DE MONITORAMENTO NO SISTEMA DA BARRAGEM.....	56
QUADRO 2 -COORDENADAS DOS VERTICES DA POLIGONAL PARA CAMPANHA 01 (17/08/12).....	57
QUADRO 3 -COORDENADAS DOS VERTICES DA POLIGONAL PARA CAMPANHA 02 (05/09/12).....	58
QUADRO 4 - COORDENADAS DOS VERTICES DA POLIGONAL PARA CAMPANHA 03 (07/11/12).....	58
QUADRO 5 -COORDENADAS DOS VERTICES DA POLIGONAL PARA CAMPANHA 04 (20/03/13).....	59
QUADRO 6 - COORDENADAS DOS VERTICES DA POLIGONAL PARA CAMPANHA 05 (21/11/13).....	59
QUADRO 7 - FECHAMENTOS DO NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO E AS TOLERÂNCIAS ADMISSÍVEIS.	61
QUADRO 8 – ALTITUDES DOS VÉRTICES DA POLIGONAL APÓS O AJUSTAMENTO E RESPECTIVAS PRECISÕES	61
QUADRO 9 – RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA ABORDAGEM VETORIAL, PARA CAMPANHA 01 (17/08/2012)	63
QUADRO 10 - RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA ABORDAGEM VETORIAL, PARA CAMPANHA 02 (05/09/2012)	64
QUADRO 11 - RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA ABORDAGEM VETORIAL, PARA CAMPANHA 03 (07/11/2012)	65
QUADRO 12 - RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA ABORDAGEM VETORIAL, PARA CAMPANHA 04 (20/03/2013)	66
QUADRO 13 - RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA ABORDAGEM VETORIAL, PARA CAMPANHA 05 (21/11/2013)	67
QUADRO 14 -DADOS DAS LEITURAS DOS MTJ PARA AS CAMPANHAS 01, 02 E 03.....	68
QUADRO 15 - DADOS DOS MTJ PARA AS CAMPANHAS 04 E 05.....	69
QUADRO 16 - COMPONENTES VETORIAIS OBTIDAS PARA AS ÉPOCAS 01 E 02.....	72

QUADRO 17 - COMPONENTES VETORIAIS OBTIDAS PARA AS ÉPOCAS 03 E 04.....	73
QUADRO 18 - COMPONENTES VETORIAIS OBTIDAS PARA A ÉPOCA 0574	
QUADRO 19 – DIFERENÇAS OBTIDAS PARA AS COMPONENTES VETORIAIS (TOPOGRAFIA) .	75
QUADRO 20 - DIFERENÇAS OBTIDAS PARA OS MTJ.....	76
Quadro 21 - DIFERENÇAS OBTIDAS PARA OS MTJ	77
QUADRO 22 - DIFERENÇAS OBTIDAS PARA AS COMPONENTES VETORIAIS, ADOTANDO A ÉPOCA 02 COMO ORIGEM.....	90
QUADRO 23 - DIFERENÇAS OBTIDAS PARA OS MTJ, ADOTANDO A ÉPOCA 02 COMO ORIGEM.....	91

LISTA DE ABREVIÇÕES E SIGLAS

1D	- Uma dimensão
2D	- Duas dimensões ou bi-dimensional
ANA	- Agência Nacional das Águas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ATR	- <i>Automatic Target Recognition</i>
CBGB	- Comissão Brasileira de Grandes Barragens
CBDB	- Comitê Brasileiro de Barragens
CCR	- Concreto Compactado com Rolo
COPEL	- Companhia Paranaense de Energia
CPGCG	- Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas
EDM	- <i>Electrical Distance Measurement</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
ITRF	- <i>International Terrestrial Reference Frame</i>
LACTEC	- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
MGI	- Marco Geodésico Interno
MSIB	- Manual de Segurança e Inspeção de Barragens
MTJ	- Medidor Triortogonal de Junta
MW	- Mega Watts
PNSB	- Política Nacional de Segurança de Barragens
ppm	- Parte por milhão
SB	- Sistema da Barragem
SGC	- Sistema Geodésico Cartesiano
SGCL	- Sistema Geodésico Cartesiano Local
SNISB	- Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UHE	- Usina Hidrelétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL.....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS.....	18
2.2 AUSCULTAÇÃO DE BARRAGENS.....	21
2.2.1 Instrumentação	21
2.2.2 Auscultação Geodésica.....	24
2.2.3 Erros associados.....	27
3 METODOLOGIA	30
3.1 ÁREA DE ESTUDO	31
3.2 REDE GEODÉSICA DE MONITORAMENTO.....	32
3.3 SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL.....	33
3.4 POLIGONAÇÃO	37
3.4.1 Correções ambientais	41
3.4.2 Cálculos	42
3.4.2.1 Planimetria.....	42
3.4.2.2 Altimetria.....	45
3.5 ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS.....	51
3.5.1 Abordagem Vetorial.	52
3.6 VALIDAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS	54
4 RESULTADOS	56
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	99
5.1 CONCLUSÕES	99
5.2 RECOMENDAÇÕES	101
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1 INTRODUÇÃO

No escopo da engenharia, dada à magnitude das obras criadas e riscos inerentes, passou a existir não apenas a necessidade de acompanhamento de todo o processo de criação, mas também da implantação e operação ao longo da vida útil destas obras. Com isso, objetiva-se verificar as reais condições daquilo que se constrói em face do que havia sido planejado, levando-se em conta uma avaliação temporal do comportamento destas obras. O monitoramento por assim dizer, passou a ser necessidade intrínseca principalmente na construção civil, em obras que visam suprir a demanda gerada principalmente por recursos energéticos.

Cruz (2009), afirma que nos últimos tempos tem havido uma crescente valoração nacional e internacional, dos sistemas de inspeção e observação de obras de engenharia civil, em especial barragens. Estas estruturas sofrem com a exposição às intempéries e degradação dos materiais, implicando na alteração das condições de segurança do empreendimento. O mesmo autor afirma ainda que o engenheiro dispõe de, como principais meios de avaliar a segurança de um empreendimento, inspeções visuais, auscultação geodésica e instrumentação de auscultação. A instrumentação em si torna-se ferramenta não apenas para a avaliação das condições de segurança de um empreendimento em todas as suas fases, mas também para verificação de hipóteses adotadas em projetos, com o objetivo principal de tornar as obras mais econômicas, dentro das necessárias condições de segurança.

Segundo Cruz (2009), a instrumentação de uma barragem deve ser orientada para questões específicas ou para atender critérios de projeto. Em casos onde houve rompimento de barragens (China e Estados Unidos) ou registros de trincas e rupturas da laje, apesar das condições de segurança não terem sido afetadas, tais casos sempre são tomados como exemplos de aprendizagem. Sendo assim, o monitoramento desempenha um papel importante no projeto, segurança e nos processos construtivos de obras de arte na engenharia (barragens, pontes, viadutos, túneis, etc).

A detecção de eventuais deslocamentos diferenciais entre os blocos de concreto que compõem uma barragem pode ser realizada através de leituras em instrumentos específicos. Dentre eles, citam-se os medidores tipo

triortogonais, que permitem a detecção de abertura/fechamento da junta, recalque diferencial entre blocos e deslizamentos horizontais.

Neste contexto, propõe-se uma validação da determinação de deslocamentos relativos entre os blocos de uma barragem, utilizando dados oriundos dos medidores triortogonais de junta e observações topográficas. Por conveniência, os resultados do levantamento topográfico são apresentados em um referencial local, vinculado a uma rede geodésica de monitoramento materializada através de pilares de concreto, engastados na rocha, a montante e a jusante da barragem. Para isso, pretende-se através do desenvolvimento de uma poligonal, a qual estará apoiada nesta rede, realizar o levantamento tridimensional de pontos de monitoramento instalados junto a alguns dos medidores triortogonais de junta da barragem da UHE Mauá.

1.1 OBJETIVO GERAL

Validar a determinação de deslocamentos relativos em obras de engenharia utilizando técnicas geodésicas e medidores triortogonais de junta

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Definir e Implementar um sistema de referência local (sistema da barragem);
- b) Definir a poligonal e monumentar pontos onde serão instalados os vértices ao longo da galeria de inspeção da usina hidrelétrica de Mauá, de forma a permitir a aplicação da técnica de irradiação 3D para os pontos engastados junto aos medidores triortogonais de junta;
- c) Levantar tridimensionalmente os pontos de monitoramento geodésico, durante e depois do enchimento do reservatório;
- d) Calcular a atitude (orientação) relativa entre pontos de monitoramento contíguos;
- e) Comparar os resultados obtidos nas diferentes épocas de levantamento.
- f) Validar eventuais deslocamentos obtidos por topografia através da comparação com os resultados dos medidores triortogonais de junta.

1.3 JUSTIFICATIVA

Durante a análise dos resultados da instrumentação de uma barragem, as medições dos deslocamentos horizontais e verticais devem ser consideradas simultaneamente, mesmo que obtidas por meios diferentes, por exemplo, instrumentos de monitoramento e topografia (Cruz,1996).

Através da instrumentação dos blocos com pêndulos diretos ou invertidos e da instalação de medidores triortogonais em todas as juntas de dilatação entre blocos, tem-se um controle quase completo dos deslocamentos verticais e horizontais da barragem em relação a pontos de referência. Não se trata de deslocamentos absolutos, visto que estes só podem ser obtidos através de medições geodésicas, porém a instrumentação dos blocos constituem um método adequado para auscultação de barragens (Silveira,2003).

Portanto, é justificável uma investigação quanto ao uso de uma metodologia para determinação de deslocamentos tridimensionais que possui potencial para fornecer informações de caráter relativo e absoluto simultaneamente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item pretende-se abordar de forma sucinta alguns aspectos inerentes ao monitoramento de Barragens, levando-se em conta uma contextualização legislativa acerca do assunto, bem como algumas formas de monitoramento.

2.1 SEGURANÇA DE BARRAGENS

Castro et al. (2011), fazendo um breve retrospecto, mencionam que a Comissão Brasileira de Grandes Barragens (CBGB) criada em 1936, seguindo a tendência mundial da década de 70, editou em 1979 e 1983 as “Diretrizes para a Inspeção e Avaliação da Segurança de Barragens em Operação”.

Posteriormente em 1986, editou as “Recomendações para a Formulação e Verificação de Critérios e Procedimentos de Segurança de Barragens”, em 1995 o “Cadastro Brasileiro de Deterioração de Barragens e Reservatórios” e em 1996, “Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil”. Estas publicações elaboradas por comissões da CBGB, serviram para balizar os procedimentos de segurança adotados por algumas organizações brasileiras. Com isso, teve início no país uma discussão sobre a segurança das barragens.

Cruz (2009), comenta que empresas particulares, centros de pesquisas em universidades e laboratórios governamentais têm se tornado centros de especialização e fabricantes de instrumentos. A Universidade Federal do Paraná (UFPR), dentre as instituições de ensino e pesquisa, foi uma das pioneiras no Brasil a realizar estudos nesta área nos anos 1990, com a criação da linha de pesquisa em Auscultação Geodésica, iniciada pelos professores Álvaro Doubeck, Camil Gemael e Carlos Aurélio Nadal na Barragem de Foz do Areia. Posteriormente, pelos professores Camil Gemael, Carlos Aurélio Nadal e Pedro Luis Faggion na Barragem de Salto Segredo. No fim da década de 1990 pelos professores Camil Gemael e Pedro Luis Faggion, na barragem de Salto Caxias. Em 2005, na mesma barragem, Niel Nascimento Teixeira desenvolveu um trabalho onde foi feita uma análise geodésica da deformação da crosta a partir de deslocamentos tridimensionais obtidos pelo sistema de posicionamento global.

Em parceria firmada entre o Departamento de Geomática da UFPR, o Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG), contando com o apoio da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), foi criado o projeto de pesquisa “Integração da auscultação Geodésica com a instrumentação de controle e segurança da barragem de Salto Caxias”. Durante o período de vigência deste projeto Granemann (2005), desenvolveu uma pesquisa sobre o desenvolvimento de uma rede geodésica para monitoramento da estrutura da barragem, Martini (2005), pesquisou sobre a calibração de prismas de reflexão total em forma de fita adesiva e seu uso no controle de deslocamentos e Zocolotti (2005) investigou sobre a utilização de poligonais de precisão para o monitoramento

bidimensional de pontos dentro da galeria de inspeção da barragem. Na sequência, com financiamento da ANEEL/COPEL, um segundo projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado “Automação da instrumentação de auscultação geodésica de controle e segurança da barragem de Salto Caxias”, gerou outros dois trabalhos: (Nadal, 2008), sobre controle e operação remota de estações totais robotizadas voltado a auscultação geodésica; e (Neves, 2008), sobre processamento e análise de levantamentos geodésicos aplicado ao monitoramento de estruturas.

A partir de 2011, contando com apoio do projeto de pesquisa e desenvolvimento “Levantamento geológico-estrutural da região e entorno da barragem da UHE Mauá, uma abordagem inovadora para o monitoramento geodésico nos pontos de risco”, fomentado pela ANEEL/COPEL, foram desenvolvidos trabalhos nas áreas de monitoramento contínuo por GNSS (Mugio, 2012), uso de nivelamento trigonométrico para avaliação de recalques (Silva, 2012), avaliação da potencialidade do laser scanner terrestre no monitoramento de estruturas (Lenartovicz, 2013) e uso da técnica de irradiação tridimensional para monitoramento (Siguel, 2013). Estes trabalhos de pesquisas mencionados ilustram o comentário de Cruz (2009) e a contribuição da UFPR como instituição de ensino e pesquisa no tema monitoramento.

O Comitê Brasileiro De Barragens - CBDB, fundado em 1961 e que sucedeu a CBGB, lançou em 1999 o “Guia Básico de Segurança de Barragem”, com o objetivo de orientar a elaboração de projetos e construção de barragens mais seguras (CBDB, 2001). De acordo com o CBDB, cada barragem deve ser classificada em função do seu risco de ruptura. Esta classificação é feita a partir de uma correlação onde se leva em conta níveis da consequência da ruptura, perdas de vidas e danos nos âmbitos sociais, econômicos e ambientais.

O Ministério da Integração Social lançou em 2002 o “Manual de Segurança e Inspeção de Barragens - MSIB”, a fim de estabelecer uma rotina básica de procedimentos de segurança a serem aplicados na construção de novas barragens e na manutenção das já existentes. Este manual também indica que cada barragem deve possuir instrumental adequado às suas dimensões e que as leituras nesses instrumentos sejam realizadas e analisadas de forma periódica.

Reforçando a questão de segurança em barragens, em 2010 foi sancionada a Lei 12.334/2010 (BRASIL, 2010), que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Nesta lei, também fica determinado que a Agência Nacional das Águas (ANA) ficará incumbida de gerenciar os órgãos fiscalizadores das barragens, bem como coordenar e encaminhar anualmente ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos o Relatório de Segurança de Barragem.

2.2 AUSCULTAÇÃO DE BARRAGENS

O termo “Auscultação”, comum da medicina, vem a tempos sendo empregado na construção civil com vistas ao monitoramento. Neste sentido, o termo pode ser entendido como um conjunto de formas de observação do comportamento da barragem e fundações, para controlar suas condições de segurança, comprovar a validade das hipóteses e dos métodos de cálculos utilizados no projeto e verificar a necessidade de ações corretivas (ITAIPU, 2013).

2.2.1 Instrumentação

Cruz (2009), elucida que a segurança de uma barragem depende fundamentalmente do projeto de construção e que a instrumentação constitui um método de observação muito importante, mas não aumenta intrinsecamente a segurança da obra. Aponta ainda que os principais objetivos da instrumentação de uma barragem são:

- a) Verificar as hipóteses, os critérios e os parâmetros adotados em projeto, de modo a permitir o aprimoramento do projeto da própria obra em estudo, ou de futuras barragens, visando a condições mais econômicas e/ou mais seguras;
- b) Verificar a adequação de métodos construtivos;

- c) Verificar as condições de segurança das obras, de modo a serem adotadas medidas corretivas em tempo hábil, se necessárias;

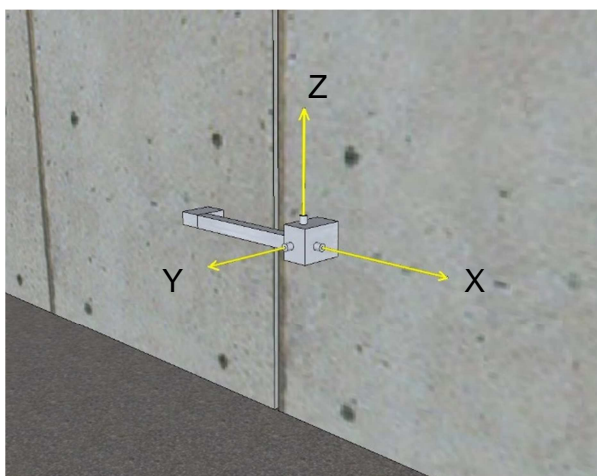
Os instrumentos podem ser classificados de acordo com alguns critérios, a saber:

- a) Material onde se encontra instalado;
- b) Princípio de funcionamento;
- c) Grandeza a ser mensurada;

No presente trabalho será abordado apenas o medidor tipo triortogonal que, conforme os critérios mencionados, apresenta princípio de funcionamento mecânico, pode ser empregado para mensurar grandezas de deslocamentos relativos e geralmente são instalados no concreto ou maciço rochoso.

Os medidores triortogonais de junta (MTJ), são usualmente empregados para monitorar fissuras, trincas ou juntas de contração entre blocos. Através deles, podem-se determinar deslocamentos diferenciais entre blocos segundo três direções ortogonais entre si (recalques diferenciais, deslocamentos horizontais e movimento de abertura e fechamento da junta), FIGURA 1.

FIGURA 1 - MEDIDOR TIPO TRIORTOGONAL DE JUNTA E ORIENTAÇÃO DOS RESPECTIVOS EIXOS.



Fonte: O Autor (2013) .

A auscultação de estruturas de concreto de uma barragem, através de observações de deslocamentos diferenciais entre blocos, é um procedimento

usual para detectar eventuais anomalias de comportamento. Matos (2002) descreve que o princípio de funcionamento de um MTJ consiste em medir deslocamentos em três direções ortogonais, com o auxílio de um sistema de apoios construídos em aço inoxidável e fixados convenientemente na estrutura. Com relógio comparador adaptado para ser instalado nos furos existentes nas barras retangulares do MTJ, obtém-se facilmente as medidas nos três eixos ortogonais desejados, e quando compara-se as leituras entre as épocas observadas, eventuais deslocamentos são traduzidos em variações nas leituras. Silveira (2003), menciona que o relógio comparador (FIGURA 2) usado para este fim deve apresentar campo de leitura da ordem de 10mm (ou mais) e sensibilidade de 1 micron (0,001mm). Afirma ainda que tal instrumento, desde que operado por pessoas cuidadosas e de bom nível técnico, permite uma precisão da ordem de $\pm 0,01$ mm.

FIGURA 2 – RELÓGIO COMPARADOR DIGITAL SENDO USADO PARA EFETUAR LEITURA EM UM MEDIDOR TRIORTOGONAL DE JUNTA NA BARRAGEM DA USINA DE ITAIPU



Fonte: http://jie.itaipu.gov.br/print_node.php??secao=turbinadas1&nid=26824

Como pode ser visto na FIGURA 1, o sistema de eixos triortogonais é orientado de modo que o eixo “x” forneça os deslocamentos de abertura ou de fechamento da junta, o eixo “y” os deslocamentos horizontais e o eixo “z” os deslocamentos verticais. As bases de leitura, por estarem solidárias com a região instrumentada, acompanham os movimentos relativos ocorridos nesta região (Matos,2002).

O consórcio de instrumentos (pêndulos diretos, invertidos, extensômetros múltiplos, e medidores tipo triortogonais instalados em todas as juntas de contração) permite, em termos de deslocamentos entre os blocos, a detecção de recalques relativos ou de eventuais anomalias no comportamento da barragem (SILVEIRA, 2003). O autor citado, recomenda ainda que todas as juntas de contração entre os blocos ao longo das paredes das galerias de drenagem da fundação, recebam tais instrumentos, bem como as proximidades da crista da barragem, quando esta dispuser de galeria nesta região. Estes locais de instalação do instrumental de segurança e inspeção, passam a ser pelas mesmas razões, interessantes também para instalação de pontos para o monitoramento geodésico.

Outro aspecto a ser considerado é que o instrumental de auscultação de barragens têm se consagrado como ferramenta para promover o monitoramento destas estruturas. Enquanto medições micrométricas de juntas fornecem observações relativas, deformações absolutas podem ser obtidas caso os pontos de referência estejam fora da estrutura e além da área de influência do reservatório. Medições periódicas podem ser realizadas relativamente a estes pontos de referência absolutos. Todavia, vale lembrar que para avaliações de deformações estruturais permanentes (de caráter global/regional) necessitam-se dados absolutos.

2.2.2 Auscultação Geodésica

Medições geodésicas de recalques em barragem, portanto utilizando técnicas absolutas, foram utilizadas pela primeira vez na barragem suíça de Montsalvens em 1921, generalizando-se entre as barragens européias e americanas nas décadas seguintes (SILVEIRA,2003).

Levantamentos geodésicos têm sido tradicionalmente empregados para determinar deslocamentos de pontos na superfície de um objeto em relação a outros tidos como estáveis, conforme cita o Department of The Army (1994). Na mesma publicação, menciona-se ainda que quando os pontos de referência estão localizados na própria estrutura apenas deformações relativas podem ser

determinadas. Chen (1983), cita as seguintes razões para o uso de métodos geodésicos em levantamentos de deformação:

- a) Fornecem o status global para todo o corpo deformável;
- b) Contém o esquema de auto checagem dos resultados e são capazes de avaliar a acurácia das medições globalmente;
- c) Fornecem versatilidade e conveniência para qualquer ambiente e condição de operação;

Graneman (2005), justifica em seu trabalho que a implantação de uma rede geodésica de monitoramento para controle de deslocamentos estruturais, garante resultados precisos e confiáveis. Apoiando-se nesta rede de monitoramento, Zocolotti (2005) faz uso de uma poligonal para levantar bidimensionalmente pontos internos à galeria de inspeção da barragem da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias. Silveira (2013) destaca que no Brasil esta barragem foi a primeira a ter sua instrumentação de segurança automatizada parcialmente.

O Department of The Army (1994), caracteriza uma poligonal como medições de comprimentos e direções de linhas retas, conectando uma série de pontos na superfície física da Terra. Os pontos conectados pelas linhas de uma poligonal são denominados de estações da poligonal e as direções horizontais e distâncias observadas, servem para calcular as posições relativas destas estações.

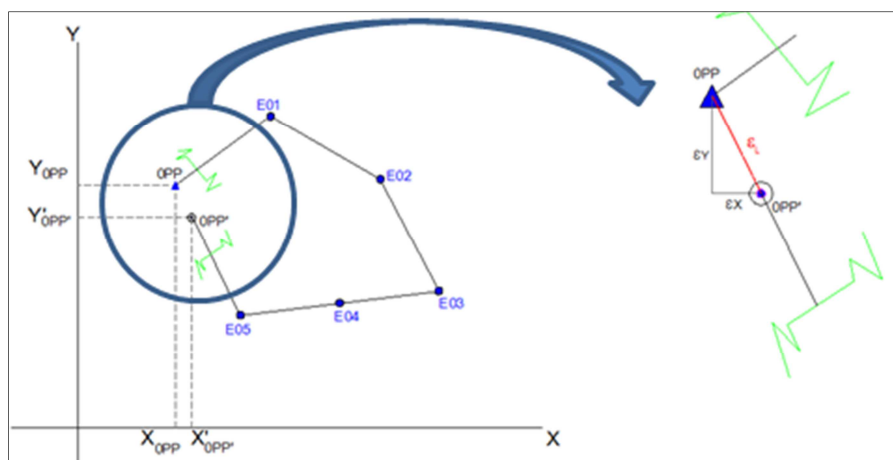
Crawford (2003), aborda que a poligonação é uma das mais práticas aplicações de medição de distâncias e direções horizontais, porém requer atenção cuidadosa do operador do instrumento na obtenção das observações, para atingir a precisão necessária no controle de construções. Menciona ainda que uma poligonal fechada envolve a realização de medições que irão resultar em uma figura geométrica ou matematicamente fechada. Tal característica permite a checagem das precisões atingidas em seu fechamento, tanto no quesito angular quanto linear.

Nesta poligonal, o erro de fechamento angular ou simplesmente erro angular é dado pela diferença entre o somatório dos ângulos horizontais (no caso, externos à poligonal) e o valor teórico admitido, que é função do número de vértices da poligonal. Pode-se expressar este erro através da equação a seguir:

$$\varepsilon_{\alpha} = \sum_{i=1}^n \alpha_{obs} - (n + 2) \times 180^{\circ} \quad (01)$$

Já o erro linear (ε_L) é dado em termos das diferenças de componentes “x” e “y” das coordenadas de partida em face as coordenadas de chegada, as quais não fossem estes erros, seriam as mesmas. A FIGURA 3 a seguir, ilustra um exemplo de erro de fechamento linear em uma poligonal fechada, sendo possível notar que erros acumulados nas componentes “x” e “y” impossibilitaram o fechamento no ponto “OPP” de origem.

FIGURA 3 – ERRO DE FECHAMENTO LINEAR (ε_L)



Fonte: O Autor (2013)

Observação: a figura acima mostra uma poligonal fechada, partindo de uma origem “OPP” tendo como vértices os pontos “E01” à “E05”, decomposto nas componentes “x” (ε_x) e “y” (ε_y).

Ibrahim et al. (2010), apresentaram um estudo sobre monitoramento de deformação estrutural em dois prédios, usando técnicas de posicionamento por GPS, poligonação para levantamento de alvos com fita refletiva instalados

próximos a fissuras e medição com paquímetro. Neste estudo, são mostrados os resultados da variação das coordenadas da rede obtida por GPS e por poligonação, bem como resultados dos pontos monitorados por técnica topográfica em relação aos resultados obtidos com o paquímetro. Na publicação, os autores comentam que técnicas de levantamento terrestre detectaram movimentação 2D (variação de coordenadas x e y) enquanto que com o uso do paquímetro apenas 1D (variação da grandeza distância, entre dois pontos).

2.2.3 Erros Associados

É de senso comum nas mais diversas áreas do conhecimento que a toda e qualquer medida ou observação haverá associada uma incerteza ou “erros de medida” das mais diversas magnitudes. Gemael (2004), afirma que estes erros podem ser atribuídos à falibilidade humana, à imperfeições do equipamento e à influências das condições ambientais. Estes erros são tradicionalmente classificados em grosseiros, sistemáticos e acidentais.

Com o passar das décadas, uma evidente evolução do instrumental geodésico pôde ser observada, principalmente no que tange a precisão e o grau de automação na coleta de dados. O Department of The Army (1994) cita que além da acurácia dos levantamentos de deformação, os principais fatores limitantes não são as precisões instrumentais, mas sim as influências ambientais e a desatenção humana, enumerando os seguintes aspectos:

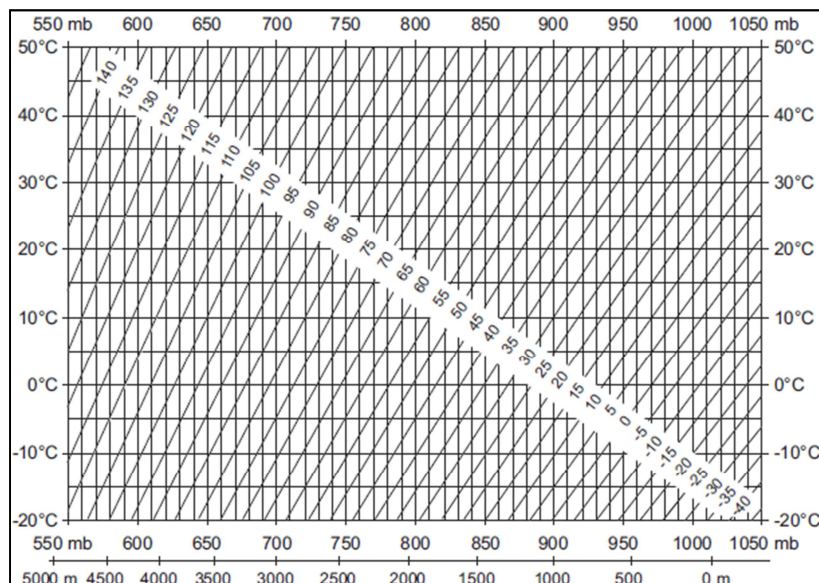
- a) Refração atmosférica;
- b) Influências térmicas que afetam os componentes eletrônicos, mecânicos e ópticos dos instrumentos (sejam eles quais forem) bem como a estabilidade das estações de levantamento;
- c) A instabilidade das estações de monitoramento (por instalação ou monumentação inadequados);
- d) Falta de calibração apropriada dos equipamentos utilizados; e

- e) Falta de entendimento, por parte dos usuários, das fontes de erro e uso adequado das observações coletadas.

A tomada de leituras de parâmetros ambientais (temperatura, pressão atmosférica e umidade relativa do ar) servem para correções das distâncias medidas eletronicamente e das direções observadas (Martini,2005; Gomes,2006; Santos,2009). Na barragem, a medição de tais parâmetros pode fornecer informações sobre o meio de propagação do sinal EDM (Electrical Distance Measurement) usado na medição de distâncias. Silveira (2003), salienta que as influências térmicas ambientais entre verão e inverno podem influenciar nas respostas de alguns instrumentos.

Para correções nas distâncias medidas por distanciômetros eletrônicos, a contribuição do parâmetro umidade relativa na determinação de correções pode ser simplificada em gráficos (ábacos), geralmente trazidos nos manuais dos equipamentos (FIGURA 4). Estes gráficos são usualmente construídos com o valor padrão para umidade relativa de 60% (valor de condição de calibração do dispositivo EDM) e a partir dos valores de temperatura e pressão observados pelo usuário, este pode interpolar um valor de correção para a distância medida. Nestes mesmos manuais, são trazidas equações para determinação mais precisa destas correções, e conforme manual do equipamento, o uso do valor fixo igual a 60% para umidade relativa, implicará em um erro máximo associado à correção calculada de 2 ppm (ou 2mm por km). Os usuários devem atentar-se ao fato de que fabricantes conferem a cada modelo de equipamento, um gráfico de correção, que pode ou não ser igual entre modelos, ou diferente de equipamentos de outros fabricantes. A não observância deste aspecto pode gerar correções imprecisas e impactar negativamente nos resultados.

FIGURA 4 – GRÁFICO PARA INTERPOLAÇÃO DE CORREÇÕES NAS DISTÂNCIAS.



Fonte: Adaptado de LEICA GEOSYSTEMS®

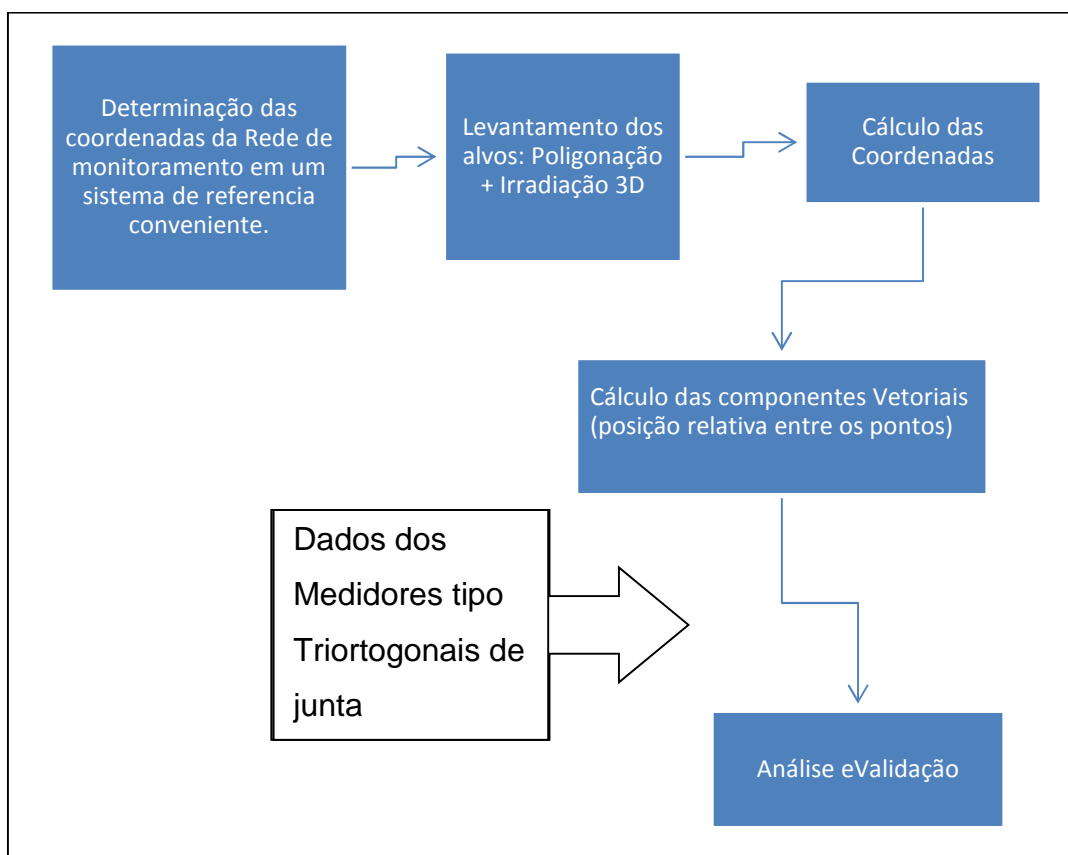
Chrzarnowski (2006) aponta uma série de fatores que influenciariam a qualidade posicional de pontos de monitoramento em encostas de minas a céu aberto, através do emprego de estações totais robotizadas. Avalia dentre outros aspectos, os limites da precisão de tais instrumentos, concluindo que este instrumental oferece os meios mais eficientes para monitoramento de deslocamentos em alta frequência. Zocolotti (2005) fez uso de uma estação total em seu trabalho e relata sobre alguns erros instrumentais envolvidos e a importância das correções destes erros para obtenção de bons resultados.

Portanto, o monitoramento de uma barragem ou de deformações com estação total, deve ser feito através da medição tanto de deslocamentos horizontais como verticais, por meio de um número redundante de observações e das devidas correções ambientais. Preliminarmente, uma minuciosa verificação, retificação ou eventual calibração do instrumental torna-se imprescindível.

3 METODOLOGIA

Neste item apresenta-se a proposta de metodologia empregada para atingir os objetivos previamente elencados (FIGURA 5), sob a forma de um organograma bem como uma breve descrição sobre a área de estudo e algumas características da barragem.

FIGURA 5 – ORGANOGRAMA DAS ETAPAS DE TRABALHO.

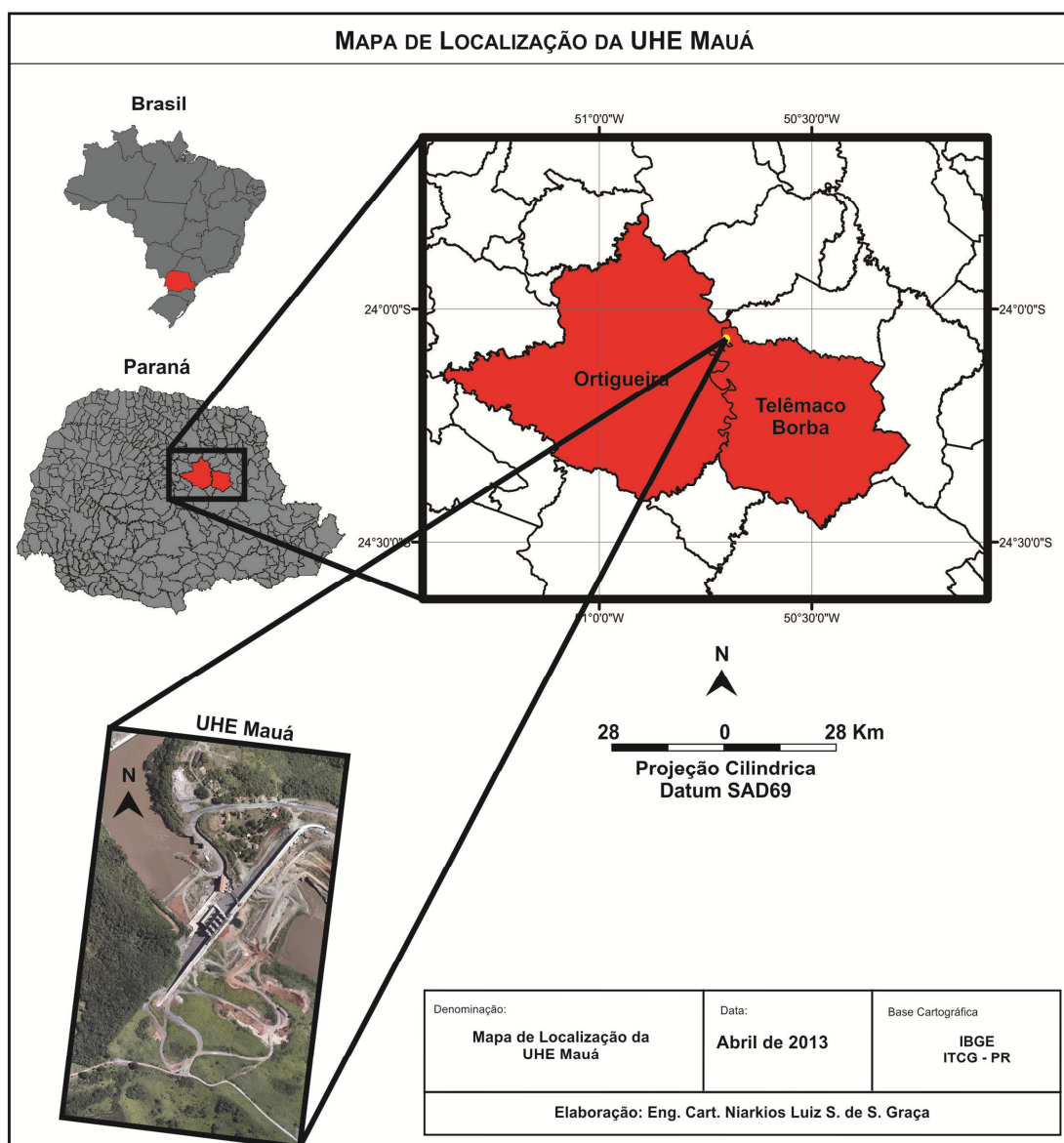


Fonte: O Autor (2013).

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo onde foi desenvolvido este trabalho é a Barragem da Usina Hidrelétrica Mauá. Esta localiza-se no trecho médio do Rio Tibagi, afluente pela margem esquerda do rio Paranapanema, na divisa dos municípios de Telêmaco Borba e Ortigueira, no Estado do Paraná, FIGURA 6.

FIGURA 6 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA UHE MAUÁ.



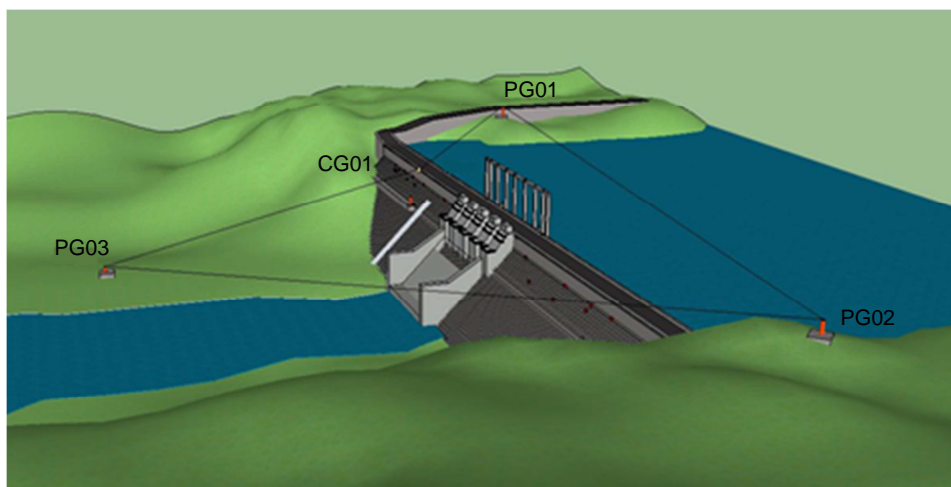
Fonte: O Autor (2013).

A barragem da UHE Mauá é de concreto compactado com rolo (CCR) com 745 m de comprimento na crista e 85 m de altura máxima, permitindo a formação de um reservatório com cerca de 84 km² de superfície. A potência instalada total da Usina Hidrelétrica Mauá é de 361 MW, sendo 350 MW instalados na casa de força principal e 11 MW na casa de força secundária implantada junto à barragem. O circuito de geração é composto por: tomada de água de baixa pressão, túnel adutor escavado em rocha com 1.922 m de comprimento, câmara de carga, tomada de água de alta pressão e três túneis forçados no trecho final, aproveitando uma queda bruta de 120 m. A casa de força principal é abrigada e contém três turbinas do tipo Francis (ANDRIOLO et al, 2013).

3.2 REDE GEODÉSICA DE MONITORAMENTO

O presente estudo está apoiado na rede geodésica de monitoramento implantada nas proximidades da Barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá, mencionada por Siguel (2013). A referida rede tem o objetivo de subsidiar levantamentos no entorno da barragem e até o presente momento é composta por dois pilares com centragem forçada a montante da barragem (PG01 e PG02, na margem direita e esquerda respectivamente), outro dispositivo de centragem forçada engastado na crista (CG01, de forma a permitir uma conexão montante/jusante) e um terceiro pilar também com dispositivo de centragem forçada (PG03) a jusante. A partir deste pilar, dentre outras coisas, são tomadas as observações de direção que permitem o cálculo das coordenadas de pontos de monitoramento instalados na face de jusante da barragem. A geometria desta rede é ilustrada conforme a FIGURA 7.

FIGURA 7 - FIGURA DA GEOMETRIA DA REDE DE MONITORAMENTO DA UHE MAUÁ.



Fonte: O Autor (2013).

Para que seja possível o uso desta rede de monitoramento, é necessário que a mesma seja considerada estável. Em trabalho apresentado por Suci e Faggion (2012), buscou-se analisar a estabilidade da rede geodésica de monitoramento da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias (descrita em detalhes por Graneman, 2005) através da coleta de dados GPS. Foi constatado através de testes estatísticos que a rede estudada apresentou-se estável e que em uma das épocas poderia estar contaminada com erros sistemáticos, já que erros grosseiros não foram detectados.

No trabalho aqui apresentado, a verificação da estabilidade da rede geodésica que subsidia as campanhas de monitoramento é conduzida de forma paralela pelo mesmo grupo de pesquisa.

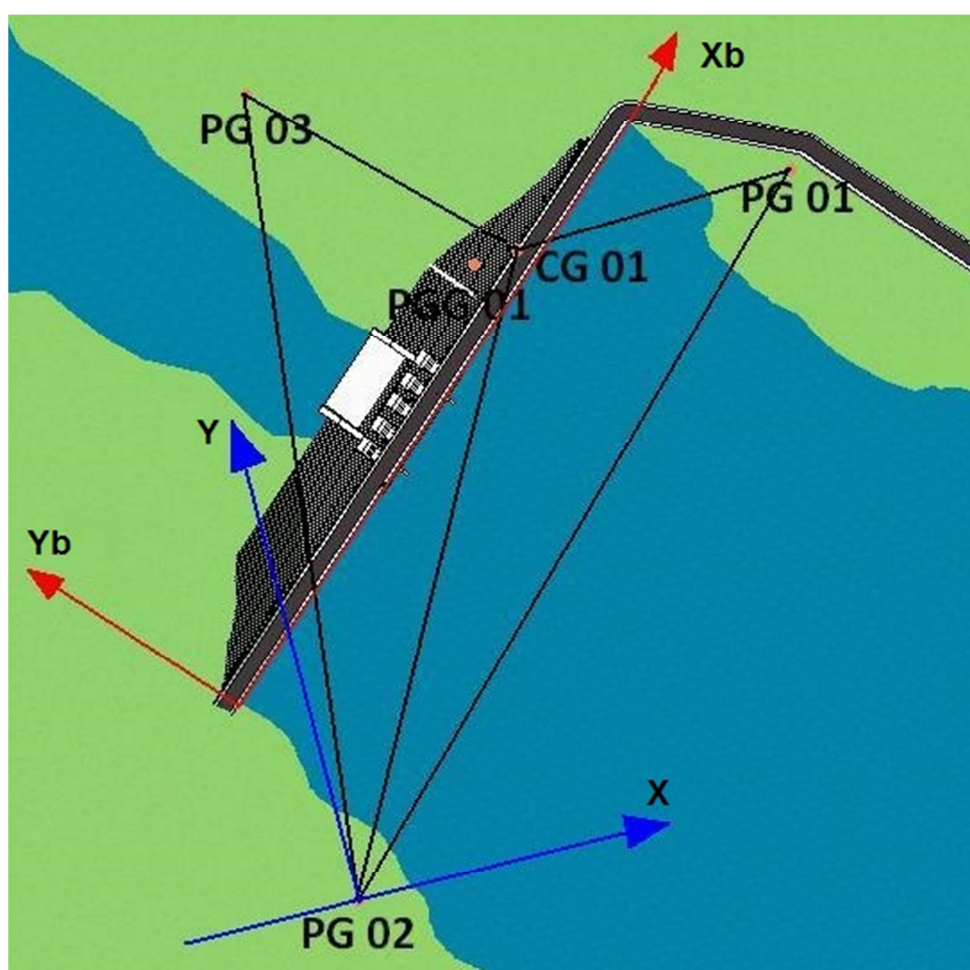
3.3 SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL

As coordenadas dos pontos de monitoramento tratadas neste estudo são representadas em um sistema de referência definido de forma que pudesse facilitar o entendimento e interpretação visual dos resultados dos levantamentos internos e externos à barragem, por parte dos profissionais que lá atuam. Para tanto, definiu-se um referencial cartesiano local onde o eixo "x" (X_b) estivesse no sentido longitudinal da estrutura da barragem, com

orientação positiva na direção da margem direita, o eixo "y" (Y_b) perpendicular a este e orientação positiva no sentido do fluxo do rio (jusante) enquanto que o eixo "z" (Z_b) completa o terno do sistema, positivo na direção do zenite.

Para que seja possível determinar as coordenadas dos pontos de monitoramento no sistema de referência a ser criado, é preciso primeiramente estabelecer um Sistema Geodésico Cartesiano Local - SGCL (Andrade,2003) cuja origem será arbitrada no pilar PG02 (FIGURA 8).

FIGURA 8 – SISTEMAS DE EIXOS DOS REFERENCIAIS ENVOLVIDOS E VISTA EM PLANTA DA REDE GEODÉSICA DE MONITORAMENTO.



Fonte: O Autor (2013).

Para tanto, é necessário inicialmente transformar as coordenadas geodésicas dos pontos da rede de monitoramento e de outros dois pontos

sobre a crista da barragem, os quais definem a orientação e posição do eixo X_b , para o Sistema Geodésico Cartesiano (SGC), através da equação:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + h)\cos(\varphi)\cos(\lambda) \\ (N + h)\cos(\varphi)\text{sen}(\lambda) \\ (N(1 - e^2) + h)\text{sen}(\varphi) \end{bmatrix} \quad (02)$$

Onde:

- X, Y, Z são as coordenadas Geodésicas Cartesianas
- φ, λ, h são latitude, longitude e altitude Geodésicas

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \text{sen}^2(\varphi))^{1/2}} \quad (03)$$

- a : Semi eixo maior do elipsóide de referência
- $e^2 = 2f - f^2$ primeira excentricidade ao quadrado
- $f = \frac{a-b}{a}$ achatamento do elipsóide
- b : Semi eixo menor do elipsóide

A transformação de coordenadas no SGC para um Sistema Geodésico Cartesiano Local (SGCL) de origem topocêntrica, exige a aplicação de rotações nos três eixos e uma translação. Por convenção, adota-se como positiva a rotação aplicada no sentido anti-horário. Lugnani (1987), aborda que as transformações podem ser entendidas como ativas (aquela onde o espaço é transformado) ou passivas (onde o espaço é estacionário e o sistema de referência varia). Desta forma, pode-se representar as rotações passivas em cada eixo pelas matrizes a seguir:

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \text{sen}(\alpha) \\ 0 & -\text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (04)$$

$$R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & -\text{sen}(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen}(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (05)$$

$$R_z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \text{sen}(\alpha) & 0 \\ -\text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (06)$$

A obtenção das coordenadas no SGCL se dá então aplicando-se o seguinte modelo:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R_x(90^\circ - \varphi_0)R_z(90^\circ - \lambda_0) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (07)$$

ou

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \text{sen}(\varphi_0) & \cos(\varphi_0) \\ 0 & -\cos(\varphi_0) & \text{sen}(\varphi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\text{sen}(\lambda_0) & \cos(\lambda_0) & 0 \\ -\cos(\lambda_0) & -\text{sen}(\lambda_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (08)$$

Onde:

x, y, z - coordenadas no SGCL

φ_0, λ_0 - latitude e longitude geodésica do ponto origem do sistema

X, Y, Z - coordenadas geodésicas cartesianas do ponto a ser transformado

X_0, Y_0, Z_0 - coordenadas geodésicas cartesianas do ponto origem

Finalmente para transformar estas coordenadas para o sistema local definido, Sistema da Barragem (SB), aplica-se uma translação e uma rotação ativa no eixo z com amplitude θ , conforme o modelo a seguir:

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = R^{-1} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{bmatrix} \quad (09)$$

Sendo:

x_b, y_b, z_b - coordenadas cartesianas no sistema da barragem

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

e

$$\theta = \frac{y - y_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} \quad (11)$$

Onde:

x_b, y_b, z_b - coordenadas no sistema da barragem

θ - ângulo de rotação entre os sistemas

x_0, y_0, z_0 - coordenadas do ponto origem no SGCL

x, y, z - coordenadas no SGCL do ponto a ser transformado

Desta forma, as coordenadas dos pilares que compõe a rede geodésica de monitoramento, passam a ser conhecidas com respeito ao novo referencial estabelecido, permitindo assim que quaisquer pontos levantados a partir destes também possuam a mesma característica.

Outro aspecto importante deste novo referencial de cunho local é o fato do mesmo estar diretamente vinculado a um referencial geodésico e externo.

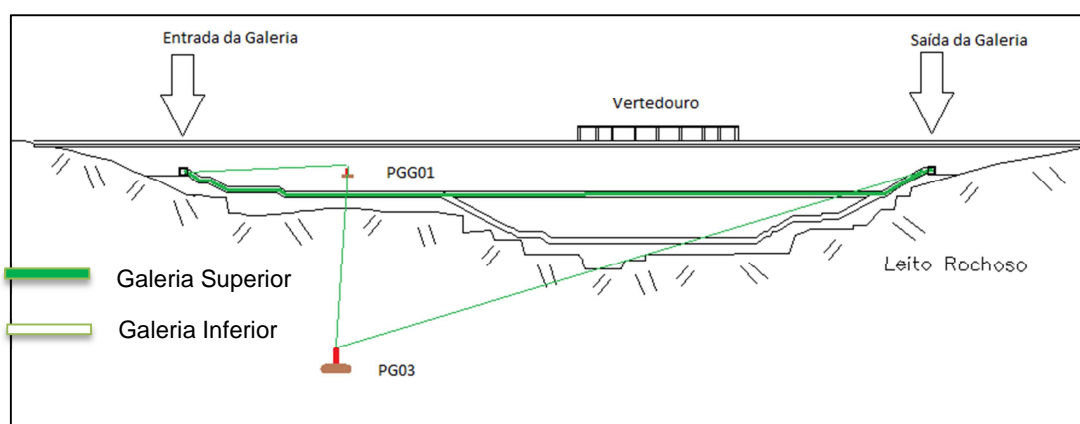
3.4 POLIGONAÇÃO

A poligonal implantada, é usada para densificar as estações que servirão de apoio para o levantamento de pontos de monitoramento, instalados junto aos MTJ, através da técnica de irradiação.

Como já mencionado, Zocolotti (2005) conduziu uma investigação para determinar coordenadas planas de pontos de monitoramento instalados dentro da galeria de inspeção da barragem da usina hidrelétrica de Salto Caxias. O presente trabalho leva em conta a componente vertical (coordenada “z”) dos pontos de monitoramento, mostrando o comportamento destes pontos ao longo do tempo em face aos resultados obtidos através de dados oriundos de MTJ. Para isso, fez-se uma revisão dos materiais e dispositivos desenvolvidos por Zocolotti bem como de suas considerações acerca da análise de resultados.

A referida poligonal possui um trecho externo e outro interno à galeria de inspeção (FIGURA 9), sendo que o trecho externo está apoiado em um dos pilares de centragem forçada (PG03, a jusante) que compõe a rede geodésica de apoio. Para conectar o trecho interno da poligonal com o pilar PG03, um outro pilar (denominado Pilar Geodésico da Galeria -PGG01) foi construído de forma que pudesse ser um vértice permanente próximo a entrada da galeria na margem direita. A FIGURA 10 detalha o processo de construção e acabamento do PGG01, localizado no mesmo nível da entrada da galeria na margem direita.

FIGURA 9 -DETALHE DA PARTE INTERNA E EXTERNA DA POLIGONAL



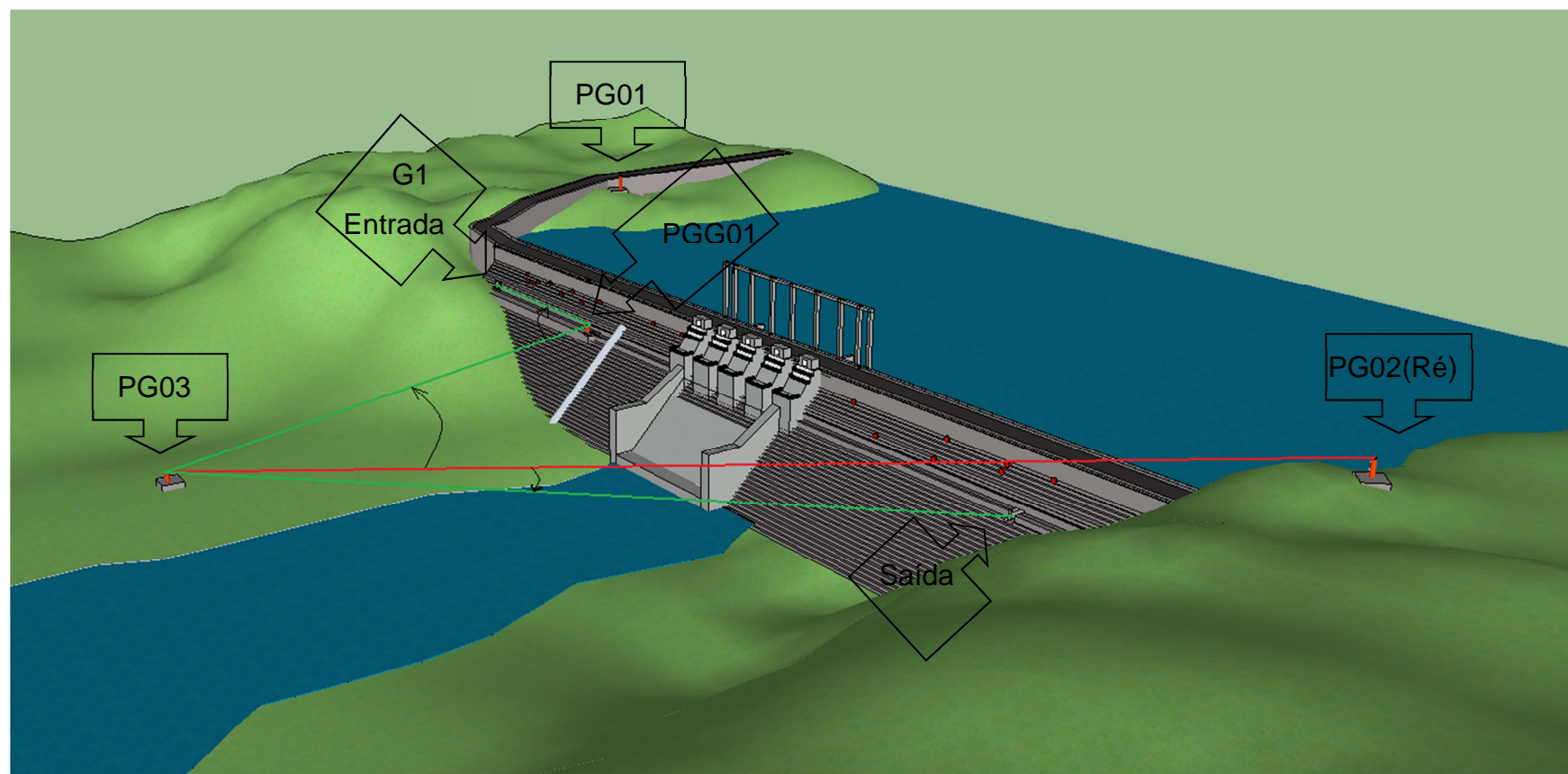
Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 10 - DETALHE DA CONSTRUÇÃO DO PILAR (PGG01) A JUSANTE DA BARRAGEM.



Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 11 - GEOMETRIA DA PARTE EXTERNA DA POLIGONAL.



Fonte: O Autor (2013).

A FIGURA 11 mostra em perspectiva a posição dos pilares que compõe a rede geodésica de monitoramento (o pilar PG03, é um dos vértices da poligonal), a geometria da parte externa da poligonal e em vermelho a orientação da poligonal com respeito ao pilar PG02.

A FIGURA 12 ilustra a estação G1 localizada na entrada da galeria de inspeção (imagem central); em visada de Ré para o ponto PGG01 (imagem da esquerda); e o alvo de vante instalado dentro da galeria (imagem da direita).

FIGURA 12 - ESTAÇÃO GEODÉSICA NA ENTRADA DA GALERIA NA MARGEM DIREITA E ESTAÇÃO DE VANTE.



Fonte: Acervo de projeto¹.

Ao longo da galeria foram implantados anteparos que permitissem a fixação dos dispositivos de centragem forçada (FIGURA 12, imagem da direita) e que materializam as estações da poligonal. Tais estações foram implantadas de modo a permitir visadas de irradiação para os pontos de monitoramento instalados junto ao instrumental que auxilia no monitoramento de blocos (medidores triortogonais de junta), nas laterais da galeria (FIGURA 13, imagem da direita).

FIGURA 13 - FIXAÇÃO DOS PONTOS DE MONITORAMENTO JUNTO AO INSTRUMENTAL GEOTÉCNICO.



Fonte: Acervo de projeto.

¹ Levantamento Geológico – Estrutural da região e entorno da barragem da UHE MAUÁ, uma abordagem inovadora para monitoramento geodésico nos pontos de risco. BANPESQ-2011025810

3.4.1 Correções ambientais

A fim de efetuar correções, no que diz respeito às influências das condições atmosféricas nas observações de distância, montou-se um “conjunto” com instrumentos capazes de mensurar estes parâmetros (Termo Higrômetro, Barômetro aneroide e psicrômetros). Este conjunto acompanha todo o caminhamento da poligonal (FIGURA 14).

FIGURA 14 - CONJUNTO CONTENDO OS SENSORES AMBIENTAIS USADOS NOS TRABALHOS.



Fonte: Acervo de projeto.

Posteriormente este conjunto de equipamentos foi substituído por um datalogger capaz de mensurar estas mesmas grandezas (FIGURA 15).

FIGURA 15 – DATALOGGER FIXADO NA PARTE SUPERIOR DA ESTAÇÃO TOTAL TS15



Fonte: O Autor (2013).

Este equipamento permite a configuração da taxa de registro de dados (temperatura, pressão e umidade relativa do ar) em um intervalo de tempo definido pelo usuário. Para auferir maior grau de confiabilidade nos dados registrados, fez-se em laboratório uma calibração do equipamento, verificando a necessidade de adição de uma constante de calibração nos valores por ele registrados. Com relação a temperatura, constatou-se que os valores apresentados pelo datalogger e pelo termômetro não apresentaram variações já a medida de pressão foi necessário aplicar uma correção de 88.08 unidades (hPa).

3.4.2 Cálculos

Ao término de cada campanha de coleta, os dados dos levantamentos da poligonal foram descarregados e previamente checados para averiguar eventuais erros de gravação. Em uma planilha desenvolvida em ambiente Microsoft EXCEL, calculou-se os valores de cada série de direção observada, corrigindo-se as distâncias inclinadas em função dos efeitos da temperatura, pressão e umidade relativa do ar. Calculou-se então valores médios e respectivos desvios-padrão dos ângulos entre as direções horizontais bem como os valores médios e desvios-padrão para as distâncias inclinadas e ângulos zenitais de cada direção observada. Convém mencionar que tais precisões serão propagadas em todos os cálculos subsequentes.

Para determinação das coordenadas dos pontos instalados junto aos MTJ aqui denominados de Marco Geodésico Interno (MGI), primeiramente necessita-se calcular as coordenadas do vértice da poligonal, a partir do qual foram tomadas as observações de direção para os MGI. Sendo assim, o processo de obtenção das coordenadas dos vértices da poligonal, foi dividida em Planimetria e Altimetria.

3.4.2.1 Planimetria

Os cálculos pertinentes a planimetria, por sua vez foram sub-divididos em duas etapas, sendo a primeira para determinação de valores aproximados

das coordenadas dos vértices da poligonal e a segunda para o ajustamento das mesmas pelo MMQ através do modelo de variação de coordenadas.

a) Etapa 1- Cálculo da poligonal:

O procedimento de cálculo da poligonal será omitido por questões de simplificação, já que é amplamente difundido e pode ser facilmente encontrado em literatura sobre o assunto, por exemplo KAHMEN & FAIG (1988).

Nesta etapa, foi implementada uma rotina em ambiente MATLAB a qual teve como dados de entrada os ângulos horizontais calculados a partir das direções horizontais observadas e as distâncias horizontalizadas. A horizontalização das distâncias se deu em função do ângulo zenital observado e distância inclinada observada corrigida da influência dos parâmetros ambientais.

A partir deste dados foram calculadas as coordenadas usadas como valores de aproximação para a etapa do ajustamento.

b) Etapa 2- Ajustamento:

A fim de realizar o ajustamento das coordenadas dos vértices da poligonal optou-se por utilizar o software educacional de ajustamento WOLF PAC² v.7.1.2 – 2013.

Este software apresenta diversos recursos para cálculos nas áreas de Geodésia e Fotogrametria. Dentre eles, cita-se o ajustamento de redes horizontais pelo Método dos Mínimos Quadrados. O modelo matemático utilizado pelo software mencionado é o de variação de coordenadas o qual segundo Gemael (2004) “*exprime a variação do azimute ou do comprimento de um lado quando variam as coordenadas dos seus extremos*”. As equações de distâncias, azimutes e ângulos bem como suas deduções podem ser encontradas em Gemael (2004), Wolf e Ghilani (2007).

² <http://www.personal.psu.edu/cdg3/free.htm>

Wolf e Ghilani (2007), recomenda que após o ajustamento seja realizada uma análise da presença de eventuais erros grosseiros nas observações.

Para tanto, faz-se uma avaliação dos resíduos padronizados fornecidos no arquivo de saída.

É então calculado o valor da estatística t para cada observação, submetendo-o a um critério de rejeição tabelado com um nível de significância α e $(r-1)$ graus de liberdade (sendo “ r ” o numero de observações), conforme:

$$t = \frac{\bar{v}}{\hat{\sigma}^2} \quad (12)$$

$$t > \hat{\sigma}^2 t_{tab}$$

Onde : \bar{v} - é o resíduo padronizado, fornecido.

$\hat{\sigma}^2$ - variância a posteriori do ajustamento, fornecida

t - valor da estatística calculada

t_{tab} – valor de t tabelado para o nível de significância desejado

Sendo assim, rejeitam-se todas as observações correspondentes aos valores que forem maiores que $\hat{\sigma}^2 t_{tab}$ e um novo ajustamento é realizado. Esta análise é repetida eliminando-se uma observação por vez, reaplicando o ajustamento até que todas as observações sejam aprovadas no teste.

O procedimento sugerido é uma forma eficiente de detecção de erros no ajustamento de redes onde geralmente há super abundância de observações de direções a partir dos pontos (estações) que a compõe. Tal procedimento é útil como um indicativo de eventuais problemas nas observações coletados a partir da estação que apresentar discrepâncias, cabendo uma análise mais minuciosa dos mesmos ou ate mesmo uma nova coleta de dados a partir do estação em questão (Wolf e Ghilani, 2007).

Ao término do ajustamento planimétrico, tem-se como resultado as coordenadas planas ajustadas e o respectivo desvio padrão.

3.4.2.2 Altimetria

Os cálculos altimétricos foram conduzidos de forma independente da planimetria onde a partir dos valores médios dos ângulos zenitais, distâncias inclinadas e respectivos desvios-padrão nas posições de ré e vante, é possível ajustar os desníveis entre os vértices da poligonal.

A determinação dos desníveis é feita de forma indireta através da seguinte equação:

$$\Delta h_{AB} = hi - hs + di \cos(z) \quad (13)$$

Onde :

Δh_{AB} - Desnível do ponto "A" para o ponto "B"

di – distância inclinada

z – ângulo zenital

hi – altura do instrumento em "A"

hs – altura do sinal "B"

Em uma poligonal fechada, o número de desníveis será igual ao número de vértices. Porém, ao longo do caminhamento existem observações para as direções de ré e de vante. Portanto, para cada estação ocupada haverá condição de determinação do desnível para a direção de ré e de vante.

Conhecendo-se a altitude das estações, o desnível da estação "ré" em relação à estação "vante" é dado pela diferença de altitude:

$$\Delta h_{R_V} = H_V - H_R \quad (14)$$

Então, assume-se que:

$$\Delta h_{R_V} = (hi - hs_V + (di_V \cos(z_V))) - (hi - hs_R + (di_R \cos(z_R))) \quad (15)$$

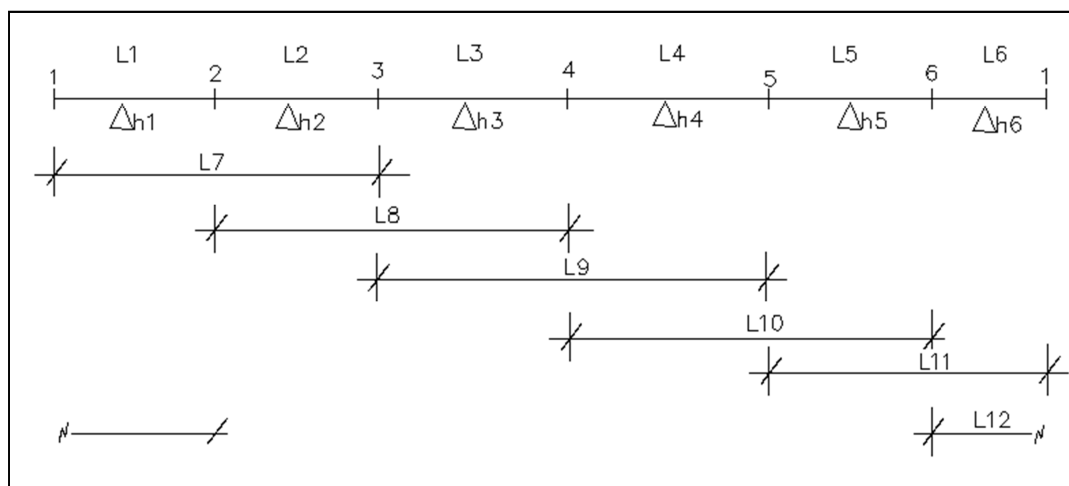
Uma vez que, a altura do instrumento é a mesma para ambas as direções, podemos excluí-la da equação:

$$\Delta h_{R_V} = (di_V \cos(z_V) - hs_V) - (di_R \cos(z_R) - hs_R) \quad (16)$$

Da equação anterior, tem-se que o desnível passa a ser função das observações de distância inclinada, ângulo zenital e altura do sinal. Percebe-se que se as alturas dos sinais em “ré” e “vante” forem as mesmas a contribuição desta variável na equação será anulada.

Para o caso em estudo, a FIGURA 16³ a seguir ilustra as condições de emprego das equações (13 e 16) , para uma poligonal de 6 pontos.

FIGURA 16 - ESQUEMA DE UMA POLIGONAL DE SEIS PONTOS USADO PARA DEDUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DO AJUSTAMENTO DOS DESNÍVEIS.



Fonte: O Autor (2013).

A equação 13 contempla a situação onde ocupa-se o vértice 1 da poligonal e visando um alvo no vértice 2 (direção de vante) toma-se leituras de ângulo vertical e de distância inclinada que permitem a determinação de Δh_1 (trecho L1). De forma sucessiva, são ocupados todos os vértices até obter-se leituras a partir do último (vértice 6) em direção ao primeiro (vértice 1), fechando um circuito. Desta forma podem ser obtidos os desníveis Δh_2 à Δh_6 da figura 16 (trechos L2 à L6).

³ Nesta figura, a letra “L” é usada apenas como convenção para indicar trechos onde houveram leituras.

Entretanto, o levantamento de uma poligonal requer observações não apenas das direções de vante mas também de direções de ré. Portanto, ao ocupar o vértice 1 da poligonal são tomadas leituras na direção do vértice 6 (ré) e também na direção do vértice 2 (vante). Neste caso emprega-se a equação 16 que permite determinar o desnível entre os vértices 6 e 2 (trecho L12). Ao ocupar o vértice 2 tem-se observações na direção do vértice 1 (ré) e do vértice 3 (vante) sendo possível determinar o desnível entre os vértices 1 e 3 (trecho L7).sendo assim, ao longo do caminhamento, obtém-se valores de desníveis para os trechos L8 à L11.

Em outras palavras, tendo-se percorrido sequencialmente os vértices da poligonal do exemplo, pode-se considerar a possibilidade da determinação dos desníveis entre os vértices (Δh_1 à Δh_6 , trechos L1 à L6) empregando num primeiro momento as leituras de vante e num segundo momento os desníveis compreendidos pelos trechos L7 à L12, utilizando as leituras de ré e vante para o trecho.

Pode-se então ajustar estes 6 desníveis na forma paramétrica $L_a = F(X_a)$ tendo as equações do modelo matemático funcional escritas da seguinte maneira:

$$\begin{array}{ll}
 F_1: \Delta h_1 = l_1 + v_1 & F_7: \Delta h_1 + \Delta h_2 = l_7 + v_7 \\
 F_2: \Delta h_2 = l_2 + v_2 & F_8: \Delta h_2 + \Delta h_3 = l_8 + v_8 \\
 F_3: \Delta h_3 = l_3 + v_3 & F_9: \Delta h_3 + \Delta h_4 = l_9 + v_9 \\
 F_4: \Delta h_4 = l_4 + v_4 & F_{10}: \Delta h_4 + \Delta h_5 = l_{10} + v_{10} \\
 F_5: \Delta h_5 = l_5 + v_5 & F_{11}: \Delta h_5 + \Delta h_6 = l_{11} + v_{11} \\
 F_6: \Delta h_6 = l_6 + v_6 & F_{12}: \Delta h_6 + \Delta h_1 = l_{12} + v_{12}
 \end{array} \tag{17}$$

O caso em questão oferece super abundancia de observações (trechos “l”) em relação ao número de incógnitas ou parâmetros (Δh). Isso permite o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) o qual deve atender a seguinte condição:

$$\sum_{i=1}^n v^2 = \text{mínimo} \tag{18}$$

A solução do modelo paramétrico de ajustamento, é dada pelas equações normais:

$$X_a = (A^T P A)^{-1} A^T P L_b \quad (19)$$

ou

$$X_a = N^{-1} U \quad (20)$$

Onde :

A - Matriz das derivadas parciais do modelo funcional em relação aos parâmetros

L_b - Matriz das observações (desníveis obtidos através das equações 13 e 16

P - Matriz dos pesos dada por $P = 1/\sigma^2 L_b$

Assumindo que as variáveis envolvidas são não correlacionadas, o peso adotado no ajustamento pode ser obtido através da aplicação da Lei de Propagação das Covariâncias, aplicada na forma clássica (equação 21) às equações 13 e 16⁴ respectivamente (equações 22 e 23):

$$\sigma^2_y = \left(\frac{\partial f_y}{\partial x_1}\right)^2 \sigma^2_{x_1} + \left(\frac{\partial f_y}{\partial x_2}\right)^2 \sigma^2_{x_2} + \dots + \left(\frac{\partial f_y}{\partial x_n}\right)^2 \sigma^2_{x_n} \quad (21)$$

Onde :

σ^2 - Variância.

f_y - Função y qualquer

x_1, x_2, x_n - Parâmetros envolvidos

$$\sigma^2_{\Delta h_{AB}} = \left(\frac{\partial f_{\Delta h_{AB}}}{\partial di}\right)^2 \sigma^2_{di} + \left(\frac{\partial f_{\Delta h_{AB}}}{\partial z}\right)^2 \sigma^2_z \quad (22)$$

⁴ Na aplicação de (21) nas equações 13 e 16, as derivadas de constantes são omitidas por serem nulas.

$$\sigma^2_{\Delta h_{R,V}} = \left(\frac{\partial f_{\Delta h_{R,V}}}{\partial di_R}\right)^2 \sigma^2_{di_R} + \left(\frac{\partial f_{\Delta h_{R,V}}}{\partial z_R}\right)^2 \sigma^2_{z_R} + \left(\frac{\partial f_{\Delta h_{R,V}}}{\partial di_V}\right)^2 \sigma^2_{di_V} + \left(\frac{\partial f_{\Delta h_{R,V}}}{\partial z_V}\right)^2 \sigma^2_{z_V} \quad (23)$$

Tradicionalmente, o erro de fechamento em um circuito de nivelamento é obtido através do somatório dos desníveis. De forma análoga, uma poligonal fechada pode também ser entendida como um circuito fechado de nivelamento, permitindo assim a adoção de uma injunção⁵ no ajustamento:

$$G(X_a) = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n = 0 \quad (24)$$

A adoção desta injunção no ajustamento terá como significado prático o efeito de que após obtidos os desníveis ajustados (parâmetros) a condição imposta pela injunção estará satisfeita ou seja, a magnitude do erro de fechamento será distribuída e o erro de fechamento será igual a zero.

Para isso, deve-se calcular novas equações normais para o modelo funcional da injunção e somá-las as equações normais do ajustamento:

$$X_a = (N + N_c)^{-1}(U + U_c) \quad (25)$$

Onde :

$$N_c = C^T P_c C \quad (26)$$

$$U_c = C^T P_c E \quad (27)$$

Sendo:

E - Vetor erro de fechamento do funcional da injunção

C - Derivadas parciais de G em relação aos parâmetros ajustados

P_c - Peso da injunção, geralmente um escalar de magnitude maior que as grandezas mensuradas

⁵ Maiores informações sobre os diversos tipos de injunção o leitor interessado poderá consultar Gemael (2004).

A determinação das altitudes dos vértices da poligonal se dá somando sucessivamente os desníveis ajustados a uma altitude inicial. As precisões das altitudes são obtidas através da aplicação da Lei de Propagação das Covariâncias conforme:

$$H_B = H_A + \Delta h_{AB} \quad (28)$$

$$\sigma^2_{H_B} = \left(\frac{\partial H_B}{\partial H_A}\right)^2 \sigma^2_{H_A} + \left(\frac{\partial H_B}{\partial \Delta h_{AB}}\right)^2 \sigma^2_{\Delta h_{AB}} \quad (29)$$

Uma vez determinadas as coordenadas tridimensionais dos vértices da poligonal e suas precisões é possível determinar as coordenadas e precisões das irradiações através das equações:

$$X_{IR} = X_A + (di_{AIR} \text{sen}(Z)) \text{sen}(AZ_{AIR}) \quad (30)$$

$$Y_{IR} = Y_A + (di_{AIR} \text{sen}(Z)) \text{cos}(AZ_{AIR}) \quad (31)$$

$$Z_{IR} = Z_A + hi - hs + (di_{AIR} \text{cos}(Z)) \quad (32)$$

As equações acima (30, 31 e 32) possuem como variáveis de entrada as coordenadas do ponto estacionado (X_A, Y_A, Z_A) , observações de distância inclinada e ângulo vertical para as direções de irradiação (di_{AIR}, Z) e o azimute da direção de irradiação (AZ_{AIR}) . Os azimutes das direções das irradiações, são obtidos a partir do azimute da direção do lado da poligonal e dos ângulos entre as direções de ré e das direções das irradiações. Os azimutes das direções da poligonal e respectivas precisões por sua vez, são calculados a partir das coordenadas ajustadas e precisões.

As precisões das coordenadas das irradiações podem ser obtidas através da aplicação da lei de propagação das covariâncias nas equações acima uma vez que são conhecidas as variâncias de todas as variáveis envolvidas.

3.5 ANÁLISE DOS DESLOCAMENTOS

A análise de eventuais variações das coordenadas dos pontos monitorados pode ser feita sob duas perspectivas, uma absoluta e outra relativa. Em um contexto “absoluto”, a verificação de eventuais deslocamentos dos pontos de monitoramento se dá através da comparação direta entre as coordenadas em épocas consecutivas. Ou seja, em linhas gerais é possível verificar a variação posicional de um ponto P_n pela diferença de coordenadas em duas épocas (t) e (t+1):

$$\Delta_{P_n} = P_n(x, y, z)_{t+1} - P_n(x, y, z)_t \quad (33)$$

Onde:

Δ_{P_n} - variação das coordenadas do ponto entre duas épocas;

$P_n(x, y, z)_t$ - Coordenadas do ponto em uma época (t);

$P_n(x, y, z)_{t+1}$ - Coordenadas do ponto em uma época (t+1);

O caráter absoluto de avaliação do comportamento dos pontos, pode ser entendido considerando a característica do sistema de referência adotado ou seja, vinculado diretamente a um referencial externo a área de estudo. Todavia, o presente trabalho está focado apenas na perspectiva de análise relativa, pois esta é parte integrante do objeto tema da pesquisa.

Os pontos em estudo estão estrategicamente instalados junto aos MTJ da barragem e através de leituras periódicas nestes instrumentos (e em outros), que os técnicos responsáveis fazem uma avaliação tridimensional do comportamento da barragem. No contexto “relativo” de análise (segundo o princípio de funcionamento dos MTJ), optou-se por uma abordagem vetorial de análise para avaliar eventuais oscilações no comportamento posicional dos pontos de monitoramento, alocados em blocos contíguos.

Faggion et al. (2013), apresentaram um estudo comparativo conduzido em laboratório, sobre a determinação de distâncias relativas empregando Interferometria laser e estações totais. Através das observações de direções horizontais, ângulos verticais, distâncias inclinadas e aplicação da lei dos cossenos, determinou-se de forma indireta a distância entre dois pontos e posteriormente fez-se uma comparação com as distâncias obtidas por

interferometria. No estudo, concluiu-se que para as condições do experimento, as diferenças encontradas entre os valores das distâncias determinadas de forma indireta com respeito aos obtidos por interferometria, ficaram abaixo do milímetro.

No presente estudo, o emprego desta solução possibilita apenas a determinação da magnitude da distância horizontal entre dois pontos em blocos contíguos. Todavia não se pode afirmar quanto à atitude destes pontos ao longo de campanhas de monitoramento já que não é possível dizer qual dos blocos causou a variação relativa entre eles e é de interesse neste trabalho o conhecimento de deslocamentos tridimensionais ou seja, em verdadeira grandeza. Sendo assim, o caráter relativo da análise é verificado no item que segue.

3.5.1 Abordagem Vetorial.

Da teoria da geometria analítica (Venturi, 1949), é possível tratar a diferença de coordenadas entre dois pontos (A e B) no espaço como um vetor:

$$\overrightarrow{AB} = B - A \quad (34)$$

$$\overrightarrow{AB} = \underbrace{(x_B - x_A)}_{\Delta x} \vec{i} + \underbrace{(y_B - y_A)}_{\Delta y} \vec{j} + \underbrace{(z_B - z_A)}_{\Delta z} \vec{k} \quad (35)$$

Onde:

\overrightarrow{AB} - representa o vetor com origem no ponto A na direção de B;

(x_A, y_A, z_A) - Coordenadas do ponto A;

(x_B, y_B, z_B) - Coordenadas do ponto B;

$(\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z)$ - Diferença de coordenadas entre os pontos A e B;

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - versores dos eixos cartesianos ortogonais x,y,z;

A distância espacial \overline{AB} é dada por:

$$|\overrightarrow{AB}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (36)$$

Onde:

$|\overrightarrow{AB}|$ - Módulo do vetor \overrightarrow{AB} ;

O conhecimento das componentes $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ ($\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$) de um vetor qualquer, permite estabelecer um vetor unitário \vec{v} (módulo igual a um), também chamado de versor, mas que possui a mesma direção e mesmo sentido do vetor \overrightarrow{AB} :

$$\vec{v} = \frac{\overrightarrow{AB}}{|\overrightarrow{AB}|} \quad (37)$$

As componentes “i”, “j” e “k” do versor \vec{v} , são interpretadas como as projeções deste sobre os eixos cartesianos x, y, z e uma vez conhecidas, permitem o cálculo dos chamados co-senos diretores. Estes por sua vez, representam os ângulos que \vec{v} forma com respeito a cada eixo do terno cartesiano. As equações (38), (39) e (40) mostram como se obtém os co-senos diretores “ α ” (com o eixo \vec{i}), “ β ” (com o eixo \vec{j}) e “ γ ” (com o eixo \vec{k}) de um versor:

$$\cos \alpha = \frac{\vec{i}_{\overrightarrow{AB}}}{|\overrightarrow{AB}|} \quad (38)$$

$$\cos \beta = \frac{\vec{j}_{\overrightarrow{AB}}}{|\overrightarrow{AB}|} \quad (39)$$

$$\cos \gamma = \frac{\vec{k}_{\overrightarrow{AB}}}{|\overrightarrow{AB}|} \quad (40)$$

Nesta abordagem relativa, a cada campanha de coleta de dados podem ser calculados os vetores distância (espacial) entre os pontos e em campanhas

consecutivas pode-se avaliar eventuais variações de magnitude nas componentes $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$, bem como nos ângulos diretores. Esta abordagem permite uma análise comparativa entre épocas, da variação das componentes do vetor e a respectiva orientação em relação aos eixos. Os deslocamentos relativos (D_{Rn}) existentes em um local “n” ficam então caracterizados por eventuais variações das componentes vetoriais obtidas por técnica geodésica ($\Delta_x \vec{i}, \Delta_y \vec{j}, \Delta_z \vec{k}$) e pelas variações das leituras tomadas nos MTJ (L_x, L_y, L_z) conforme:

$$D_{Rn(G)} = Rn(\Delta_x \vec{i}, \Delta_y \vec{j}, \Delta_z \vec{k})_{t+1} - Rn(\Delta_x \vec{i}, \Delta_y \vec{j}, \Delta_z \vec{k})_t \quad (41)$$

$$D_{Rn(MTJ)} = Rn(L_x, L_y, L_z)_{t+1} - Rn(L_x, L_y, L_z)_t \quad (42)$$

3.6 VALIDAÇÃO DOS DESLOCAMENTOS

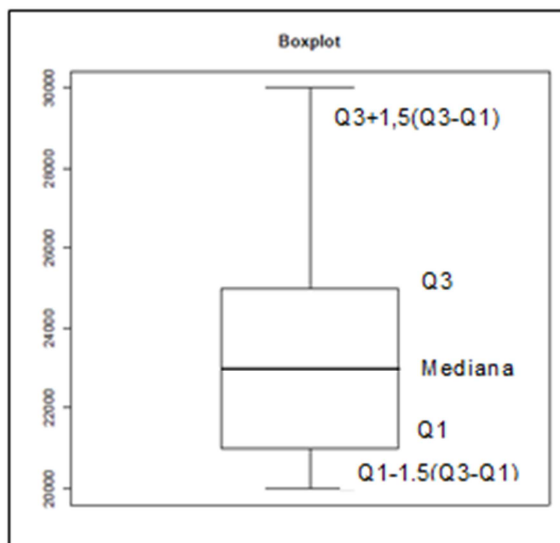
A validação dos deslocamentos obtidos por técnica geodésica $D_{Rn(G)}$ frente aos deslocamentos derivados das leituras nos MTJ ($D_{Rn(MTJ)}$) pressupõe a equivalência dos valores obtidos por ambas. O teste de Fisher é tradicionalmente empregado para avaliar a igualdade das variâncias entre amostras a um nível de significância α . No entanto, este teste assume a existência de graus de liberdade no numerador e no denominador para o cálculo de um valor teórico, o qual será confrontado com um valor tabelado para os graus de liberdade em questão. Esta condição de existência de graus de liberdade não é satisfeita no presente trabalho pois para cada época a ser confrontada (validada) e para o mesmo ponto sendo avaliado, há apenas um único valor de deslocamento para cada método (Topografia x MTJ), implicando portanto em graus de liberdade iguais a zero.

Uma análise visual dos dados pode ser feita através do uso do conceito conhecido como “BoxPlot” ou diagrama de caixa, comum em análise exploratória de dados e estatística descritiva. Neste tipo de gráfico, os dados são descritos através dos elementos: mediana, primeiro quartil (ou quartil inferior - Q1), terceiro quartil (ou quartil superior - Q3), valor máximo e valor

mínimo. De acordo com ARAUJO e ABAR (2012) o primeiro quartil, a mediana e o terceiro quartil são três valores que dividem os dados ordenados em quatro grupos com aproximadamente 25% dos valores em cada grupo. Afirmam ainda que na estatística descritiva ou na análise exploratória e comparação de dados, o boxplot é um gráfico configurado para poder identificar os outliers (valores discrepantes), no sentido de estarem muito afastados da maioria dos dados. Este gráfico pode ser modificado de forma que os valores mínimos e máximos sejam substituídos pelos valores abaixo do primeiro quartil por uma quantidade que pode ser maior do que o mínimo $[Q1-1,5(Q3-Q1)]$ e uma quantidade que pode ser menor que máximo $[Q3+1,5(Q3-Q1)]$, respectivamente. Por exemplo, a identificação dos valores outliers é importante no cálculo da média aritmética que tem como característica a influência dos valores extremos.

Massart et al. (2005) , reafirmam que para a comparação de duas ou mais séries de resultados, são empregados métodos estatísticos clássicos tais como o teste t para comparação de médias, F-teste para comparação de variâncias de duas séries de dados e análise de variância (ANOVA) mas que estes métodos são vulneráveis à presença de outliers. A representação de vários diagramas (várias amostras) justapostos em uma mesma figura é uma excelente maneira de investigar se há diferenças entre os conjuntos de dados pode ser aplicado sem que nenhuma suposição estatística seja presumida, por exemplo uma distribuição normal dos dados. Neste sentido, a FIGURA 17 a seguir, ilustra o exemplo de um boxplot para uma única amostra de dados, onde a escala numérica apresentada indica a ordem de grandeza dos dados analisados.

FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO DE UM BOXPLOT



Fonte: O Autor (2013).

4 RESULTADOS

Neste item serão apresentados os resultados obtidos no processamento dos dados e uma análise comparativa de resultados em face aos MTJ.

Primeiramente foram determinadas as coordenadas dos pilares da rede geodésica de referência no sistema local proposto (Sistema da Barragem) e assumindo a referida rede como estável, adotou-se as coordenadas obtidas para a primeira época como referência para os cálculos nas épocas seguintes. O QUADRO 1 a seguir mostra as coordenadas dos pilares no sistema de referência proposto:

QUADRO 1 - COORDENADAS DOS PILARES DA REDE DE MONITORAMENTO NO SISTEMA DA BARRAGEM.

PONTO	X_b (m)	Y_b (m)	Z_b (m)
PG01	703,889	-126,233	4,348
PG02	-50,828	-57,582	15,664
PG03	453,648	253,868	-50,194
PGG1	474,534	14,941	-19,899
CG01	468,694	7,483	0,192

Fonte: O Autor (2013)

De posse dos dados referentes a poligonal (ângulos horizontais, verticais distâncias e as respectivas precisões), das coordenadas do pilar PG03 (vértice de partida da poligonal) e PG02 usado para orientação, foram ajustadas as coordenadas dos demais vértices para cada campanha de coleta de dados, através do software educacional de ajustamento WOLF PAC© descrito anteriormente. Convém mencionar que em função de dificuldades na resposta do ATR da estação total, para visadas entre os pontos G11 e G12, nomeados na primeira campanha, foi necessário a implantação de uma estação intermediária entre eles a partir da segunda campanha. Os Quadros (2, 3, 4, 5, 6) a seguir mostram as coordenadas planimétricas, em metros, obtidas para os vértices da poligonal ao longo das épocas:

QUADRO 2 -COORDENADAS DOS VERTICES DA POLIGONAL PARA CAMPANHA
01 (17/08/12)

Vértice	X _b (m)	Y _b (m)	±(m)	±(m)
PGG1	14,7607	474,6836	0,0032	0,00028
G1	14,7106	627,3678	0,00568	0,00452
G2	4,8701	623,5035	0,00565	0,00455
G3	6,4509	595,2911	0,00513	0,00586
G4	4,8248	567,1181	0,00482	0,00633
G5	6,3888	550,3077	0,00475	0,00642
G6	4,7033	461,3958	0,00548	0,0065
G7	9,0545	444,3008	0,00577	0,00647
G8	4,5808	426,2736	0,0061	0,00653
G9	6,0853	367,8781	0,00746	0,00644
G10	4,5056	331,4934	0,0083	0,00645
G11	6,0791	303,2232	0,00886	0,00642
G12	4,382	176,9336	0,00776	0,00636
G13	8,8967	157,8946	0,00806	0,00625
G14	4,3472	146,7742	0,00813	0,00623
G15	4,3258	118,0952	0,00875	0,00621
G16	13,2002	116,0487	0,00841	0,00599

Fonte: O Autor (2013)

QUADRO 3 - COORDENADAS DOS VERTICES DA POLIGONAL PARA CAMPANHA
02 (05/09/12)

Vértice	X _b (m)	Y _b (m)	±(m)	±(m)
PGG1	14,7605	474,6778	0,00313	0,00028
G1	14,6973	627,3622	0,01574	0,00312
G2	4,8603	623,5	0,01548	0,00337
G3	6,4421	595,2892	0,01343	0,00365
G4	4,821	567,1096	0,01221	0,00399
G5	6,3859	550,3002	0,01186	0,00422
G6	4,71	461,3949	0,01323	0,00451
G7	9,067	444,3002	0,0137	0,00468
G8	4,5967	426,2669	0,01401	0,00494
G9	6,1076	367,8753	0,01597	0,00513
G10	4,5309	331,4954	0,01786	0,00535
G11	6,1067	303,2237	0,01937	0,00603
G12	6,0654	260,4806	0,02202	0,00619
G13	4,3804	176,9315	0,01381	0,00637
G14	8,8928	157,8965	0,01318	0,0068
G15	4,3427	146,7709	0,01294	0,00699
G16	4,324	118,0957	0,01319	0,00898
G17	13,1975	116,0438	0,01278	0,00869

Fonte: O Autor (2013)

QUADRO 4 - COORDENADAS DOS VERTICES DA POLIGONAL PARA CAMPANHA 03
(07/11/12)

Vértice	X _b (m)	Y _b (m)	±(m)	±(m)
PGG1	14,7608	474,6801	0,00119	0,0001
G1	14,7143	627,363	0,00776	0,0006
G2	4,8743	623,5006	0,00771	0,0009
G3	6,4553	595,287	0,00673	0,00105
G4	4,8298	567,1087	0,00592	0,00123
G5	6,3935	550,298	0,00552	0,00169
G6	4,7122	461,3913	0,00479	0,00181
G7	9,0686	444,2958	0,00491	0,00185
G8	4,5946	426,2646	0,00504	0,00221
G9	6,1045	367,8718	0,00482	0,00248
G10	4,5287	331,4928	0,00485	0,00256
G11	6,1043	303,2194	0,0047	0,0026
G12	6,0613	260,4791	0,00456	0,00266
G13	4,3836	176,9283	0,00464	0,00274
G14	8,8951	157,8958	0,00473	0,0029
G15	4,3451	146,7692	0,00464	0,00312
G16	4,3277	118,0922	0,00486	0,00331
G17	13,1995	116,0414	0,00487	0,00321

Fonte: O Autor (2013)

QUADRO 5 - COORDENADAS DOS VERTICES DA POLIGONAL PARA CAMPANHA
04 (20/03/13)

Vértice	X _b (m)	Y _b (m)	±(m)	±(m)
PGG1	14,7615	474,6835	0,0022	0,00019
G1	14,7004	627,3667	0,01563	0,00112
G2	4,8649	623,5038	0,01529	0,00157
G3	6,4467	595,2921	0,0133	0,00185
G4	4,8225	567,1179	0,01186	0,00221
G5	6,3869	550,3085	0,01131	0,00305
G6	4,708	461,3989	0,01107	0,00327
G7	9,0638	444,3004	0,01148	0,00336
G8	4,5905	426,2744	0,01158	0,00358
G9	6,1024	367,882	0,01106	0,00371
G10	4,5276	331,4999	0,01054	0,00389
G11	6,102	303,2247	0,01035	0,004
G12	6,058	260,4835	0,00986	0,00414
G13	4,3753	176,9331	0,00806	0,00429
G14	8,8857	157,9037	0,00784	0,00435
TP1	5,8795	150,4835	0,00749	0,00478
G16	4,3144	118,1065	0,00766	0,00492
G17	13,1804	116,0545	0,00757	0,00478

Fonte: O Autor (2013)

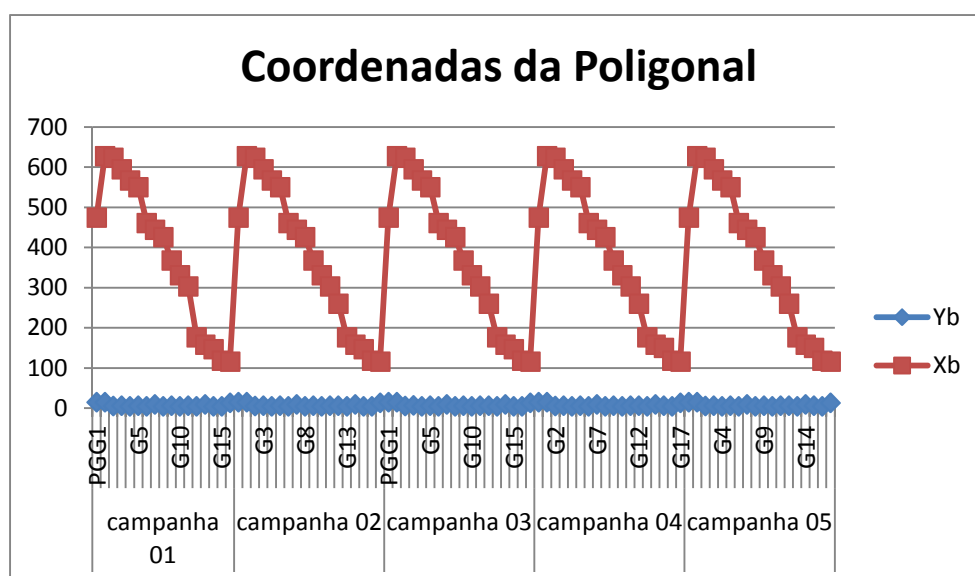
QUADRO 6 - COORDENADAS DOS VERTICES DA POLIGONAL PARA CAMPANHA
05 (21/11/13)

Vértice	X _b (m)	Y _b (m)	±(m)	±(m)
PGG01	14,7594	474,6779	0,00491	0,00043
G1	14,7047	627,3664	0,01478	0,0017
G2	4,8676	623,4987	0,01486	0,0024
G3	6,4483	595,2898	0,01342	0,00397
G4	4,8235	567,1119	0,01267	0,00431
G5	6,3849	550,291	0,01254	0,00455
G6	4,7032	461,3898	0,0148	0,00485
G7	9,0601	444,2959	0,01515	0,00501
G8	4,5881	426,2634	0,01539	0,00588
G9	6,1001	367,8649	0,01587	0,00654
G10	4,5264	331,486	0,01515	0,00673
G11	6,1036	303,2153	0,01411	0,00685
G12	6,0605	260,4681	0,01263	0,00699
G13	4,3861	176,9205	0,01179	0,00716
G14	8,8995	157,8868	0,0119	0,00719
G15	5,891	150,2244	0,01189	0,00737
G16	4,3382	118,0846	0,01249	0,00753
G17	13,2113	116,0304	0,01249	0,00731

Fonte: O Autor (2013)

O uso dos dispositivos móveis de centragem forçada permitem a materialização temporária dos vértices da poligonal. Porém, como não há garantias a cada época, do emprego do mesmo dispositivo para os mesmos locais e de sua estabilidade se comparado à estabilidade de um pilar de concreto, a possibilidade de uma análise direta das coordenadas entre campanhas torna-se tecnicamente inviável. A FIGURA 18 a seguir visa ilustrar de forma simplificada o comportamento das coordenadas dos vértices da poligonal ao longo das campanhas. Nesta figura, o eixo “x” do gráfico indica os vértices da poligonal, as campanhas realizadas e a variação da componente “Y_b” enquanto que o eixo “y” indica a escala em metro da componente “X_b”.

FIGURA 18 - COMPORTAMENTO DAS COORDENADAS DOS VÉRTICES DA POLIGONAL PARA AS ÉPOCAS LEVANTADAS.



Fonte: O Autor (2013)

Os cálculos altimétricos foram conduzidos de forma independente da planimetria, onde a partir dos valores médios dos ângulos zenitais, distâncias inclinadas e respectivos desvios-padrão para as direções de ré e vante, foi possível determinar os desníveis entre os vértices da poligonal e posteriormente ajustá-los conforme o modelo previamente descrito na metodologia (item 3.4.2.2). O QUADRO 7 a seguir apresenta os erros de fechamento altimétricos (ϵ), obtidos antes do ajustamento, bem como valores

de tolerâncias de fechamento caso fossem admitidos valores de 1mm, 2mm e 3mm por quilômetro.

QUADRO 7 - FECHAMENTOS DO NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO E AS TOLERÂNCIAS ADMISSÍVEIS.

Época	ϵ (mm)	Perímetro (m)	Tol 1 mm/km	Tol 2 mm/km	Tol 3 mm/km
17/08/2012	-1,1	1335,206	1,16	2,31	3,47
05/09/2012	-1,9	1335,210	1,16	2,31	3,47
07/11/2012	2,6	1335,213	1,16	2,31	3,47
20/03/2013	3,0	1334,923	1,16	2,31	3,47
21/11/2013	12,0	1334,943	1,16	2,31	3,47

Fonte: O Autor (2013)

O QUADRO 8 mostra as altitudes (conforme referencial da barragem previamente definido) e respectivas precisões, calculadas em função dos desníveis ajustados, tomando-se como referência a altitude do pilar PG03 definida para na primeira época. Os valores referentes a estação “G11” na época 17/08/2012 não existem pois o ponto foi a partir da segunda campanha, conforme justificado anteriormente.

É possível notar que o vértice G15 apresenta valores com magnitudes distintas nas duas ultimas épocas (20/03/2014 e 21/11/2014) em relação as épocas anteriores. Esta variação é justificada por uma alteração na posição do vértice G15 em função da instalação de dutos na lateral da galeria, por parte do pessoal de operação da usina, que impediam as visadas. Sendo assim, foi necessário reposicionar o vértice de forma a viabilizar as tomadas de leituras.

QUADRO 8 – ALTITUDES DOS VÉRTICES DA POLIGONAL APÓS O AJUSTAMENTO E RESPECTIVAS PRECISÕES .

Estações	17/08/2012		05/09/2012		07/11/2012		20/03/2013		21/11/2013	
	h(m)	\pm (m)	h(m)	\pm (m)	h(m)	\pm (m)	h(m)	\pm (m)	h(m)	\pm (m)
PG03	-50,194	0,001	-50,194	0,001	-50,194	0,001	-50,194	0,001	-50,194	0,001
PGG01	-19,873	0,003	-19,879	0,003	-19,880	0,005	-19,883	0,002	-19,883	0,002
G1	-19,818	0,003	-19,825	0,003	-19,817	0,006	-19,829	0,003	-19,821	0,003
G2	-19,613	0,003	-19,609	0,003	-19,612	0,006	-19,603	0,003	-19,619	0,003
G3	-31,832	0,003	-31,839	0,003	-31,843	0,006	-31,827	0,003	-31,856	0,003
G4	-31,846	0,003	-31,837	0,003	-31,841	0,006	-31,847	0,003	-31,837	0,003
G5	-35,092	0,003	-35,094	0,003	-35,085	0,006	-35,100	0,003	-35,093	0,003
G6	-35,140	0,004	-35,136	0,003	-35,140	0,006	-35,129	0,003	-35,144	0,003

G7	-35,162	0,004	-35,163	0,003	-35,169	0,006	-35,156	0,003	-35,176	0,003
G8	-35,129	0,004	-35,132	0,003	-35,137	0,006	-35,140	0,003	-35,128	0,003
G9	-35,218	0,004	-35,215	0,003	-35,208	0,006	-35,219	0,003	-35,207	0,003
G10	-35,224	0,004	-35,220	0,003	-35,225	0,006	-35,215	0,003	-35,224	0,003
G11	***	***	-35,181	0,003	-35,189	0,006	-35,178	0,003	-35,193	0,003
G12	-35,181	0,004	-35,171	0,003	-35,178	0,006	-35,181	0,003	-35,166	0,003
G13	-35,180	0,004	-35,187	0,003	-35,182	0,006	-35,190	0,003	-35,177	0,003
G14	-35,188	0,004	-35,193	0,003	-35,199	0,006	-35,185	0,003	-35,191	0,003
G15	-33,376	0,004	-33,370	0,003	-33,379	0,006	-35,220	0,003	-35,150	0,003
G16	-19,584	0,004	-19,580	0,003	-19,586	0,006	-19,583	0,003	-19,570	0,003
G17	-19,605	0,004	-19,610	0,003	-19,603	0,006	-19,605	0,003	-19,605	0,003

Fonte: O Autor (2013)

Analisando as variações das altitudes de cada ponto, ao longo das épocas, é possível perceber que os valores tendem a um comportamento aproximadamente senoidal, ou seja, variam de forma aleatória para mais ou para menos em relação a época imediatamente anterior. Partindo de uma altitude conhecida, no caso o pilar PG03, a obtenção das precisões das altitudes dos demais vértices se dá através de propagação da precisão da altitude inicial e das precisões dos desníveis ajustados. Convém lembrar que para a obtenção dos desníveis ajustados, foi levado em conta as precisões das observações angulares e lineares e as precisões dos desníveis encontram-se dentro do que esperado para o método. Cabe salientar que uma vez ajustados os desníveis segundo a condição de inunção (equação 24), o erro de fechamento altimétrico de cada época será igual a zero.

De posse das coordenadas tridimensionais dos vértices da poligonal é possível calcular as coordenadas tridimensionais dos pontos de monitoramento e respectivas precisões. Após a determinação das coordenadas tridimensionais de todos os pontos de monitoramento, procedeu-se a identificação daqueles que compunham os pares relativos aos MTJ.

Os Quadros (9, 10, 11, 12 e 13) a seguir, mostram os valores obtidos através da abordagem vetorial (item 3.5.1). Os Quadros (14 e 15) mostram as leituras dos MTJ (LX, LY, LZ) feitas e fornecidas pelo corpo técnico que administra a UHE Mauá, bem como os valores das distâncias espaciais considerando apenas as componentes “LX” e “LY” (ou seja, 2D) e as componentes “LX”, “LY” e “LZ” (ou seja, 3D).

QUADRO 9 – RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA ABORDAGEM VETORIAL, PARA CAMPANHA 01 (17/08/2012)

	Diferenças de coordenadas			Versores			Ângulos diretores (GG,MMSS)		
	ΔX_b (m)	ΔY_b (m)	ΔZ_b (m)	i	j	k	α (° ` ")	β (° ` ")	γ (° ` ")
MTJ-02	0,413387	0,019405	-0,36337	0,750618	0,035235	-0,6598	41,21219	87,58507	131,1704
MTJ-03	0,308067	0,015565	-0,23111	0,799274	0,040383	-0,59961	36,56209	87,41081	126,5031
MTJ-04	0,311432	0,015882	-0,25027	0,778881	0,03972	-0,62591	38,50302	87,43249	128,4457
MTJ-05	0,363899	0,012638	-0,20576	0,870084	0,030218	-0,49198	29,31536	88,16062	119,2814
MTJ-06	0,293444	0,021025	-0,27541	0,728161	0,052172	-0,68342	43,16033	87,00339	133,0641
MTJ-07	0,383534	0,004261	-0,24669	0,841011	0,009343	-0,54094	32,45108	89,27527	122,4451
MTJ-08	0,362469	-0,00927	-0,24237	0,831099	-0,02126	-0,55572	33,47174	91,13064	123,4536
MTJ-09	0,280368	0,011465	-0,28538	0,700526	0,028646	-0,71305	45,31508	88,21304	135,2901
MTJ-10	0,347701	0,018813	0,300872	0,755561	0,040881	0,653801	40,5532	87,39253	49,10163
MTJ-11	0,353065	0,009593	0,251513	0,814271	0,022124	0,580063	35,29046	88,43562	54,32422
MTJ-13	0,326196	-0,0037	0,283713	0,754504	-0,00857	0,656239	41,01046	90,29272	48,59107
MTJ-16	0,398769	-0,0863	0,308358	0,779732	-0,16874	0,602947	38,45502	99,42522	52,55075
MTJ-17	0,302274	0,024016	0,285712	0,725527	0,057644	0,685775	43,29141	86,41435	46,42123
MTJ-18	0,289688	0,016457	0,26387	0,738632	0,041961	0,672802	42,23061	87,35423	47,42587
MTJ-20	0,42762	0,073289	0,239335	0,863023	0,147912	0,483026	30,20324	81,29386	61,07004
MTJ-21	0,286675	0,022857	0,249327	0,753186	0,060053	0,655061	41,07584	86,33258	49,04326
MTJ-22	0,399813	-0,05005	-0,34496	0,753757	-0,09436	-0,65034	41,04593	95,24521	130,3403
MTJ-23	0,295309	0,009261	0,304972	0,695469	0,02181	0,718225	45,56076	88,4501	44,05306
MTJ-24	0,254502	-0,03347	0,325587	0,61384	-0,08072	0,785292	52,07562	94,37478	38,15082
MTJ-25	0,393976	0,009157	0,287603	0,807544	0,018769	0,589508	36,08359	88,55283	53,52403

Fonte: O Autor (2013)

QUADRO 10 - RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA ABORDAGEM VETORIAL, PARA CAMPANHA 02 (05/09/2012)

	Diferenças de coordenadas			Versores			Ângulos diretores (GG,MMSS)		
	ΔX_b (m)	ΔY_b (m)	ΔZ_b (m)	i	j	k	α (° ` ")	β (° ` ")	γ (° ` ")
MTJ-02	0,412576	0,021888	-0,36337	0,74985	0,039781	-0,66041	41,25215	87,43124	131,1952
MTJ-03	0,307988	0,017186	-0,2327	0,797074	0,044477	-0,60224	37,08542	87,27028	127,015
MTJ-04	0,310433	0,01402	-0,25111	0,777007	0,035092	-0,62851	39,00455	87,59203	128,5626
MTJ-05	0,363661	0,009732	-0,20518	0,8707	0,023301	-0,49126	29,27357	88,39534	119,2525
MTJ-06	0,292435	0,02099	-0,2778	0,724034	0,051969	-0,6878	43,36413	87,01159	133,2724
MTJ-07	0,385109	0,002789	-0,24316	0,84554	0,006123	-0,53388	32,16125	89,38569	122,1604
MTJ-08	0,361127	-0,01014	-0,24319	0,82923	-0,02328	-0,55842	33,58489	91,20016	123,5648
MTJ-09	0,279509	0,010286	-0,28206	0,703653	0,025895	-0,71007	45,16451	88,30583	135,1427
MTJ-09	0,279135	0,008697	-0,28205	0,703257	0,021911	-0,7106	45,184	88,44401	135,1701
MTJ-10	0,348687	0,019062	0,301615	0,755666	0,041311	0,653653	40,5459	87,37566	49,10567
MTJ-11	0,353463	0,010554	0,249713	0,816497	0,02438	0,576835	35,15517	88,36108	54,46183
MTJ-12	0,039901	-0,00288	0,016833	0,919335	-0,06636	0,387839	23,10152	93,48171	67,10476
MTJ-13	0,32352	-0,01369	0,288833	0,745594	-0,03156	0,665653	41,47235	91,48302	48,16032
MTJ-16	0,40839	-0,05675	0,308744	0,79284	-0,11017	0,599389	37,32538	96,19299	53,10258
MTJ-17	0,302898	-0,01122	0,287528	0,725007	-0,02686	0,688218	43,31501	91,32211	46,30389
MTJ-18	0,289282	-0,019	0,25793	0,745501	-0,04896	0,664704	41,47524	92,48226	48,20253
MTJ-20	0,434646	0,027653	0,240643	0,873511	0,055574	0,483622	29,07508	86,4851	61,044
MTJ-21	0,282022	0,031284	0,248203	0,748093	0,082984	0,658385	41,34283	85,14236	48,49235
MTJ-22	0,401355	-0,04247	-0,34452	0,756355	-0,08003	-0,64925	40,5122	94,3526	130,2906
MTJ-23	0,292729	0,01513	0,303378	0,693917	0,035866	0,719161	46,03324	87,56406	44,00531
MTJ-24	0,255606	-0,02876	0,324156	0,617689	-0,06951	0,783345	51,51087	93,59081	38,25557
MTJ-25	0,390018	0,017313	0,283797	0,80807	0,03587	0,587993	36,05319	87,56396	53,5907
MTJ-27	0,401298	0,03617	-0,26717	0,830061	0,074815	-0,55263	33,5342	85,42338	123,3252

Fonte: O Autor (2013)

QUADRO 11 - RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA ABORDAGEM VETORIAL, PARA CAMPANHA 03 (07/11/2012)

	Diferenças de coordenadas			Versores			Ângulos diretores (GG,MMSS)		
	ΔX_b (m)	ΔY_b (m)	ΔZ_b (m)	i	j	k	α (° ` ")	β (° ` ")	γ (° ` ")
MTJ-02	0,413923	0,021721	-0,36292	0,751324	0,039426	-0,65875	41,17412	87,44256	131,1218
MTJ-03	0,307708	0,01656	-0,23332	0,796101	0,042844	-0,60364	37,14262	87,32401	127,0753
MTJ-04	0,311575	0,016931	-0,25214	0,776664	0,042204	-0,6285	39,0238	87,34522	128,5622
MTJ-05	0,364897	0,013567	-0,20561	0,870752	0,032375	-0,49066	29,27139	88,0841	119,2301
MTJ-06	0,291799	0,021963	-0,27703	0,72415	0,054505	-0,68749	43,36066	86,5232	133,2553
MTJ-07	0,383586	0,003334	-0,24434	0,843398	0,007331	-0,53724	32,29575	89,3448	122,2945
MTJ-08	0,359931	-0,01368	-0,24176	0,82971	-0,03153	-0,5573	33,55517	91,48242	123,521
MTJ-09	0,279709	0,007892	-0,28471	0,700677	0,01977	-0,7132	45,31071	88,5202	135,2947
MTJ-09	0,27703	0,007561	-0,28469	0,697273	0,019031	-0,71655	45,47289	88,54344	135,4614
MTJ-10	0,346389	0,016817	0,298826	0,756667	0,036736	0,652768	40,49436	87,5341	49,14577
MTJ-11	0,35261	0,008515	0,249612	0,816033	0,019706	0,577669	35,18372	88,52151	54,42478
MTJ-12	0,32187	0,018474	0,215924	0,829505	0,04761	0,556467	33,57076	87,1616	56,11175
MTJ-13	0,322388	-0,01447	0,286201	0,74741	-0,03355	0,663516	41,38006	91,55217	48,25533
MTJ-16	0,405852	-0,05525	0,310127	0,789967	-0,10755	0,603644	37,49033	96,10265	52,52073
MTJ-17	0,303034	-0,0101	0,292777	0,718967	-0,02396	0,694631	44,01507	91,22217	46,00077
MTJ-18	0,290395	-0,01343	0,262198	0,741786	-0,03431	0,669759	42,06585	91,57574	47,57055
MTJ-20	0,432831	0,029634	0,239362	0,873533	0,059807	0,483077	29,07414	86,34166	61,06484
MTJ-21	0,284216	0,030782	0,246436	0,75302	0,081556	0,652924	41,08503	85,19192	49,14154
MTJ-22	0,400121	-0,03901	-0,34749	0,752981	-0,07341	-0,65394	41,09027	94,12348	130,502
MTJ-23	0,292363	0,01443	0,304117	0,692633	0,034186	0,720479	46,09399	88,02273	43,54213
MTJ-24	0,256858	-0,02772	0,32327	0,620698	-0,06699	0,781183	51,37584	93,50286	38,37517
MTJ-25	0,39273	0,019736	0,286285	0,807421	0,040576	0,588579	36,0919	87,40284	53,56376
MTJ-27	0,398558	0,036579	-0,27179	0,823819	0,075609	-0,56179	34,31518	85,39497	124,1046

Fonte: O Autor (2013)

QUADRO 12 - RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA ABORDAGEM VETORIAL, PARA CAMPANHA 04 (20/03/2013)

	Diferenças de coordenadas			Versores			Ângulos diretores (GG,MMSS)		
	ΔX_b (m)	ΔY_b (m)	ΔZ_b (m)	i	j	k	α (° ` ")	β (° ` ")	γ (° ` ")
MTJ-02	0,415494	0,024935	-0,36185	0,753341	0,04521	-0,65607	41,07098	87,24316	131,0004
MTJ-03	0,314135	0,01078	-0,23176	0,804392	0,027604	-0,59346	36,26544	88,25056	126,241
MTJ-04	0,310978	0,014286	-0,24672	0,782884	0,035965	-0,62113	38,28286	87,56201	128,2355
MTJ-05	0,364194	0,008628	-0,20669	0,869515	0,020599	-0,49348	29,35514	88,49108	119,341
MTJ-06	0,297314	0,022945	-0,27946	0,727492	0,056144	-0,68382	43,19244	86,46534	133,0833
MTJ-07	0,381859	-0,00299	-0,24547	0,841172	-0,0066	-0,54073	32,44093	90,22408	122,4359
MTJ-08	0,361723	-0,00515	-0,24047	0,832707	-0,01186	-0,55359	33,37199	90,40454	123,3648
MTJ-09	0,282385	0,008921	-0,28606	0,702351	0,022188	-0,71148	45,23025	88,43429	135,2121
MTJ-10	0,344345	0,014386	0,296952	0,756919	0,031622	0,652743	40,48239	88,11163	49,15046
MTJ-11	0,352497	0,003542	0,250543	0,815061	0,00819	0,579318	35,24239	89,31507	54,35508
MTJ-12	0,320156	0,020991	0,214132	0,829985	0,054418	0,555124	33,541	86,525	56,16506
MTJ-13	0,322334	-0,00975	0,286813	0,74688	-0,0226	0,664574	41,4045	91,17422	48,21011
MTJ-16	0,404966	-0,05435	0,308607	0,79088	-0,10615	0,602695	37,43558	96,05357	52,56126
MTJ-17	0,302109	-0,01039	0,29485	0,715436	-0,0246	0,698245	44,19159	91,24347	45,4249
MTJ-20	0,431401	0,034962	0,240102	0,871601	0,070637	0,485101	29,21174	85,56579	60,58513
MTJ-21	0,284077	0,033083	0,247709	0,750817	0,087439	0,654697	41,20195	84,59014	49,06121
MTJ-22	0,401803	-0,03517	-0,34607	0,756042	-0,06618	-0,65117	40,53005	93,47415	130,3747
MTJ-23	0,294643	0,016253	0,303312	0,696268	0,038407	0,716754	45,5218	87,4756	44,12464
MTJ-24	0,257216	-0,0307	0,325402	0,618427	-0,07381	0,782368	51,4755	94,13588	38,31196

Fonte: O Autor (2013).

QUADRO 13 - RESULTADOS OBTIDOS ATRAVÉS DA ABORDAGEM VETORIAL, PARA CAMPANHA 05 (21/11/2013)

	Diferenças de coordenadas			Versores			Ângulos diretores (GG,MMSS)		
	ΔX_b (m)	ΔY_b (m)	ΔZ_b (m)	i	j	k	α (° ` ")	β (° ` ")	γ (° ` ")
MTJ-02	0,414233	0,023082	-0,36311	0,751325	0,041866	-0,6586	41,1741	87,36021	131,1136
MTJ-03	0,314154	0,010931	-0,22939	0,807294	0,02809	-0,58948	36,10034	88,23253	126,0713
MTJ-04	0,311549	0,014229	-0,24697	0,783148	0,035768	-0,62081	38,27012	87,57008	128,223
MTJ-05	0,36398	0,006427	-0,20525	0,870946	0,015379	-0,49114	29,25524	89,07078	119,2455
MTJ-06	0,297016	0,022986	-0,2775	0,72954	0,056459	-0,6816	43,09078	86,45483	132,5809
MTJ-07	0,382822	-0,00089	-0,24586	0,841418	-0,00196	-0,54038	32,42356	90,06439	122,4235
MTJ-08	0,361691	-0,00421	-0,24065	0,832523	-0,00969	-0,55391	33,38283	90,33193	123,3807
MTJ-09	0,281463	0,009227	-0,28594	0,701316	0,022991	-0,71248	45,28022	88,40574	135,2613
MTJ-10	0,343943	0,015868	0,29695	0,756462	0,0349	0,653106	40,50483	87,59599	49,13257
MTJ-11	0,35245	0,003574	0,250593	0,814969	0,008264	0,579445	35,24565	89,31354	54,35184
MTJ-12	0,320064	0,020547	0,21576	0,828016	0,053156	0,558178	34,06161	86,57107	56,04123
MTJ-13	0,324516	-0,01096	0,286775	0,749097	-0,02529	0,661977	41,29161	91,2658	48,32569
MTJ-16	0,403916	-0,05607	0,308929	0,789523	-0,10961	0,603854	37,51326	96,17334	52,51128
MTJ-17	0,301771	-0,01044	0,293839	0,71624	-0,02478	0,697414	44,15183	91,25125	45,46484
MTJ-20	0,43071	0,032942	0,23955	0,871982	0,066692	0,484974	29,18369	86,10336	60,59212
MTJ-21	0,285129	0,034339	0,246124	0,753859	0,09079	0,650733	41,04271	84,47275	49,24112
MTJ-22	0,401683	-0,03553	-0,34397	0,75786	-0,06704	-0,64896	40,43267	93,50389	130,2748
MTJ-23	0,29367	0,01594	0,301682	0,697028	0,037834	0,716045	45,48394	87,49544	44,1616
MTJ-24	0,25786	-0,0294	0,325339	0,619595	-0,07064	0,781737	51,42482	94,03019	38,34486
MTJ-27	0,397025	0,035059	-0,26846	0,826184	0,072956	-0,55866	34,17286	85,48585	123,5747

Fonte: O Autor (2013).

QUADRO 14 -DADOS DAS LEITURAS DOS MTJ PARA AS CAMPANHAS 01, 02 E 03

	17/08/2012					05/09/2012					07/11/2012				
	L X(mm)	L Y(mm)	LZ(mm)	Dist (2D)	Dist (3D)	L X(mm)	L Y(mm)	LZ(mm)	Dist (2D)	Dist (3D)	L X(mm)	L Y(mm)	LZ(mm)	Dist (2D)	Dist (3D)
MTJ-02	18,79	19,61	20,13	27,159	33,806	18,82	19,35	19,86	26,993	33,512	18,75	19,61	20,14	27,132	33,790
MTJ-03	18,18	19,58	20,27	26,719	33,537	17,92	19,32	20,20	26,351	33,203	18,26	19,56	20,27	26,755	33,564
MTJ-04	18,43	-	19,60	-	-	18,20	18,65	19,35	26,059	32,457	18,58	18,90	19,62	26,505	32,977
MTJ-05	18,50	20,16	19,61	27,362	33,663	18,13	19,82	19,29	26,861	33,070	18,47	20,05	19,51	27,258	33,521
MTJ-06	18,84	18,82	19,59	26,630	33,059	18,61	18,61	19,34	26,319	32,660	18,79	18,76	19,59	26,553	32,998
MTJ-07	19,27	19,96	20,27	27,744	34,360	19,05	19,73	20,03	27,426	33,961	19,22	19,88	20,23	27,648	34,259
MTJ-08	18,78	20,05	19,40	27,472	33,631	18,55	19,78	19,15	27,117	33,197	15,89	19,95	19,33	25,509	32,006
MTJ-09	16,88	19,61	19,79	25,874	32,575	16,66	19,45	19,59	25,610	32,243	16,92	19,80	19,77	26,047	32,697
MTJ-10	18,51	18,78	20,32	26,369	33,290	18,36	18,65	20,15	26,171	33,029	18,66	18,86	20,41	26,534	33,473
MTJ-11	17,71	19,44	20,04	26,297	33,063	17,45	19,30	19,84	26,019	32,720	17,46	19,58	20,05	26,229	33,016
MTJ-12	-	-	-	-	-	18,05	18,94	19,73	26,163	32,769	18,22	19,08	19,92	26,383	33,061
MTJ-13	18,88	19,77	19,87	27,337	33,795	18,71	19,50	19,68	27,024	33,431	18,81	19,75	19,86	27,274	33,741
MTJ-16	19,18	19,12	20,25	27,082	33,816	19,00	18,93	20,10	26,821	33,516	19,28	19,16	20,37	27,184	33,967
MTJ-17	18,41	20,08	20,32	27,242	33,986	18,16	19,88	20,12	26,926	33,613	18,54	19,95	20,33	27,238	33,991
MTJ-18	19,45	19,36	20,28	27,443	34,123	19,29	19,20	20,09	27,217	33,828	19,51	19,39	20,32	27,508	34,201
MTJ-20	18,54	19,78	19,84	27,111	33,595	18,36	19,59	19,63	26,849	33,260	18,47	19,69	19,80	27,000	33,480
MTJ-21	18,81	19,28	19,41	26,936	33,201	18,51	19,05	19,16	26,562	32,751	18,99	19,32	19,52	27,093	33,390
MTJ-22	19,66	19,99	20,79	28,038	34,905	19,40	19,75	20,55	27,684	34,478	19,86	20,08	20,95	28,239	35,162
MTJ-23	17,51	20,59	19,71	27,029	33,452	17,56	20,66	19,81	27,114	33,580	17,37	20,48	19,70	26,850	33,304
MTJ-24	17,76	19,30	20,46	26,228	33,264	17,74	19,33	20,65	26,237	33,388	17,61	19,17	20,85	26,031	33,351
MTJ-25	19,00	19,34	19,41	27,112	33,343	19,17	19,48	19,58	27,331	33,620	19,18	19,49	19,62	27,344	33,653
MTJ-27	-	-	-	-	-	16,35	20,00	20,47	25,833	32,960	16,23	19,86	20,54	25,649	32,861

Fonte: O Autor (2013).

QUADRO 15 - DADOS DOS MTJ PARA AS CAMPANHAS 04 E 05

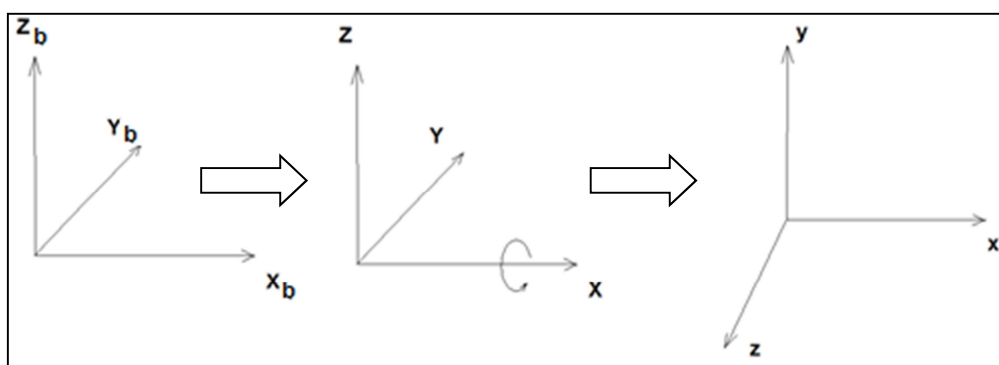
	20/03/2013					21/11/2013				
	L X(mm)	L Y(mm)	LZ(mm)	Dist (2D)	Dist (3D)	L X(mm)	L Y(mm)	LZ(mm)	Dist (2D)	Dist (3D)
MTJ-02	18,75	19,61	20,14	27,132	33,790	18,69	19,44	20,07	26,967	33,616
MTJ-03	18,26	19,56	20,27	26,755	33,564	18,13	19,44	20,13	26,582	33,344
MTJ-04	18,58	18,90	19,62	26,505	32,977	17,90	18,60	19,41	25,814	32,297
MTJ-05	18,47	20,05	19,51	27,258	33,521	18,25	19,92	19,29	27,016	33,196
MTJ-06	18,79	18,76	19,59	26,553	32,998	18,61	18,67	19,42	26,361	32,742
MTJ-07	19,22	19,88	20,23	27,648	34,259	19,15	19,83	20,15	27,567	34,146
MTJ-08	15,89	19,95	19,33	25,509	32,006	18,49	19,88	19,26	27,149	33,287
MTJ-09	16,92	19,80	19,77	26,047	32,697	16,19	19,46	19,19	25,314	31,766
MTJ-10	18,66	18,86	20,41	26,534	33,473	18,59	18,95	19,99	26,546	33,231
MTJ-11	17,46	19,58	20,05	26,229	33,016	15,35	18,98	18,97	24,410	30,915
MTJ-12	18,22	19,08	19,92	26,383	33,061	18,67	19,86	19,69	27,258	33,626
MTJ-13	18,81	19,75	19,86	27,274	33,741	15,22	18,37	19,71	23,856	30,945
MTJ-16	19,28	19,16	20,37	27,184	33,967	18,35	19,20	20,24	26,559	33,392
MTJ-17	18,54	19,95	20,33	27,238	33,991	17,41	19,09	19,29	25,837	32,243
MTJ-18	19,51	19,39	20,32	27,508	34,201	-	-	-	-	-
MTJ-20	18,47	19,69	19,80	27,000	33,480	18,89	19,82	20,11	27,380	33,972
MTJ-21	18,99	19,32	19,52	27,093	33,390	19,64	19,63	19,92	27,768	34,174
MTJ-22	19,86	20,08	20,95	28,239	35,162	19,29	18,88	19,27	26,992	33,165
MTJ-23	17,37	20,48	19,70	26,850	33,304	18,65	19,06	19,92	26,667	33,285
MTJ-24	17,61	19,17	20,85	26,031	33,351	19,69	19,17	20,32	27,481	34,177
MTJ-25	19,18	19,49	19,62	27,344	33,653	-	-	-	-	-
MTJ-27	16,23	19,86	20,54	25,649	32,861	15,66	19,91	20,67	25,331	32,694

Fonte: O Autor (2013).

Convém mencionar que os valores de leitura relativos a época 07/11/12, não existiam nas tabelas fornecidas pelo corpo técnico da usina. Sendo assim, os valores apresentados no QUADRO 14 para esta época foram interpolados com base nos valores das leituras em épocas imediatamente anterior e posterior a data do levantamento.

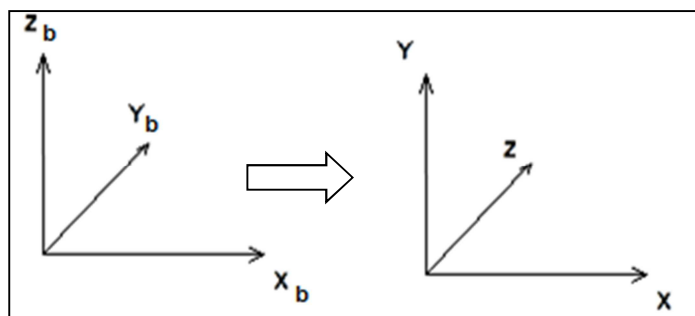
Através de uma breve análise dos dados e gráficos fornecidos, pelo corpo técnico da usina, percebeu-se que o sistema de eixos adotados para representar as leituras nos MTJ foi convencionado de maneira distinta ao sistema trazido pela literatura consultada. Para uma análise comparativa, foi necessário então uma adequação do sistema de eixos de representação das coordenadas no sistema da barragem. Na convenção adotada para os MTJ, o eixo “z” é orientado positivamente para o interior da galeria e o eixo “y” indicando os recalques, afetando portanto a forma de representar pontos a montante e a jusante. Para os pontos a jusante, é necessário então a aplicação de uma rotação de -90° no eixo “x” do sistema da barragem, de forma que as coordenadas obtidas por topografia possam então estar compatíveis com o sistema de referência adotado para os MTJ. Para os pontos a montante basta apenas mudar a convenção dos eixos. A FIGURA 19 a seguir ilustra o sistema de eixos convencionado para a barragem (a esquerda), a rotação imprimida (no centro) e seu efeito (a direita) para os pontos a jusante enquanto que para montante tem-se a FIGURA 20.

FIGURA 19 - DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE EIXOS PARA PONTOS DE JUSANTE



Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 20 - DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE EIXOS PARA PONTOS DE MONTANTE



Fonte: O Autor (2013).

Para representação dos pontos de jusante, o efeito da rotação pode ser obtido através da aplicação da equação (43) a seguir:

$$\begin{bmatrix} LX \\ LY \\ LZ \end{bmatrix}_{MTJ} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-90) & -\text{sen}(-90) \\ 0 & \text{sen}(-90) & \cos(-90) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_b \\ \Delta Y_b \\ \Delta Z_b \end{bmatrix} \quad (43)$$

Onde:

$(LX, LY, LZ)_{MTJ}$ - coordenadas no sistema de eixos dos MTJ.

$(\Delta X_b, \Delta Y_b, \Delta Z_b)$ - coordenadas no sistema da barragem.

Os Quadros (16, 17 e 18), mostram os valores em milímetros das componentes vetoriais obtidas por topografia para, para cada época levantada, já com as devidas compatibilizações de sistemas de eixos.

QUADRO 16 - COMPONENTES VETORIAIS OBTIDAS PARA AS ÉPOCAS 01 E 02

	17/08/2012					05/09/2012				
	Dados da topografia (mm)					Dados da topografia (mm)				
	ΔX_b	ΔY_b	ΔZ_b	Dist (2D)	Dist (3D)	ΔX_b	ΔY_b	ΔZ_b	Dist (2D)	Dist (3D)
MTJ-02	413,3870	-363,3690	-19,4050	550,3870	550,7290	412,5760	-363,3660	-21,8880	549,7761	550,2117
MTJ-03	308,0670	-231,1090	-15,5650	385,1190	385,4334	307,9880	-232,7050	-17,1860	386,0158	386,3982
MTJ-04	311,4320	-250,2680	-15,8820	399,5297	399,8452	310,4330	-251,1060	-14,0200	399,2779	399,5240
MTJ-05	363,8990	-205,7610	-12,6380	418,0431	418,2341	363,6610	-205,1830	-9,7320	417,5517	417,6651
MTJ-06	293,4440	-275,4130	-21,0250	402,4447	402,9935	292,4350	-277,8020	-20,9900	403,3512	403,8970
MTJ-07	383,5340	-246,6890	-4,2610	456,0195	456,0394	385,1090	-243,1590	-2,7890	455,4506	455,4591
MTJ-08	362,4690	-242,3660	9,2740	436,0333	436,1319	361,1270	-243,1910	10,1370	435,3787	435,4966
MTJ-09	280,3680	-285,3810	-11,4650	400,0607	400,2249	279,5090	-282,0590	-10,2860	397,0926	397,2258
MTJ-10	347,7010	300,8720	18,8130	459,8042	460,1890	348,6870	301,6150	19,0620	461,0360	461,4299
MTJ-11	353,0650	251,5130	9,5930	433,4901	433,5963	353,4630	249,7130	10,5540	432,7732	432,9019
MTJ-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MTJ-13	326,1960	283,7130	-3,7040	432,3157	432,3316	323,5200	288,8330	-13,6930	433,6931	433,9092
MTJ-16	-	-	-	-	-	408,3900	308,7440	-56,7470	511,9622	515,0975
MTJ-17	302,4528	292,2484	-10,5369	420,5791	420,7111	302,8980	287,5280	-11,2220	417,6357	417,7864
MTJ-18	289,8388	260,0640	-16,2143	389,4095	389,7469	289,2820	257,9300	-18,9980	387,5719	388,0372
MTJ-20	432,3970	239,9142	31,2975	494,4957	495,4851	434,6460	240,6430	27,6530	496,8161	497,5851
MTJ-21	286,6750	249,3270	22,8570	379,9296	380,6165	282,0220	248,2030	31,2840	375,6876	376,9878
MTJ-22	399,8130	-344,9600	-50,0510	528,0604	530,4271	401,3550	-344,5190	-42,4700	528,9416	530,6438
MTJ-23	295,3090	304,9720	9,2610	424,5178	424,6188	292,7290	303,3780	15,1300	421,5786	421,8500
MTJ-24	254,5020	325,5870	-33,4670	413,2531	414,6061	255,6060	324,1560	-28,7620	412,8093	413,8101
MTJ-25	393,9760	287,6030	9,1570	487,7833	487,8693	390,0180	283,7970	17,3130	482,3430	482,6536
MTJ-27	-	-	-	-	-	401,2980	-267,1730	-36,1700	482,1011	483,4561

Fonte: O Autor (2013).

QUADRO 17 - COMPONENTES VETORIAIS OBTIDAS PARA AS ÉPOCAS 03 E 04

	07/11/2012					20/03/2013				
	Dados da topografia (mm)					Dados da topografia (mm)				
	ΔX_b	ΔY_b	ΔZ_b	Dist (2D)	Dist (3D)	ΔX_b	ΔY_b	ΔZ_b	Dist (2D)	Dist (3D)
MTJ-02	413,9230	-362,9240	-21,7210	550,4962	550,9246	415,4940	-361,8480	-24,9350	550,9712	551,5351
MTJ-03	307,7080	-233,3200	-16,5600	386,1637	386,5187	314,1350	-231,7600	-10,7800	390,3761	390,5249
MTJ-04	311,5750	-252,1360	-16,9310	400,8136	401,1710	310,9780	-246,7250	-14,2860	396,9642	397,2211
MTJ-05	364,8970	-205,6140	-13,5670	418,8400	419,0597	364,1940	-206,6910	-8,6280	418,7582	418,8471
MTJ-06	291,7990	-277,0250	-21,9630	402,3550	402,9539	297,3140	-279,4640	-22,9450	408,0389	408,6835
MTJ-07	383,5860	-244,3420	-3,3340	454,7980	454,8102	381,8590	-245,4690	2,9950	453,9508	453,9607
MTJ-08	359,9310	-241,7600	13,6770	433,5876	433,8033	361,7230	-240,4750	5,1500	434,3636	434,3941
MTJ-09	279,7090	-284,7100	-7,8920	399,1202	399,1982	282,3850	-286,0570	-8,9210	401,9576	402,0566
MTJ-10	346,3890	298,8260	-16,8170	457,4738	457,7828	344,3450	296,9520	-14,3860	454,7021	454,9296
MTJ-11	352,6100	249,6120	-8,5150	432,0185	432,1024	352,4970	250,5430	-3,5420	432,4649	432,4795
MTJ-12	321,8700	215,9240	-18,4740	387,5867	388,0268	320,1560	214,1320	-20,9910	385,1654	385,7370
MTJ-13	322,3880	286,2010	14,4720	431,0975	431,3403	322,3340	286,8130	9,7540	431,4637	431,5739
MTJ-16	405,8520	310,1270	55,2540	510,7784	513,7583	404,9660	308,6070	54,3520	509,1520	512,0448
MTJ-17	303,0340	292,7770	10,0970	421,3644	421,4854	302,1090	294,8500	10,3880	422,1450	422,2728
MTJ-18	290,3950	262,1980	13,4300	391,2506	391,4810	-	-	-	-	-
MTJ-20	432,8310	239,3620	-29,6340	494,6078	495,4947	431,4010	240,1020	-34,9620	493,7163	494,9527
MTJ-21	284,2160	246,4360	-30,7820	376,1774	377,4347	284,0770	247,7090	-33,0830	376,9078	378,3569
MTJ-22	400,1210	-347,4900	39,0070	529,9492	531,3828	401,8030	-346,0670	35,1740	530,2905	531,4558
MTJ-23	292,3630	304,1170	-14,4300	421,8569	422,1037	294,6430	303,3120	-16,2530	422,8625	423,1747
MTJ-24	256,8580	323,2700	27,7230	412,8917	413,8213	257,2160	325,4020	30,7000	414,7849	415,9195
MTJ-25	392,7300	286,2850	-19,7360	486,0000	486,4005	-	-	-	-	-
MTJ-27	398,5580	-271,7890	-36,5790	482,4083	483,7931	-	-	-	-	-

Fonte: O Autor (2013).

QUADRO 18 - COMPONENTES VETORIAIS OBTIDAS PARA A ÉPOCA 05

21/11/2013					
Dados da topografia (mm)					
	ΔX_b	ΔY_b	ΔZ_b	Dist (2D)	Dist (3D)
MTJ-02	414,2330	-363,1120	-23,0820	550,8532	551,3366
MTJ-03	314,1540	-229,3930	-10,9310	388,9909	389,1444
MTJ-04	311,5490	-246,9670	-14,2290	397,5619	397,8165
MTJ-05	363,9800	-205,2530	-6,4270	417,8639	417,9133
MTJ-06	297,0160	-277,5000	-22,9860	406,4785	407,1279
MTJ-07	382,8220	-245,8590	0,8910	454,9718	454,9727
MTJ-08	361,6910	-240,6450	4,2110	434,4311	434,4515
MTJ-09	281,4630	-285,9430	-9,2270	401,2291	401,3352
MTJ-10	343,9430	296,9500	-15,8680	454,3964	454,6734
MTJ-11	352,4500	250,5930	-3,5740	432,4556	432,4704
MTJ-12	320,0640	215,7600	-20,5470	385,9966	386,5430
MTJ-13	324,5160	286,7750	10,9580	433,0711	433,2097
MTJ-16	403,9160	308,9290	56,0740	508,5128	511,5951
MTJ-17	301,7710	293,8390	10,4420	421,1972	421,3266
MTJ-18	-	-	-	-	-
MTJ-20	430,7100	239,5500	-32,9420	492,8441	493,9438
MTJ-21	285,1290	246,1240	-34,3390	376,6637	378,2258
MTJ-22	401,6830	-343,9650	35,5340	528,8300	530,0225
MTJ-23	293,6700	301,6820	-15,9400	421,0156	421,3172
MTJ-24	257,8600	325,3390	29,3970	415,1352	416,1748
MTJ-25	-	-	-	-	-
MTJ-27	397,0250	-268,4640	-35,0590	479,2721	480,5527

Fonte: O Autor (2013).

De posse dos valores das leituras dos MTJ e dos valores de coordenadas obtidos por topografia, pode-se calcular os deslocamentos acumulados ao longo das épocas. Para tanto, subtrai-se dos valores obtidos para cada época ($t_0 + n$) os valores relativos a época de referência t_0 (aqui adotada como a época 17/08/12). No QUADRO 19 a seguir mostra-se os valores das variações (DX_b , DY_b , DZ_b) obtidos para as componentes vetoriais.

QUADRO 19 – DIFERENÇAS OBTIDAS PARA AS COMPONENTES VETORIAIS (TOPOGRAFIA) .

	1 & 2 - (Valores em mm)					1 & 3 - (Valores em mm)					1 & 4 - (Valores em mm)					1 & 5 - (Valores em mm)				
	D X _b	DY _b	DZ _b	(2D)	(3D)	D X _b	DY _b	DZ _b	(2D)	(3D)	D X _b	DY _b	DZ _b	(2D)	(3D)	D X _b	DY _b	DZ _b	(2D)	(3D)
MTJ-02	-0,81	0	-2,48	0,81	2,61	0,54	0,45	-2,32	0,7	2,42	2,11	1,52	-5,53	2,6	6,11	0,85	0,26	-3,68	0,88	3,78
MTJ-03	-0,08	-1,6	-1,62	1,6	2,28	-0,36	-2,21	-1	2,24	2,45	6,07	-0,65	4,79	6,1	7,76	6,09	1,72	4,63	6,32	7,84
MTJ-04	-1	-0,84	1,86	1,3	2,27	0,14	-1,87	-1,05	1,87	2,15	-0,45	3,54	1,6	3,57	3,91	0,12	3,3	1,65	3,3	3,69
MTJ-05	-0,24	0,58	2,91	0,63	2,97	1	0,15	-0,93	1,01	1,37	0,29	-0,93	4,01	0,98	4,13	0,08	0,51	6,21	0,51	6,23
MTJ-06	-1,01	-2,39	0,03	2,59	2,59	-1,64	-1,61	-0,94	2,3	2,49	3,87	-4,05	-1,92	5,6	5,92	3,57	-2,09	-1,96	4,14	4,58
MTJ-07	1,58	3,53	1,47	3,87	4,14	0,05	2,35	0,93	2,35	2,52	-1,67	1,22	7,26	2,07	7,55	-0,71	0,83	5,15	1,09	5,27
MTJ-08	-1,34	-0,83	0,86	1,58	1,8	-2,54	0,61	4,4	2,61	5,12	-0,75	1,89	-4,12	2,03	4,6	-0,78	1,72	-5,06	1,89	5,4
MTJ-09	-0,86	3,32	1,18	3,43	3,63	-0,66	0,67	3,57	0,94	3,69	2,02	-0,68	2,54	2,13	3,32	1,1	-0,56	2,24	1,23	2,55
MTJ-10	0,99	0,74	0,25	1,23	1,26	-1,31	-2,05	-2	2,43	3,15	-3,36	-3,92	-4,43	5,16	6,8	-3,76	-3,92	-2,94	5,43	6,18
MTJ-11	0,4	-1,8	0,96	1,84	2,08	-0,46	-1,9	-1,08	1,95	2,23	-0,57	-0,97	-6,05	1,12	6,15	-0,61	-0,92	-6,02	1,11	6,12
MTJ-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MTJ-13	-2,68	5,12	-9,99	5,78	11,54	-3,81	2,49	-10,77	4,55	11,69	-3,86	3,1	-6,05	4,95	7,82	-1,68	3,06	-7,25	3,49	8,05
MTJ-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MTJ-17	0,45	-4,72	-0,69	1,92	35,29	0,76	7,07	-34,11	7,11	34,85	-0,17	9,14	-34,4	9,14	35,6	-0,5	8,13	-34,46	8,14	35,41
MTJ-18	-0,56	-2,13	-2,78	5,95	35,95	0,71	-1,67	-29,89	1,82	29,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MTJ-20	2,25	0,73	-3,64	7,15	46,19	5,21	0,03	-43,65	5,21	43,96	3,78	0,77	-38,33	3,86	38,52	3,09	0,22	-40,35	3,1	40,47
MTJ-21	-4,65	-1,12	8,43	4,79	9,69	-2,46	-2,89	7,93	3,8	8,79	-2,6	-1,62	10,23	3,06	10,67	-1,55	-3,2	11,48	3,56	12,02
MTJ-22	1,54	0,44	7,58	1,6	7,75	0,31	-2,53	11,04	2,55	11,33	1,99	-1,11	14,88	2,28	15,05	1,87	0,99	14,52	2,12	14,67
MTJ-23	-2,58	-1,59	5,87	3,03	6,61	-2,95	-0,86	5,17	3,07	6,01	-0,67	-1,66	6,99	1,79	7,22	-1,64	-3,29	6,68	3,68	7,62
MTJ-24	1,1	-1,43	4,71	1,81	5,04	2,36	-2,32	5,74	3,3	6,63	2,71	-0,19	2,77	2,72	3,88	3,36	-0,25	4,07	3,37	5,28
MTJ-25	-3,96	-3,81	8,16	5,49	9,83	-1,25	-1,32	10,58	1,81	10,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MTJ-27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: O Autor (2013).

É conveniente mencionar que por não haver dados para o ponto MTJ 12 na época de referência, não há como mostrar deslocamentos para o mesmo. Ao longo das campanhas foram perdidos alguns pontos em função da instalação de novos equipamentos dentro da galeria de inspeção, por parte do corpo técnico da UHE Mauá. Alguns suportes de prismas fixados tiveram visadas obstruídas ou sofreram danos permanentes, inviabilizando seu uso. Nos QUADROS 20 e 21 a seguir, mostra-se os valores de variação (DLX,DLY,DLZ) obtidos através das leituras feitas nos MTJ, tomando-se a época 17/08/12 (época zero) como referência.

QUADRO 20 - DIFERENÇAS OBTIDAS PARA OS MTJ.

	1 & 2 - (Valores em mm)					1 & 3 - (Valores em mm)				
	DL X	DL Y	DLZ	Dist (2D)	Dist (3D)	DL X	DL Y	DLZ	Dist (2D)	Dist (3D)
MTJ-02	0,03	-0,26	-0,27	0,26	0,38	-0,04	0,00	0,01	0,04	0,04
MTJ-03	-0,26	-0,26	-0,07	0,37	0,37	0,08	-0,02	0,00	0,08	0,08
MTJ-04	-0,23		-0,25	0,23	0,34	0,15		0,02	0,15	0,15
MTJ-05	-0,37	-0,34	-0,32	0,50	0,60	-0,03	-0,11	-0,10	0,12	0,15
MTJ-06	-0,23	-0,21	-0,25	0,31	0,40	-0,05	-0,06	0,00	0,08	0,08
MTJ-07	-0,22	-0,23	-0,24	0,32	0,40	-0,05	-0,08	-0,04	0,10	0,11
MTJ-08	-0,23	-0,27	-0,25	0,35	0,43	-2,89	-0,10	-0,07	2,89	2,89
MTJ-09	-0,22	-0,16	-0,20	0,27	0,34	0,04	0,19	-0,02	0,20	0,20
MTJ-10	-0,15	-0,13	-0,17	0,20	0,26	0,15	0,08	0,09	0,17	0,19
MTJ-11	-0,26	-0,14	-0,20	0,30	0,36	-0,25	0,14	0,01	0,29	0,29
MTJ-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MTJ-13	-0,17	-0,27	-0,19	0,32	0,37	-0,07	-0,02	-0,01	0,07	0,07
MTJ-16	-0,18	-0,19	-0,15	0,26	0,30	0,10	0,04	0,12	0,11	0,16
MTJ-17	-0,25	-0,20	-0,20	0,32	0,38	0,13	-0,13	0,01	0,19	0,19
MTJ-18	-0,16	-0,16	-0,19	0,23	0,30	0,06	0,03	0,04	0,07	0,08
MTJ-20	-0,18	-0,19	-0,21	0,26	0,34	-0,07	-0,09	-0,04	0,11	0,12
MTJ-21	-0,30	-0,23	-0,25	0,38	0,45	0,18	0,04	0,11	0,19	0,22
MTJ-22	-0,26	-0,24	-0,24	0,35	0,43	0,20	0,09	0,16	0,22	0,27
MTJ-23	0,05	0,07	0,10	0,09	0,13	-0,14	-0,11	-0,01	0,18	0,18
MTJ-24	-0,02	0,03	0,19	0,04	0,19	-0,15	-0,13	0,39	0,20	0,44
MTJ-25	0,17	0,14	0,17	0,22	0,28	0,18	0,15	0,21	0,23	0,31
MTJ-27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: O Autor (2013).

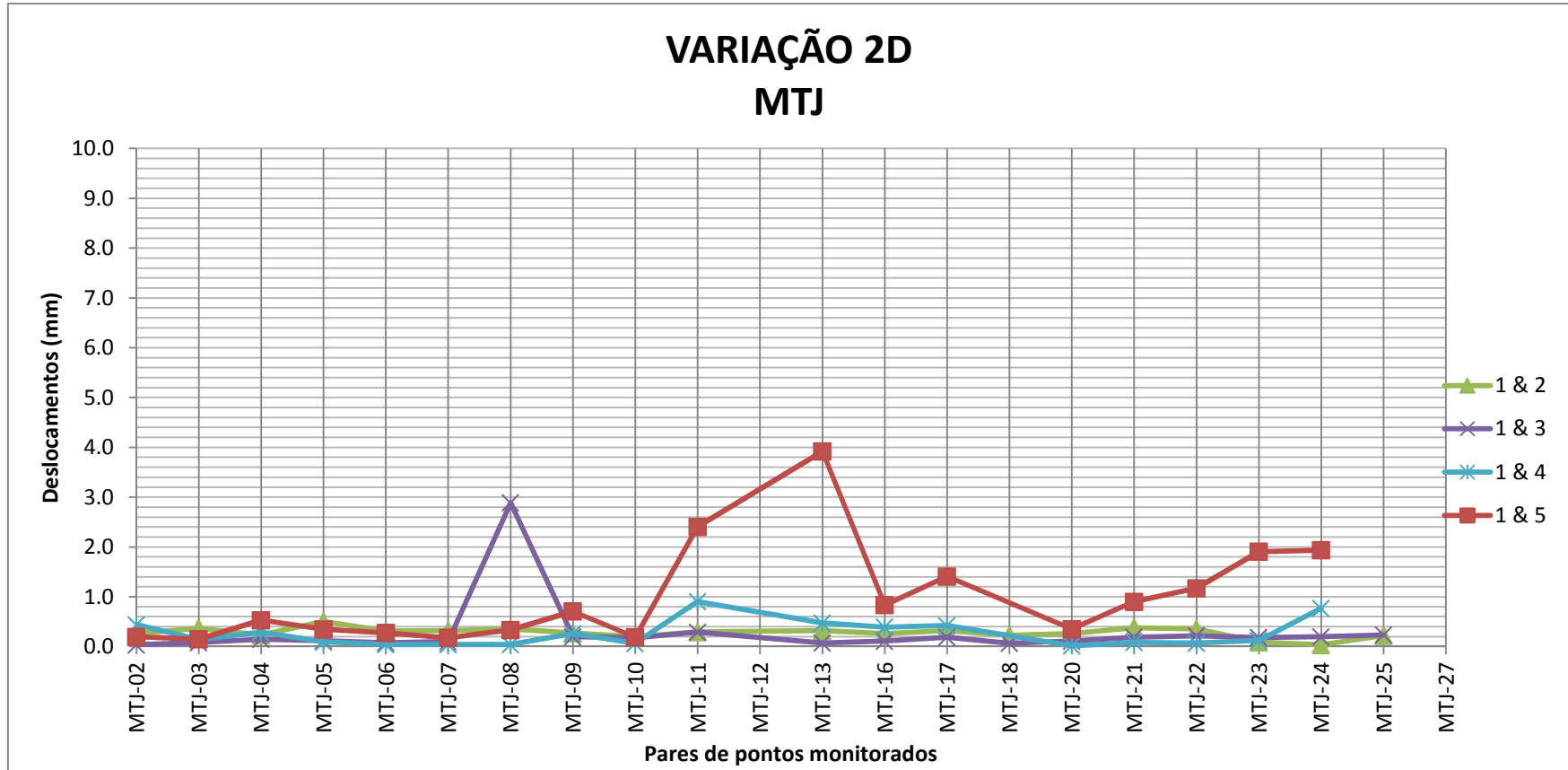
QUADRO 21 - DIFERENÇAS OBTIDAS PARA OS MTJ .

	1 & 4 - (Valores em mm)					1 & 5 - (Valores em mm)				
	DL X	DL Y	DLZ	Dist (2D)	Dist (3D)	DL X	DL Y	DLZ	Dist (2D)	Dist (3D)
MTJ-02	-0,42	-0,13	-0,05	0,44	0,44	-0,10	-0,17	-0,06	0,20	0,21
MTJ-03	-0,05	-0,13	-0,12	0,14	0,18	-0,05	-0,14	-0,14	0,15	0,20
MTJ-04	0,29	0,00	0,07	0,29	0,30	-0,53		-0,19	0,53	0,56
MTJ-05	0,05	-0,08	-0,03	0,09	0,10	-0,25	-0,24	-0,32	0,35	0,47
MTJ-06	0,04	-0,01	0,09	0,04	0,10	-0,23	-0,15	-0,17	0,27	0,32
MTJ-07	0,00	0,04	0,04	0,04	0,06	-0,12	-0,13	-0,12	0,18	0,21
MTJ-08	-0,04	0,00	0,03	0,04	0,05	-0,29	-0,17	-0,14	0,34	0,36
MTJ-09	0,02	0,26	-0,24	0,26	0,35	-0,69	-0,15	-0,60	0,71	0,93
MTJ-10	0,05	0,04	0,02	0,06	0,07	0,08	0,17	-0,33	0,19	0,38
MTJ-11	-0,90	0,06	-0,22	0,90	0,93	-2,36	-0,46	-1,07	2,40	2,63
MTJ-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MTJ-13	-0,47	-0,06	-0,17	0,47	0,50	-3,66	-1,40	-0,16	3,92	3,92
MTJ-16	-0,19	-0,34	-0,20	0,39	0,44	-0,83	0,08	-0,01	0,83	0,83
MTJ-17	-0,10	-0,41	-0,31	0,42	0,52	-1,00	-0,99	-1,03	1,41	1,74
MTJ-18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MTJ-20	-0,01	-0,01	-0,16	0,01	0,16	0,35	0,04	0,27	0,35	0,44
MTJ-21	-0,08	-0,03	0,08	0,09	0,12	0,83	0,35	0,51	0,90	1,04
MTJ-22	-0,07	-0,01	-0,11	0,07	0,13	-0,37	-1,11	-1,52	1,17	1,92
MTJ-23	-0,11	0,05	0,10	0,12	0,16	1,14	-1,53	0,21	1,91	1,92
MTJ-24	-0,66	-0,39	0,50	0,77	0,92	1,93	-0,13	-0,14	1,93	1,94
MTJ-25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MTJ-27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: O Autor (2013).

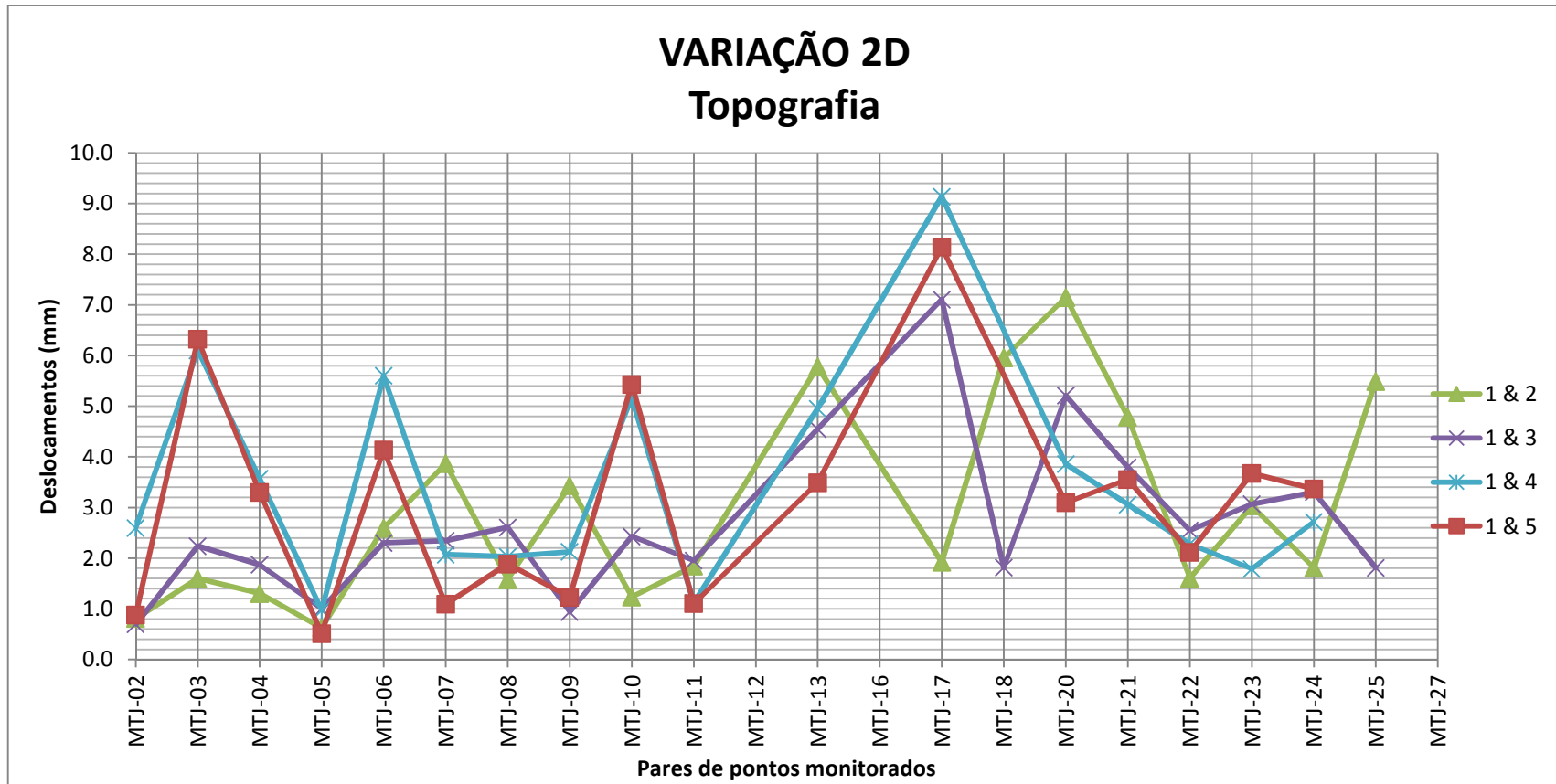
Os deslocamentos 2D e 3D, calculados a partir da variação das componentes DLX, DLY e DLZ (dados dos MTJ) e usados como referência, apresentam magnitudes notoriamente diferentes em relação aos determinados por técnica topográfica, calculados a partir das componentes DX_b , DY_b e DZ_b (dados topográficos). Através das Figuras (21, 22, 23 e 24) a seguir pode-se melhor visualizar essa variação.

FIGURA 21 - COMPORTAMENTO DAS RESULTANTES 2D DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA



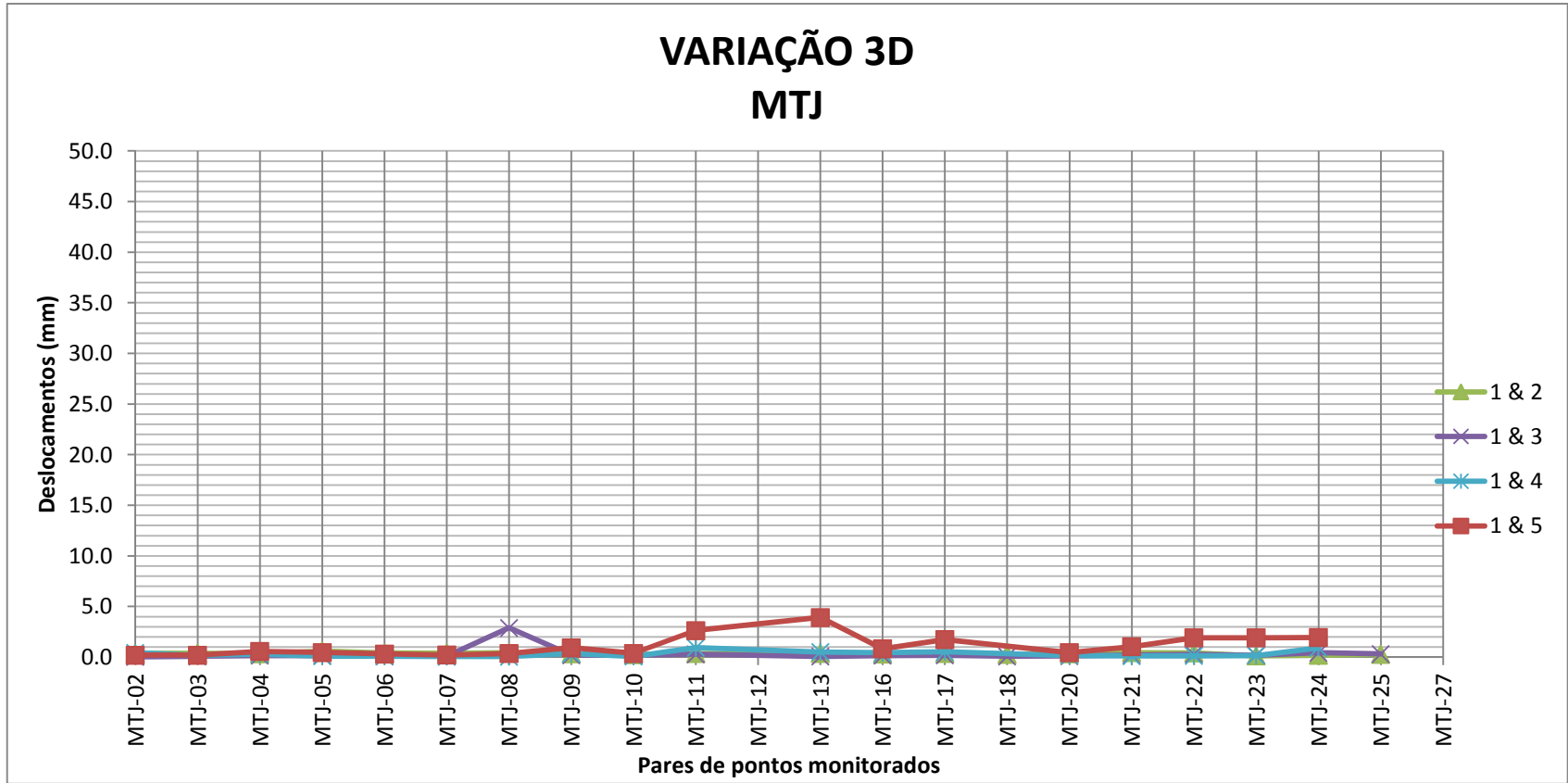
Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 22 - COMPORTAMENTO DAS RESULTANTES 2D OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.



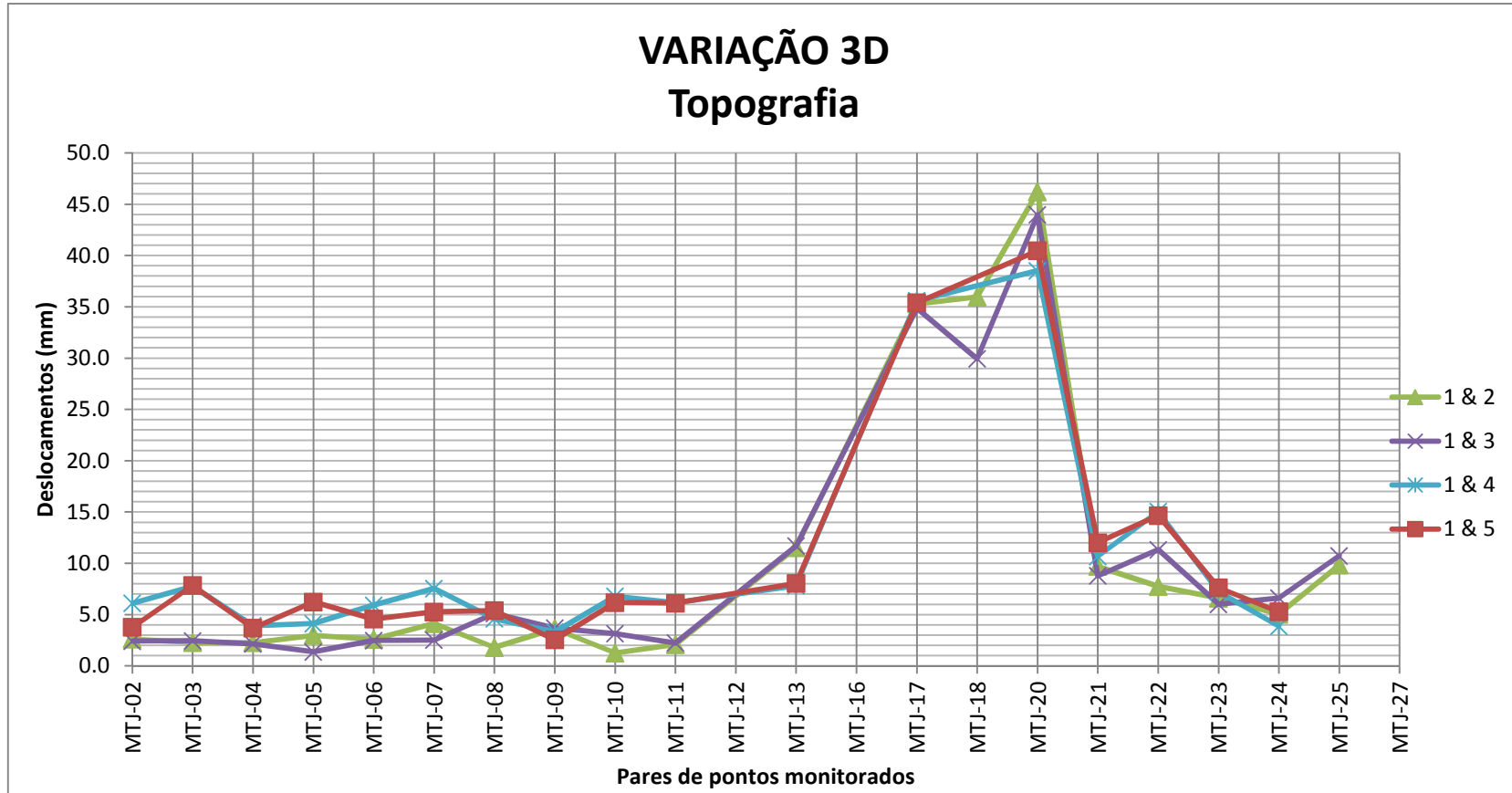
Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 23 - COMPORTAMENTO DA RESULTANTES 3D DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA



Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 24 - COMPORTAMENTO DAS RESULTANTES 3D OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.

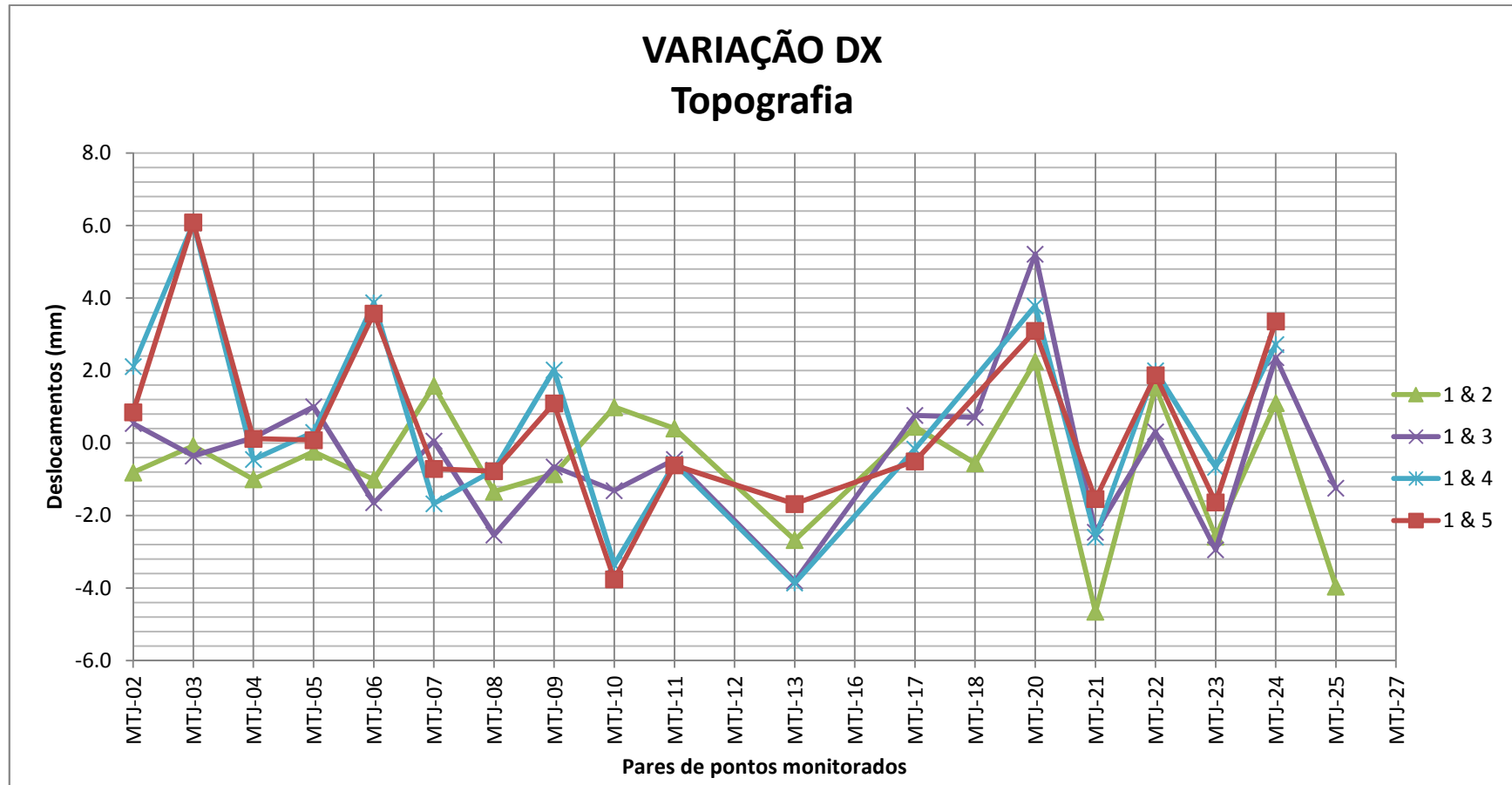


Fonte: O Autor (2013).

No que diz respeito as variações de deslocamento 2D, as amplitudes dos mesmos na FIGURA 21, usada como referência, apresentam variações mínimas quando comparados com a FIGURA 22, destacando-se porém a presença de alguns picos. Na primeira figura, o MTJ-08 se destaca na época 1&3 com aproximadamente 2,89mm enquanto que na segunda figura assume 2,61mm porém, não com o mesmo destaque já que todas as series apresentam picos de amplitude elevada. Cabe lembrar que os valores de deslocamentos obtidos para a série 1&3 na FIGURA 22 são baseados em valores interpolados e que apesar deste fato, indicam semelhança comportamental com relação as demais séries. Outra série que atrai a atenção é a 1&5, apresentando na primeira figura amplitude máxima de 3,92mm no MTJ-13 e na segunda 3,49mm. Entretanto, percebe-se para a segunda figura vários picos de amplitude nesta mesma série, culminando em 8,14mm no MTJ-17.

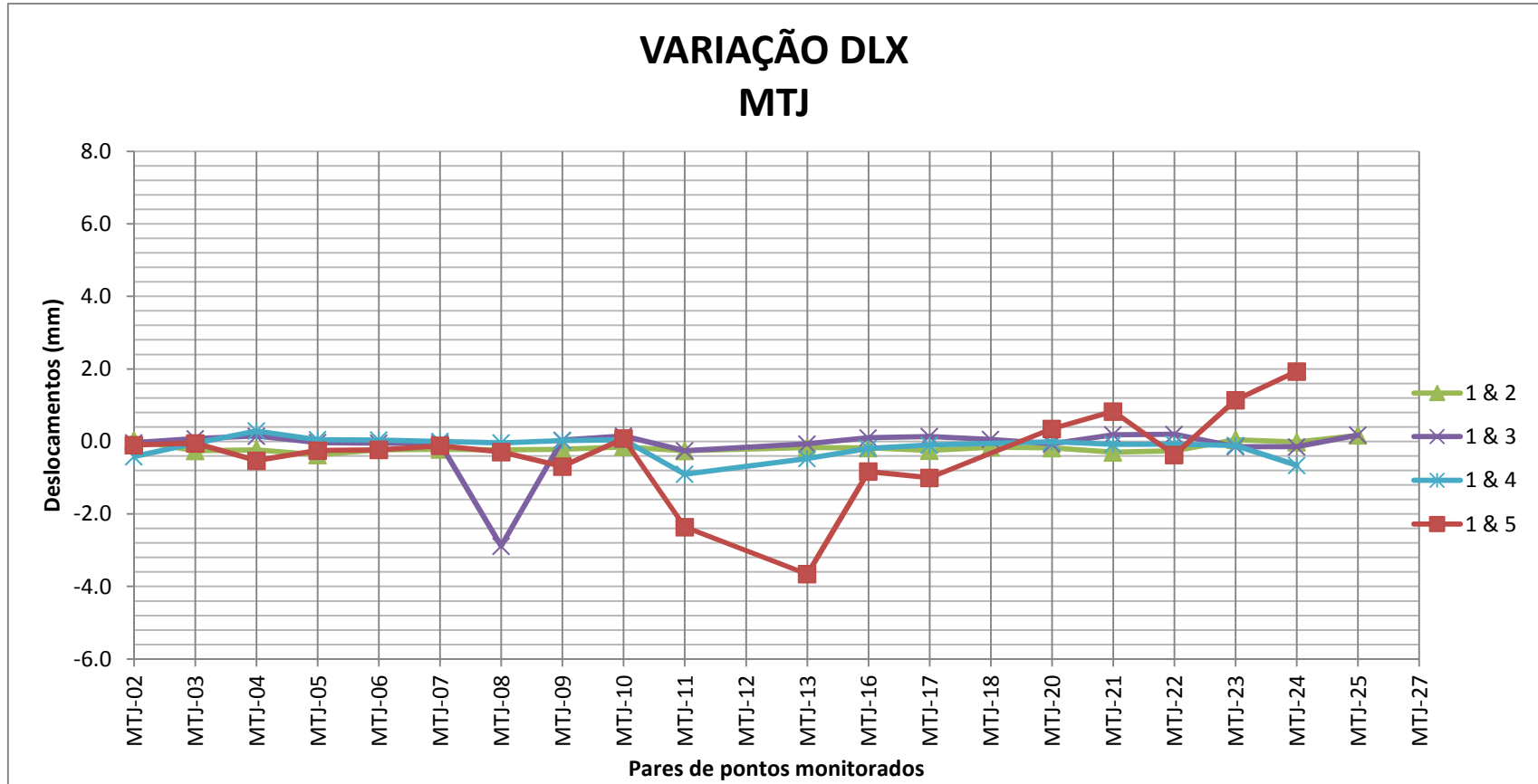
Nas variações de deslocamento 3D das séries da FIGURA 24, percebe-se o mesmo comportamento dispersivo em relação aos valores de referência mostrados na FIGURA 23. Destaca-se o trecho compreendido pelos MTJ-13 a MTJ-21, que apresentam picos da ordem de 40mm para todas as series. Portanto, é interessante uma verificação da variação individual das componentes X, Y e Z de forma a identificar eventuais discrepâncias que possam contribuir com os picos de deslocamentos 2D e 3D .As figuras a seguir mostram o comportamento de cada componente.

FIGURA 25 -COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DX OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.



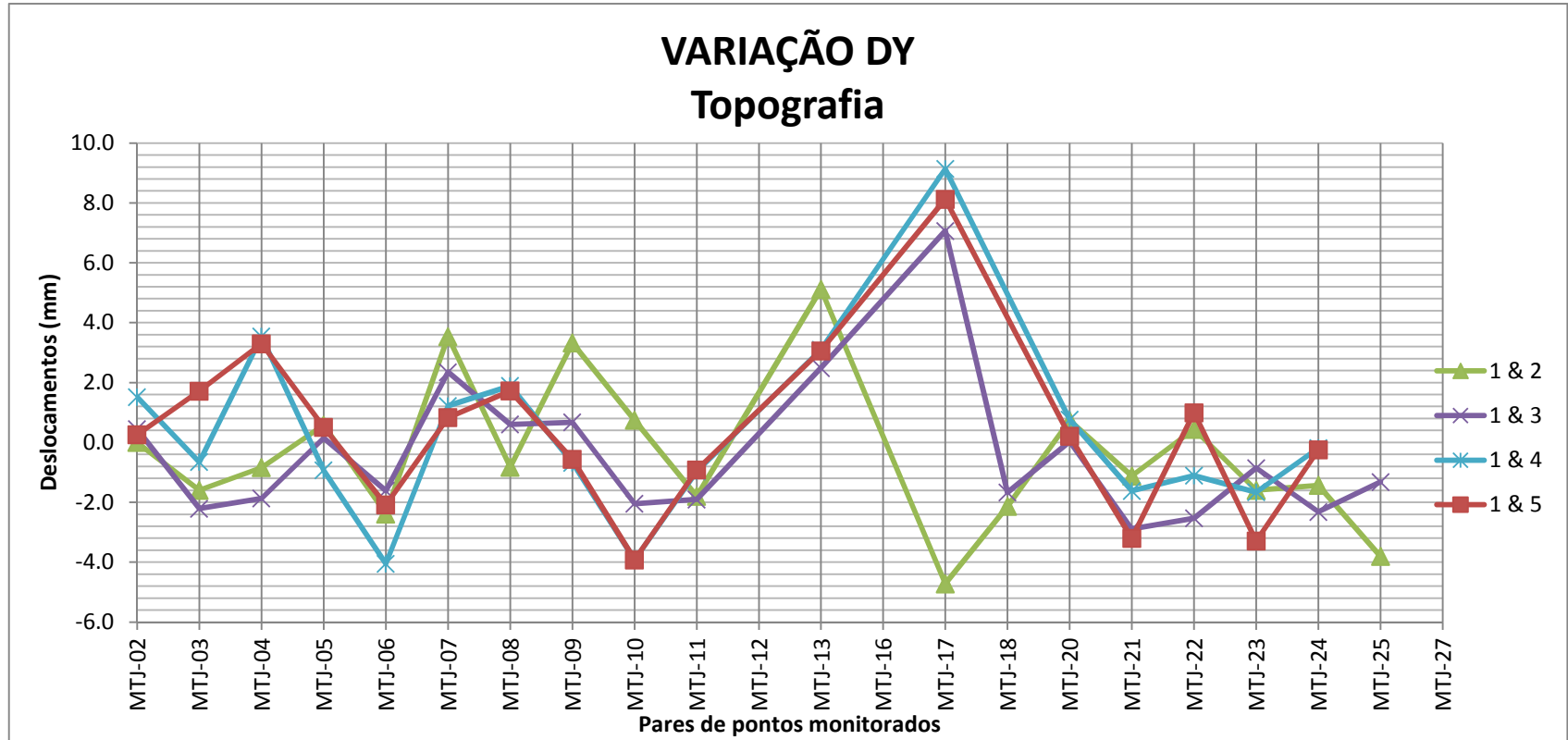
Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 26 - COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DLX DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA.



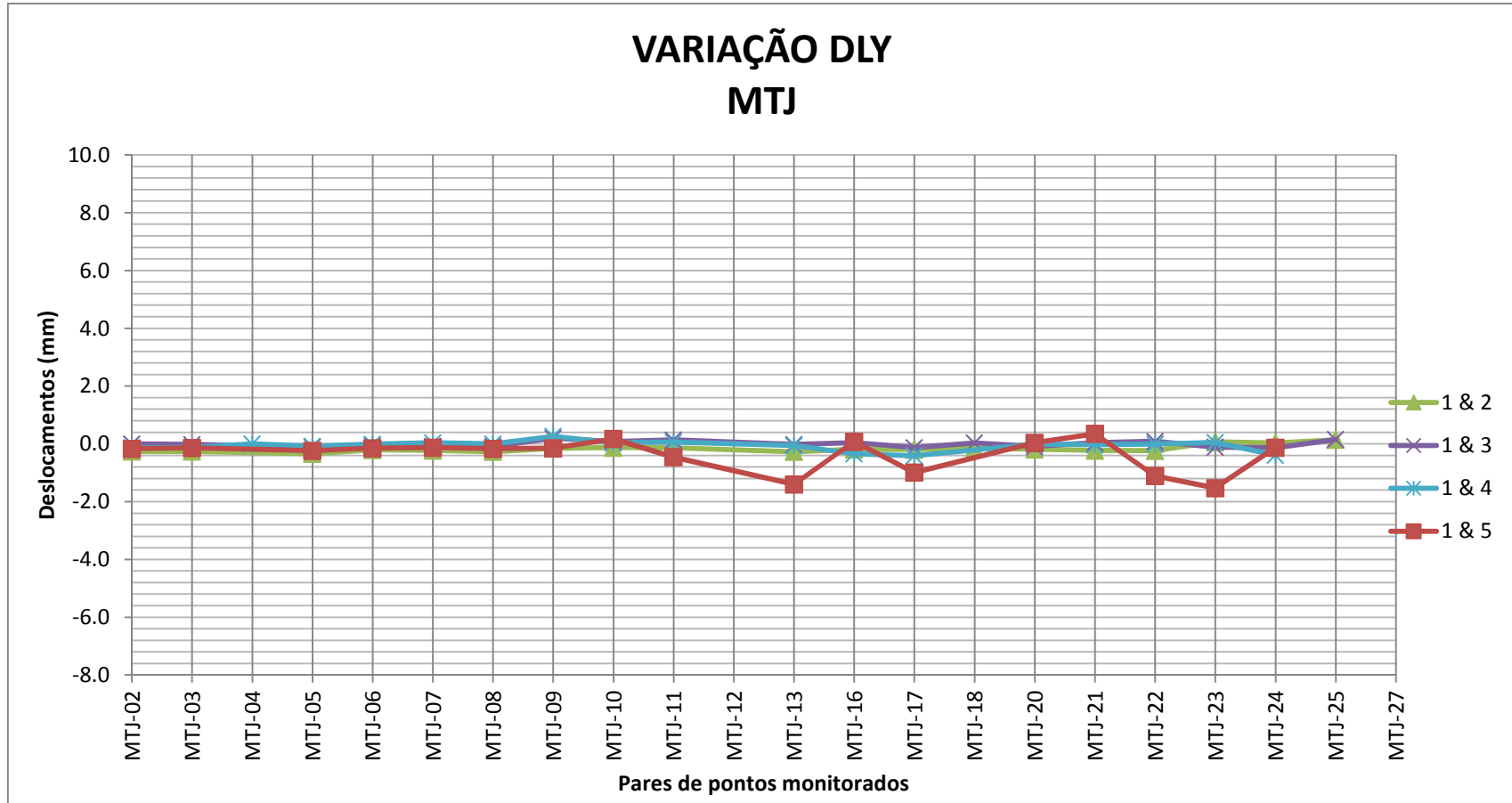
Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 27 COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DY OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.



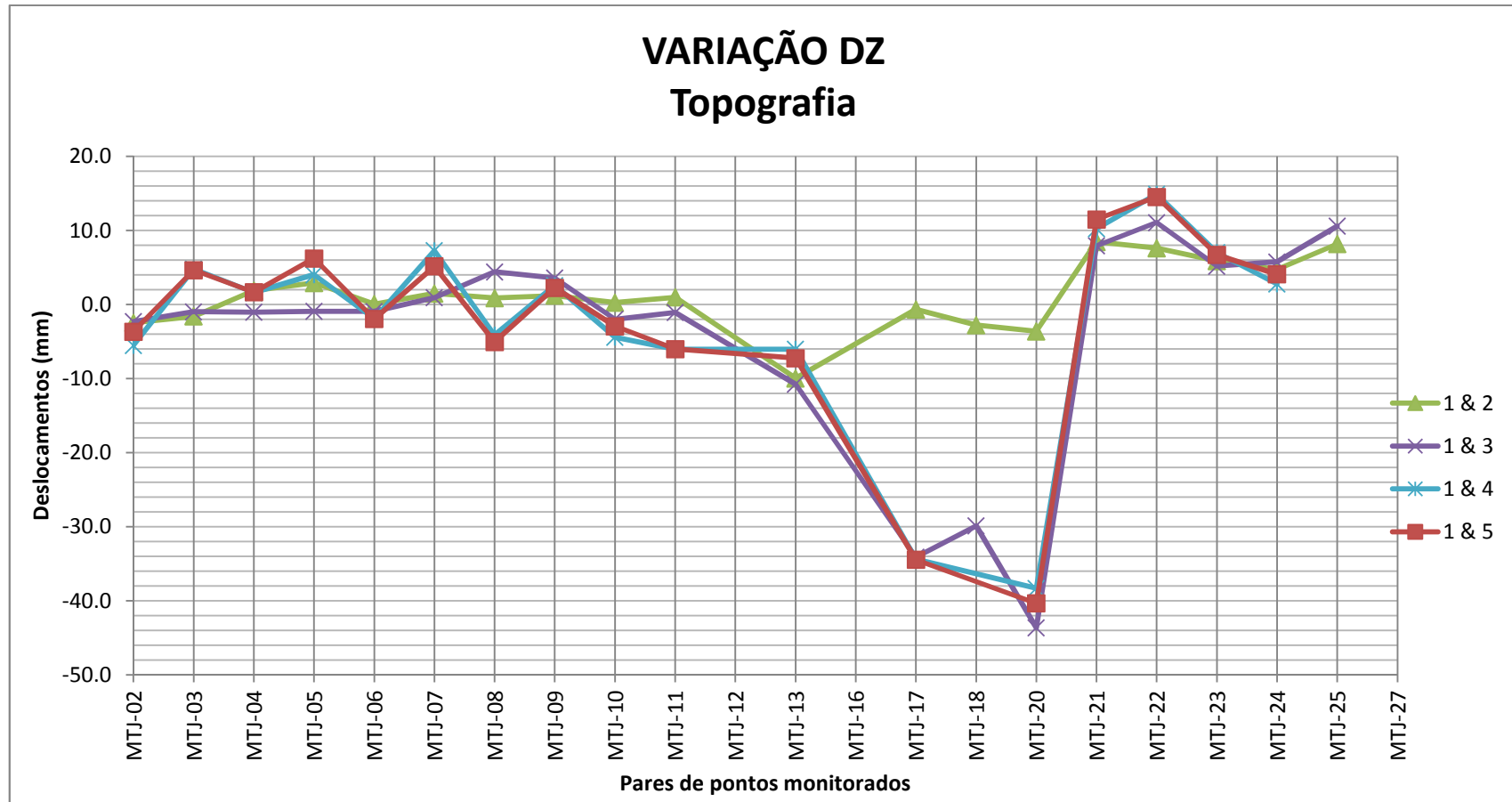
Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 28 -COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DLY DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA.



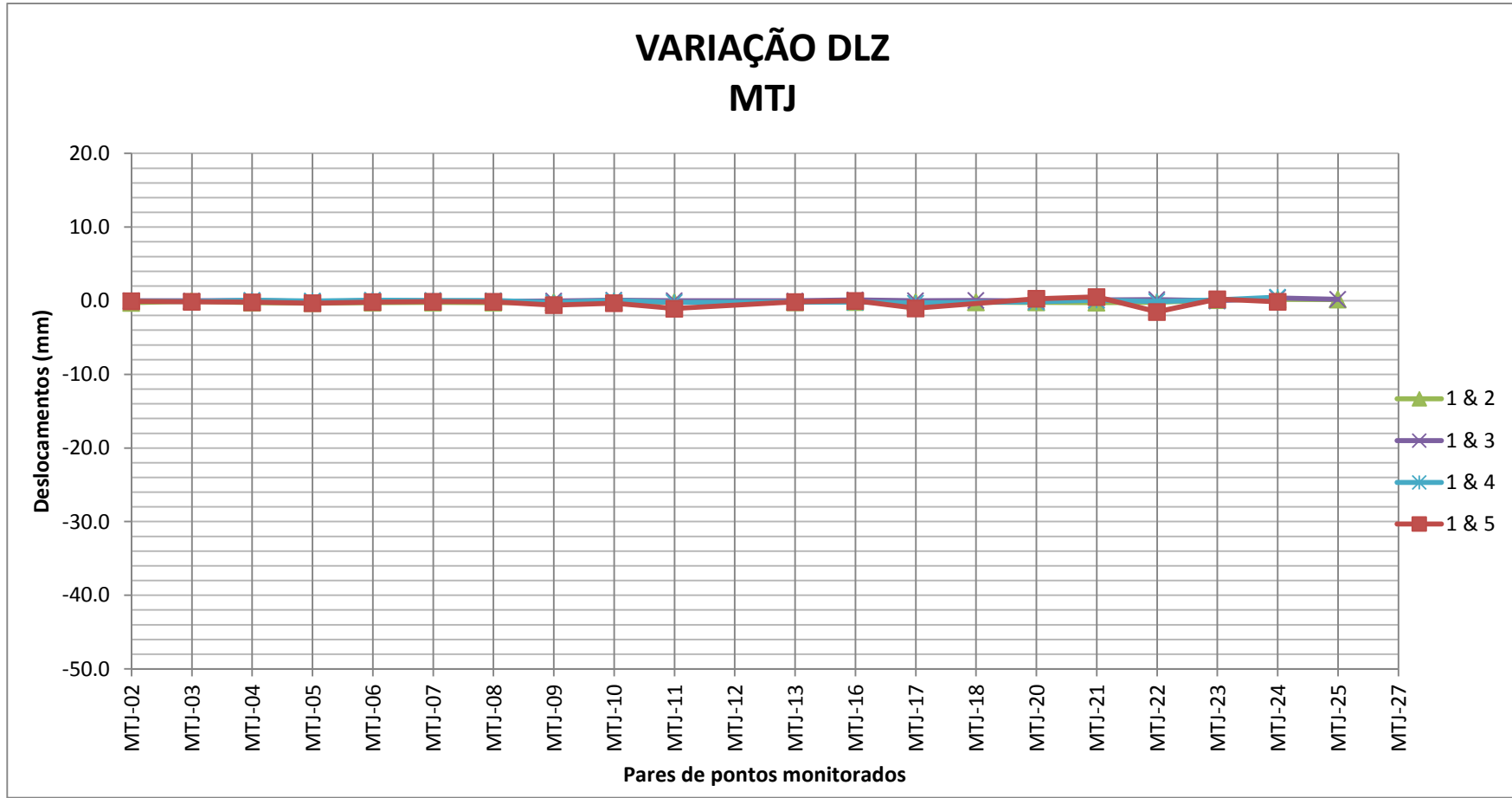
Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 29 - COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DZ OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.



Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 30 - COMPORTAMENTO DA COMPONENTE DLZ DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA.



Fonte: O Autor (2013).

Através das FIGURAS 27 e 29, percebe-se que a série 1&2 da variação das componentes DY e DZ obtidas por topografia, apresentam uma maior discrepância em relação as demais séries para os MTJ-17, MTJ-18 e MTJ-20. Após revisão de todas as etapas de cálculo, levando em conta a magnitude da discrepância na ordem de 40mm, foi possível atribuir tal diferença ao uso ou não de uma pequena peça de adaptação do suporte do prisma para época de referência (17/08/12), nos 3 pontos citados. Após uma revisão das observações de campo, não foram encontradas evidências que pudessem indicar o uso de tal peça e tão pouco foram encontrados registros escritos nas cadernetas de campo, apontando tal ocorrência. Entretanto, haviam registros sobre problemas nas leituras (retorno no sinal EDM) que na ocasião foi atribuída à influência de efeitos de refração lateral (visada de aproximadamente 126m próxima a parede). Em função disso, para execução das campanhas seguintes foi instalada uma estação intermediária a uma distância de aproximadamente 43m, sanando assim o problema para o trecho em questão.

A ocorrência desse fato sugeriu a adoção da segunda campanha (05/09/12) como época de referência, sendo realizada aproximadamente 18 dias após a primeira. Foram então calculados novos deslocamentos e novos gráficos para visualização, os quais são apresentados a seguir.

QUADRO 22 - DIFERENÇAS OBTIDAS PARA AS COMPONENTES VETORIAIS, ADOTANDO A ÉPOCA 02 COMO ORIGEM

	2 & 3 (mm)					2 & 4 (mm)					2 & 5 (mm)				
	D X	DY	DZ	Dist (2D)	Dist (3D)	D X	DY	DZ	Dist (2D)	Dist (3D)	D X	DY	DZ	Dist (2D)	Dist (3D)
MTJ-02	1,35	0,44	0,17	1,42	1,43	2,92	1,52	-3,05	3,29	4,48	1,66	0,25	-1,19	1,68	2,06
MTJ-03	-0,28	-0,62	0,63	0,68	0,92	6,15	0,94	6,41	6,22	8,93	6,17	3,31	6,25	7,00	9,39
MTJ-04	1,14	-1,03	-2,91	1,54	3,29	0,54	4,38	-0,27	4,41	4,42	1,12	4,14	-0,21	4,29	4,29
MTJ-05	1,24	-0,43	-3,83	1,31	4,05	0,53	-1,51	1,10	1,60	1,94	0,32	-0,07	3,31	0,33	3,32
MTJ-06	-0,64	0,78	-0,97	1,00	1,40	4,88	-1,66	-1,95	5,15	5,51	4,58	0,30	-2,00	4,59	5,01
MTJ-07	-1,52	-1,18	-0,54	1,93	2,00	-3,25	-2,31	5,78	3,99	7,03	-2,29	-2,70	3,68	3,54	5,11
MTJ-08	-1,20	1,43	3,54	1,86	4,00	0,60	2,72	-4,99	2,78	5,71	0,56	2,55	-5,93	2,61	6,47
MTJ-09	0,20	-2,65	2,39	2,66	3,58	2,88	-4,00	1,36	4,92	5,11	1,95	-3,88	1,06	4,35	4,47
MTJ-10	-2,30	-2,79	-2,25	3,61	4,25	-4,34	-4,66	-4,68	6,37	7,90	-4,74	-4,66	-3,19	6,65	7,38
MTJ-11	-0,85	-0,10	-2,04	0,86	2,21	-0,97	0,83	-7,01	1,27	7,13	-1,01	0,88	-6,98	1,34	7,11
MTJ-12															
MTJ-13	-1,13	-2,63	-0,78	2,87	2,97	-1,19	-2,02	3,94	2,34	4,58	1,00	-2,06	2,74	2,29	3,56
MTJ-16	-2,54	1,38	1,49	2,89	3,25	-3,42	-0,14	2,39	3,43	4,18	-4,47	0,19	0,67	4,48	4,53
MTJ-17	0,14	5,25	1,13	5,25	5,37	-0,79	7,32	0,83	7,36	7,41	-1,13	6,31	0,78	6,41	6,46
MTJ-18	1,11	4,27	5,57	4,41	7,10										
MTJ-20	-1,82	-1,28	1,98	2,22	2,98	-3,24	-0,54	7,31	3,29	8,02	-3,94	-1,09	5,29	4,08	6,68
MTJ-21	2,19	-1,77	-0,50	2,82	2,86	2,05	-0,49	1,80	2,11	2,78	3,11	-2,08	3,05	3,74	4,83
MTJ-22	-1,23	-2,97	3,46	3,22	4,73	0,45	-1,55	7,30	1,61	7,47	0,33	0,55	6,94	0,64	6,97
MTJ-23	-0,37	0,74	-0,70	0,82	1,08	1,91	-0,07	1,12	1,92	2,22	0,94	-1,70	0,81	1,94	2,10
MTJ-24	1,25	-0,89	1,04	1,53	1,85	1,61	1,25	-1,94	2,04	2,81	2,25	1,18	-0,63	2,55	2,62
MTJ-25	2,71	2,49	2,42	3,68	4,41										
MTJ-27	-2,74	-4,62	-0,41	5,37	5,38						-4,27	-1,29	1,11	4,46	4,60

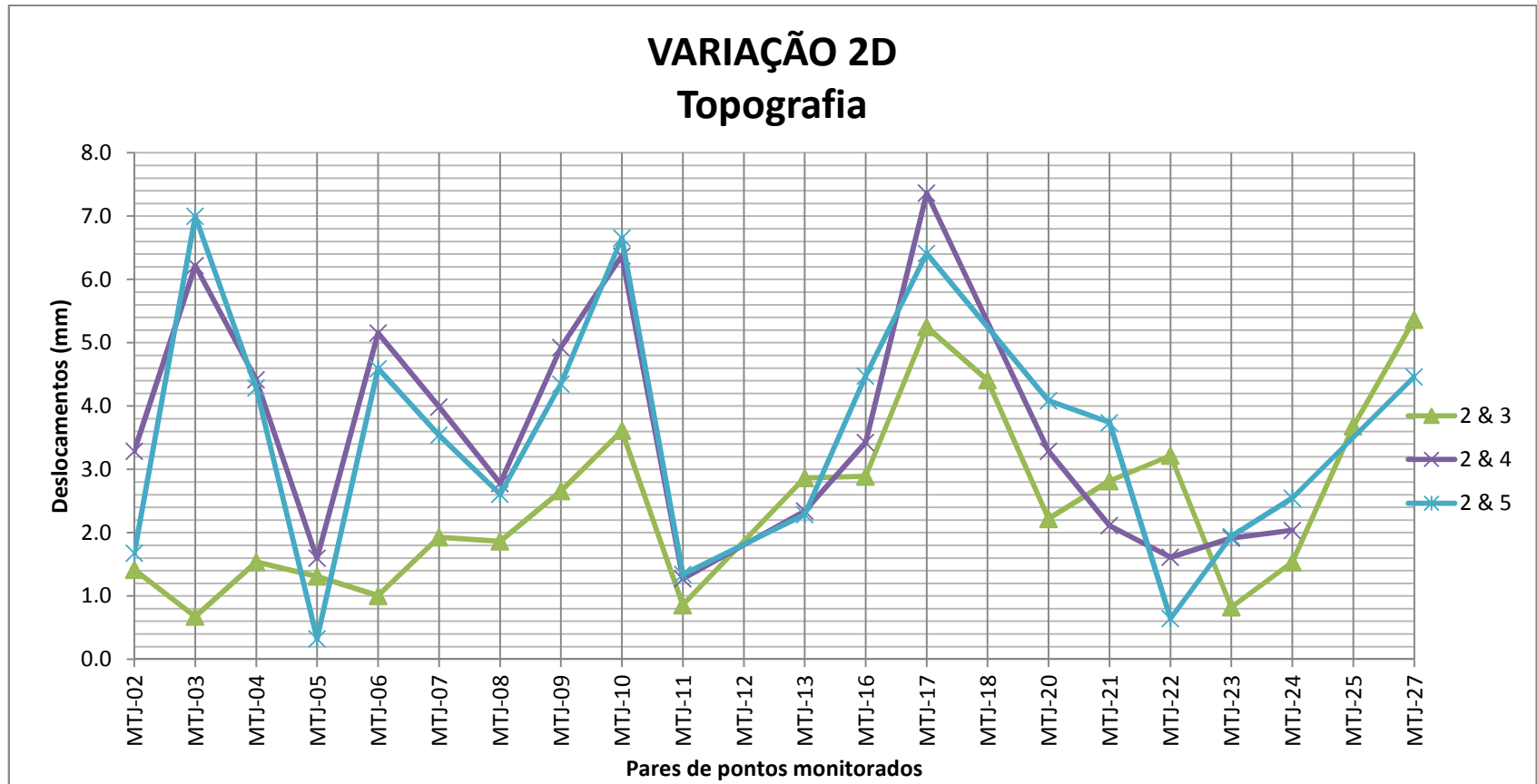
Fonte: O Autor (2013).

QUADRO 23 - DIFERENÇAS OBTIDAS PARA OS MTJ, ADOTANDO A ÉPOCA 02 COMO ORIGEM

	2 & 3 (mm)					2 & 4 (mm)					2 & 5 (mm)				
	DL X	DL Y	DLZ	Dist (2D)	Dist (3D)	DL X	DL Y	DLZ	Dist (2D)	Dist (3D)	DL X	DL Y	DLZ	Dist (2D)	Dist (3D)
MTJ-02	-0,07	0,26	0,28	0,27	0,39	-0,45	0,13	0,22	0,47	0,52	-0,13	0,09	0,21	0,16	0,26
MTJ-03	0,34	0,24	0,07	0,41	0,42	0,21	0,13	-0,05	0,25	0,25	0,21	0,12	-0,07	0,24	0,25
MTJ-04	0,38	0,25	0,27	0,46	0,53	0,52		0,32			-0,30	-0,05	0,06	0,30	0,31
MTJ-05	0,34	0,23	0,22	0,41	0,46	0,42	0,26	0,29	0,49	0,57	0,12	0,10	0,00	0,16	0,16
MTJ-06	0,18	0,15	0,25	0,24	0,34	0,27	0,20	0,34	0,34	0,48	0,00	0,06	0,08	0,06	0,10
MTJ-07	0,17	0,15	0,20	0,22	0,30	0,22	0,27	0,28	0,35	0,45	0,10	0,10	0,12	0,14	0,19
MTJ-08	-2,66	0,17	0,18	2,66	2,67	0,19	0,27	0,28	0,33	0,43	-0,06	0,10	0,11	0,12	0,16
MTJ-09	0,26	0,35	0,18	0,44	0,47	0,24	0,42	-0,04	0,48	0,49	-0,47	0,01	-0,40	0,47	0,62
MTJ-10	0,30	0,21	0,26	0,37	0,45	0,20	0,17	0,19	0,26	0,32	0,23	0,30	-0,16	0,38	0,41
MTJ-11	0,01	0,28	0,21	0,28	0,35	-0,64	0,20	-0,02	0,67	0,67	-2,10	-0,32	-0,87	2,12	2,30
MTJ-12	0,17	0,14	0,19	0,22	0,29	-0,09	-0,04	-0,02	0,10	0,10	0,62	0,92	-0,04	1,11	1,11
MTJ-13	0,10	0,25	0,18	0,27	0,33	-0,30	0,21	0,02	0,37	0,37	-3,49	-1,13	0,03	3,67	3,67
MTJ-16	0,28	0,23	0,27	0,37	0,45	-0,01	-0,15	-0,05	0,15	0,16	-0,65	0,27	0,14	0,70	0,72
MTJ-17	0,38	0,07	0,21	0,39	0,45	0,15	-0,21	-0,11	0,26	0,28	-0,75	-0,79	-0,83	1,09	1,37
MTJ-18	0,22	0,19	0,23	0,29	0,37										
MTJ-20	0,11	0,10	0,17	0,15	0,23	0,17	0,18	0,05	0,25	0,25	0,53	0,23	0,48	0,58	0,75
MTJ-21	0,48	0,27	0,36	0,55	0,66	0,22	0,20	0,33	0,30	0,44	1,13	0,58	0,76	1,27	1,48
MTJ-22	0,46	0,33	0,40	0,56	0,69	0,19	0,23	0,13	0,30	0,33	-0,11	-0,87	-1,28	0,88	1,55
MTJ-23	-0,19	-0,18	-0,11	0,27	0,29	-0,16	-0,02	0,00	0,16	0,16	1,09	-1,60	0,11	1,94	1,94
MTJ-24	-0,13	-0,16	0,20	0,21	0,29	-0,64	-0,42	0,31	0,77	0,83	1,95	-0,16	-0,33	1,96	1,98
MTJ-25	0,01	0,01	0,04	0,01	0,04										
MTJ-27	-0,12	-0,14	0,07	0,18	0,20						-0,69	-0,09	0,20	0,70	0,72

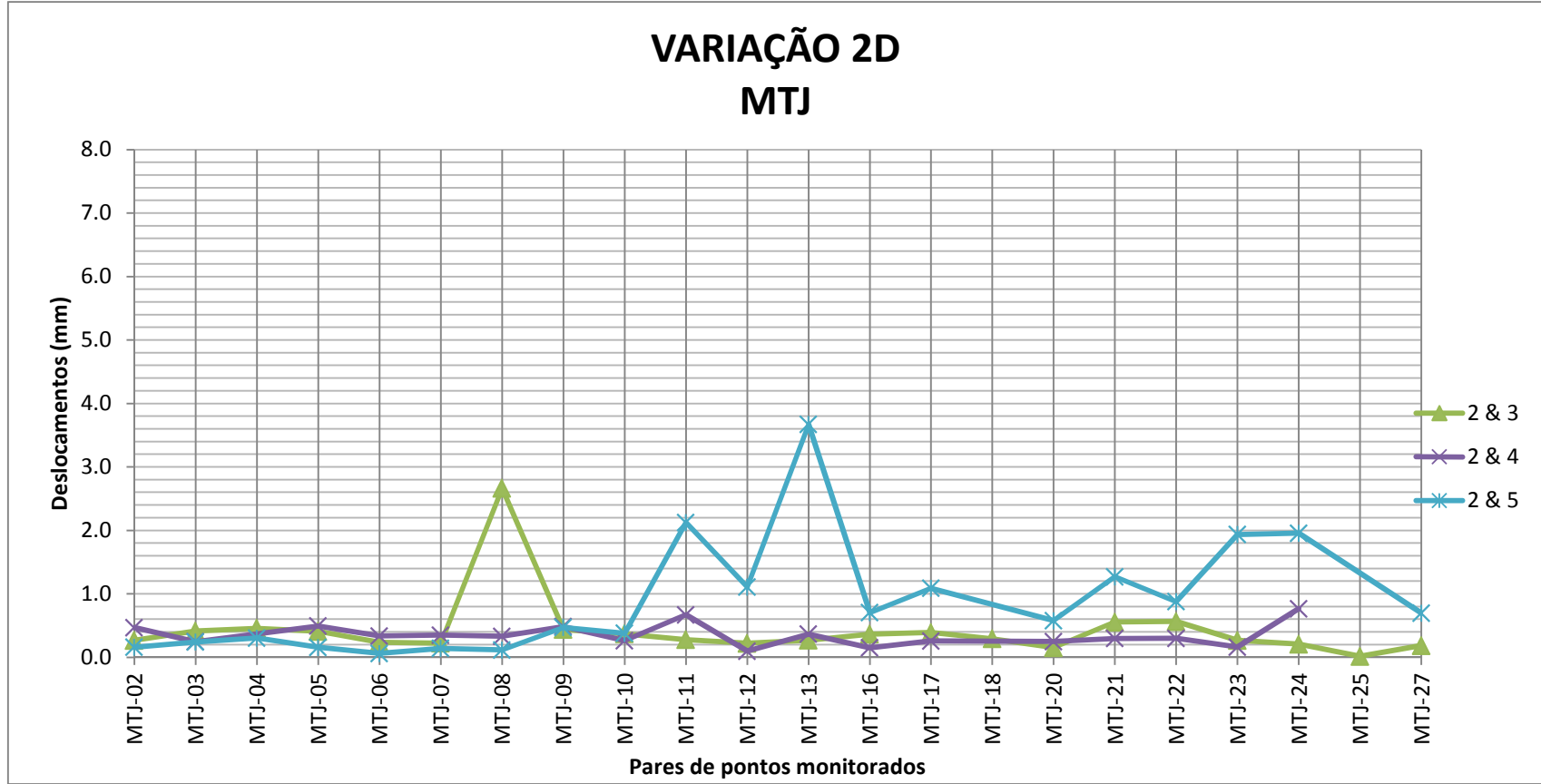
Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 31 - COMPORTAMENTO DAS NOVAS RESULTANTES 2D OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.



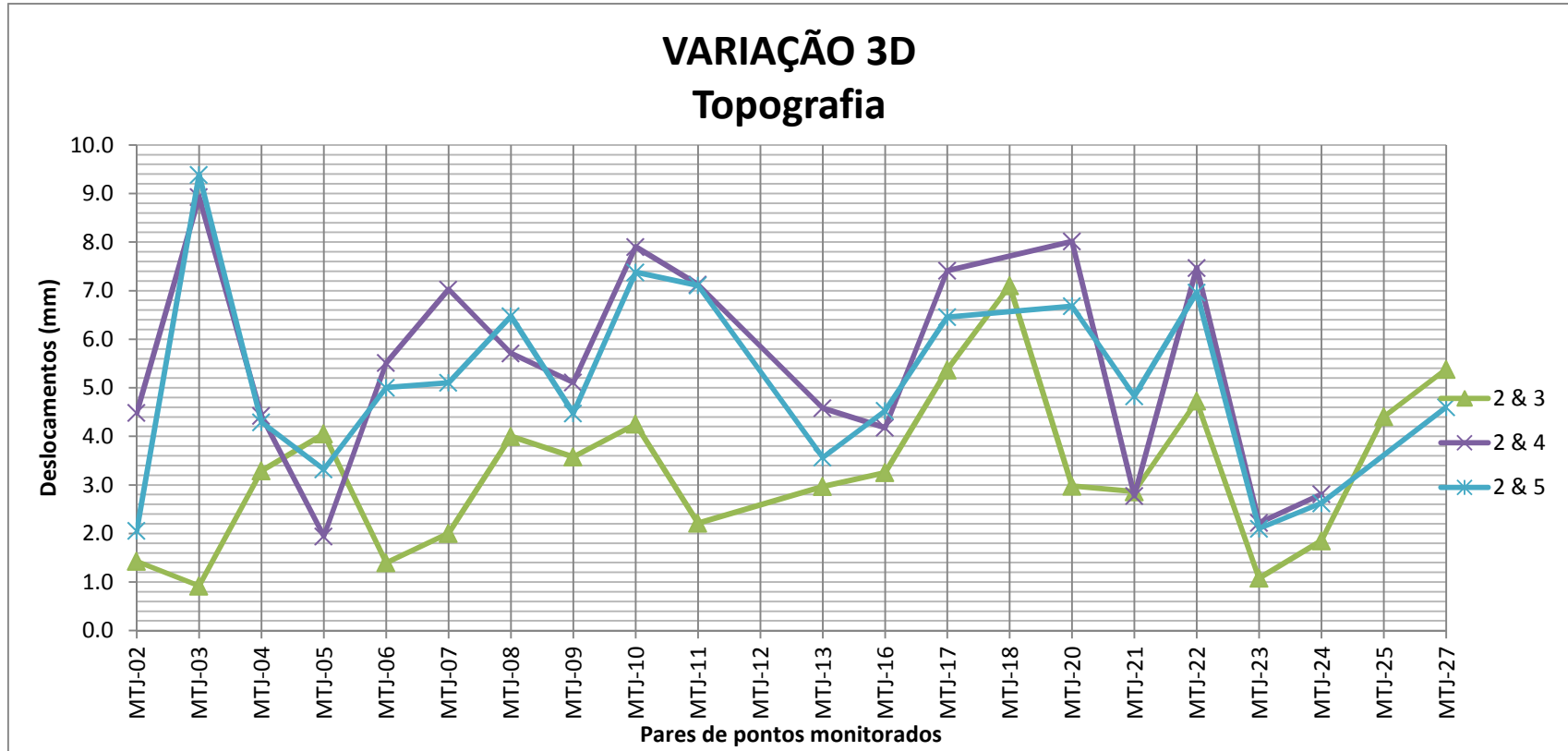
Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 32 - COMPORTAMENTO DAS NOVAS RESULTANTES 2D DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA



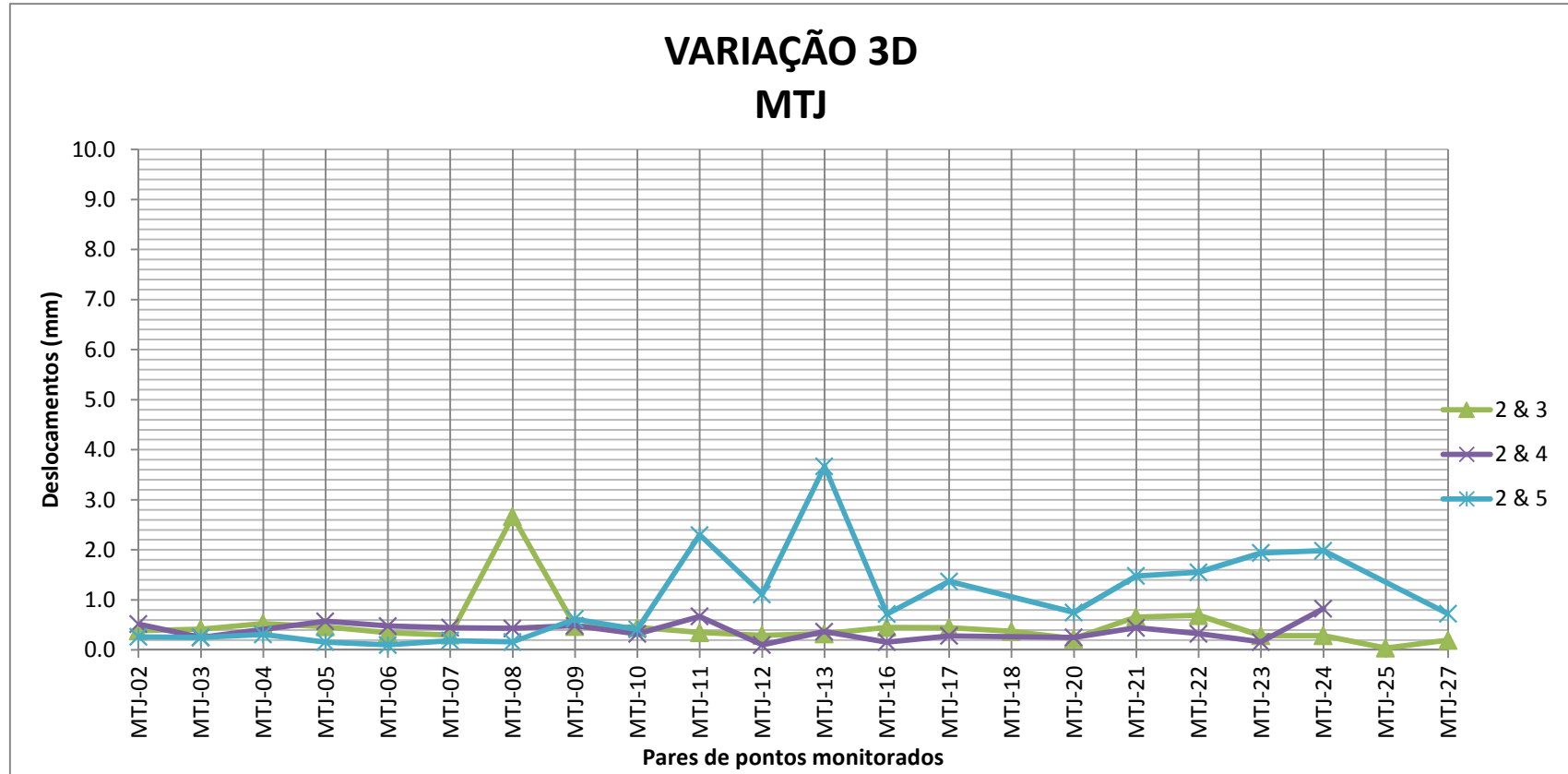
Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 33 -COMPORTAMENTO DAS NOVAS RESULTANTES 3D OBTIDAS PELO MÉTODO TOPOGRÁFICO.



Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 34 - COMPORTAMENTO DAS NOVAS RESULTANTES 3D DERIVADAS DAS LEITURAS DIRETAS NOS MEDIDORES TRIORTOGONAIS DE JUNTA



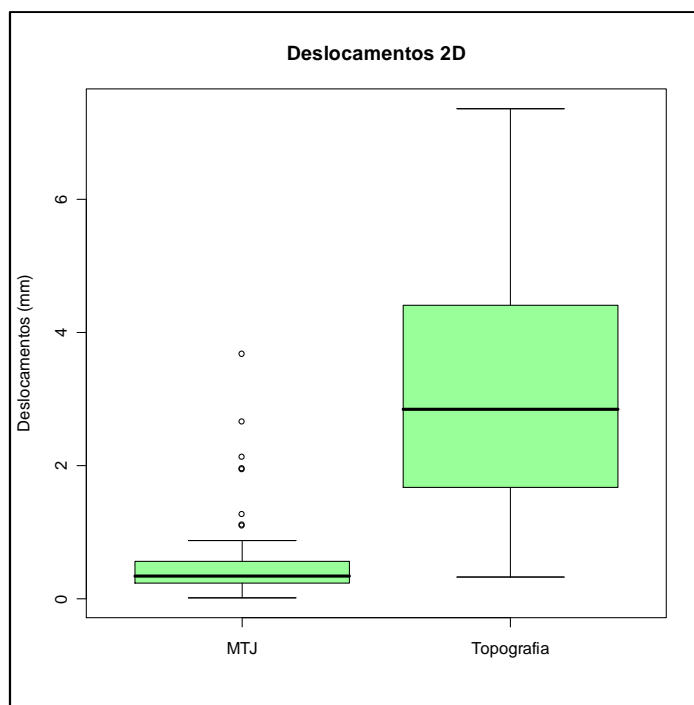
Fonte: O Autor (2013).

Apesar dos picos de amplitude, tanto nos deslocamentos 2D quanto 3D obtidos por topografia, nota-se que ambos apresentam grau de semelhança entre as épocas comparadas, indicando consistência nos dados. Observando os valores das amplitudes de deslocamento, percebe-se que há divergência em relação a aquelas obtidas através das leituras diretas nos MTJ e adotadas como referência para validação dos valores obtidos por topografia.

Através da análise do diagrama de caixa, feito para comparar os deslocamentos 2D (figuras 35 e 36) e 3D (figuras 37 e 38), nota-se o quão disperso os deslocamentos obtidos por topografia estão em relação aos obtidos através de leitura direta nos MTJ.

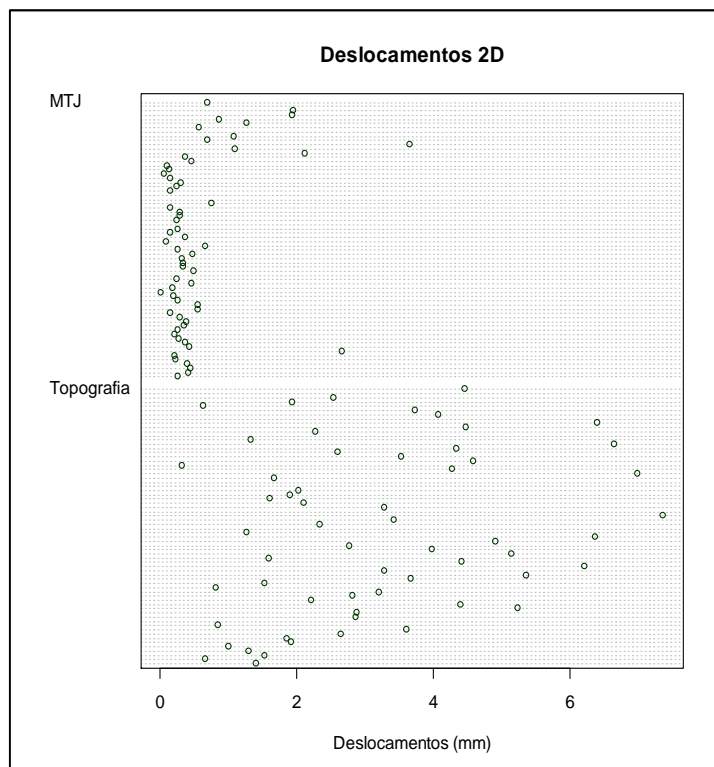
Os pontos mostrados fora dos limites são considerados *outliers*, destoando dos demais. São eles: MTJ-8 (2&3) e MTJ-11, 12, 13, 17, 21, 22, 23, 24 (2&5). Nas FIGURA 36 e 38 a seguir mostra-se a dispersão pontual dos deslocamentos para as duas amostras.

FIGURA 35 - BOXPLOT PARA OS DESLOCAMENTOS 2D



Fonte: O Autor (2013).

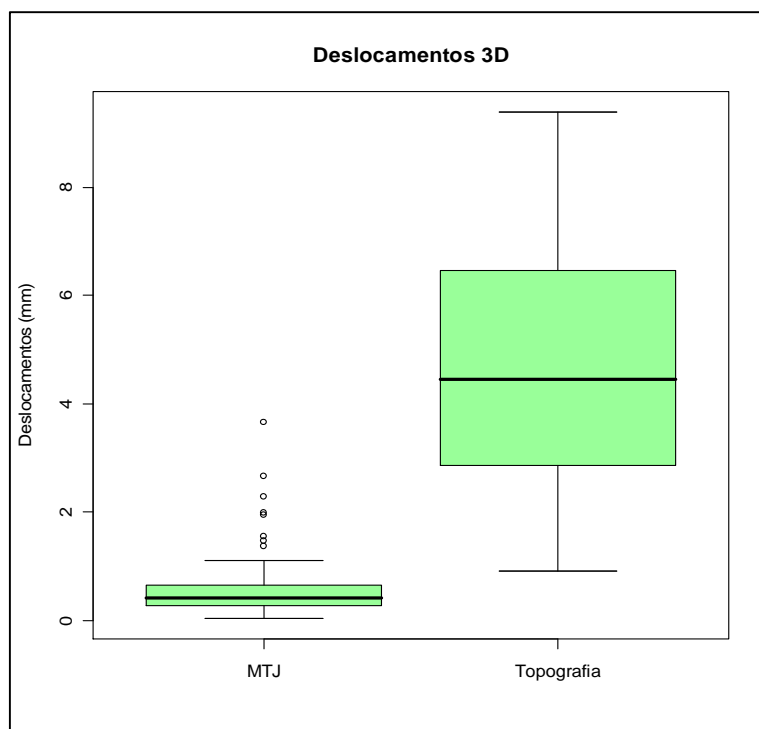
FIGURA 36- DIAGRAMA DE DISPERSÃO DOS DESLOCAMENTOS 2D



Fonte: O Autor (2013).

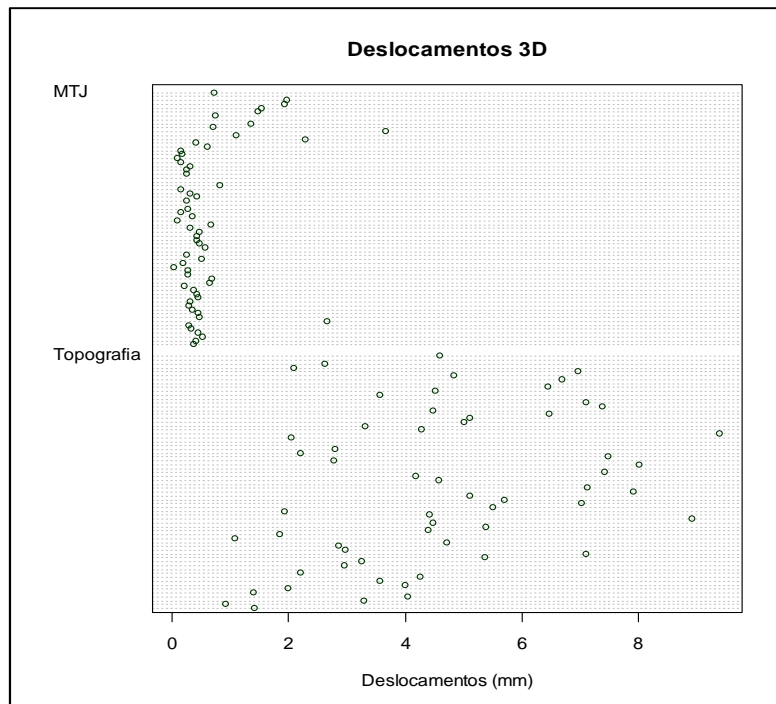
O mesmo foi feito para os deslocamentos 3D e apresentados a seguir:

FIGURA 37 - BOXPLOT PARA OS DESLOCAMENTOS 3D



Fonte: O Autor (2013).

FIGURA 38 - DIAGRAMA DE DISPERSÃO DOS DESLOCAMENTOS 3D



Fonte: O Autor (2013).

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Usando as coordenadas 3D dos pontos de monitoramento em blocos contíguos, foi possível estabelecer as componentes vetoriais (ΔX_b , ΔY_b , ΔZ_b), que foram necessárias para comparar deslocamentos obtidos por técnica geodésica (topografia) e por leituras nos MTJ (LX, LY, LZ) escolhendo-se uma época de referência. Adotando a época 17/08/2012 (campanha 01) como referência, percebeu-se que a magnitude dos deslocamentos tanto 2D quanto 3D obtidos por topografia (Quadro 19) divergiram dos resultados obtidos pelos MTJ (Quadros 20 e 21). Esta divergência de magnitude de valores sugeriu uma verificação individual da contribuição de cada componente nos deslocamentos espaciais e percebeu-se que havia indícios de erros sistemáticos na campanha de referência em alguns pontos (uso de uma pequena peça de adaptação do prisma). Sendo assim, outra época de referência foi adotada.

Os resultados obtidos com a adoção da época 05/09/12 (campanha 02) mostraram maior coerência entre as épocas com uma tendência comportamental semelhante (Figuras 31 e 33). Entretanto, a magnitude dos deslocamentos permaneceram distintas em relação as obtidas para os MTJ (Figuras 32 e 34).

A barragem da UHE Mauá é uma obra de engenharia em sua fase inicial de operação e alguns ajustes ainda estão sendo feitos por parte do pessoal de operação da usina. Foram instalados diversos equipamentos dentro da galeria de inspeção, exatamente onde estão concentrados os pontos de monitoramento investigados neste trabalho. No decorrer das campanhas de coleta de dados, constatou-se que em algumas, os suportes dos prismas que haviam sido instalados para subsidiar esta pesquisa (FIGURA 13) estavam sendo utilizado pelos trabalhadores da barragem para pendurar cabos, ferramentas, mochilas, etc. Alguns desses suportes foram danificados de forma permanente de forma a inviabilizar seu uso nesta pesquisa. A instalação de desses novos equipamentos (dutos e tubulações) na lateral da galeria chegou

a comprometer visadas, sendo necessário realocar um vértice da poligonal em outra posição.

A validação dos resultados através dos testes estatísticos comumente empregados para análise de médias (teste t) ou de variâncias (teste F) mostra-se inviável já que há apenas um único valor resposta para cada época analisada, inexistindo a possibilidade de determinação de valores médios ou de graus de liberdade. Portanto optou-se pelo uso do diagrama de caixa (boxplot) para representação dos resultados, tendo como amostras os valores obtidos por topografia e por leituras nos MTJ. Através dos diagramas construídos, ficou ainda mais evidente que, para os conjuntos de dados analisados, não houve compatibilidade entre os deslocamentos obtidos através das duas técnicas.

Nas figuras 35 e 37, para a amostra Topografia, os afastamentos dos quartis superiores (Q3) e inferiores (Q1) são maiores em relação a amostra MTJ e as medianas apresentam-se com magnitudes em torno de cinco e nove vezes maiores respectivamente, que as magnitudes atingidas para na amostra MTJ (adotados como referência por serem obviamente mais precisos) e com um afastamento entre Q3 e Q1 menores.

Chama-se a atenção para o fato de que os valores classificados como *outliers* são exclusivamente para as amostras MTJ. Esta classificação necessariamente pode não estar correta, já que há possibilidades de ter havido de fato uma variação significativa nos valores registrados pelo relógio comparador. Mesmo assim a possibilidade de erros de leitura ou anotação não devem ser sumariamente descartadas sendo necessária portanto, uma investigação mais rigorosa. Através das figuras 36 e 38 nota-se a dispersão pontual dos deslocamentos e a notória concentração dos valores das amostras MTJ em relação as amostras Topografia em torno de um valor central (menor) e o afastamento dos pontos classificados potencialmente como outliers em relação a este valor central. Fato que não se apresenta nos valores da amostra Topografia já que não há tendência de concentração de valores em torno de um valor central perceptível (comprovado também pelo afastamento entre Q3 e Q1 já citado).

5.2 RECOMENDAÇÕES

Com o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, observou-se que alguns itens necessitam de maiores investigações. São eles:

- a) Investigação sobre as fontes de erro que influenciam nos fechamentos angulares e lineares de uma poligonal com as características encontradas nesta pesquisa e maneiras de minimizar ou corrigir seus impactos.
- b) Implementar um algoritmo de ajustamento que faça os cálculos e ajustamento da poligonal de forma tridimensional sem que haja a separação entre planimetria e altimetria.
- c) Efetuar estudos sobre fontes de erros no ATR da estação total em condições semelhantes as encontradas no trabalho (ambientes confinados e visadas curtas).
- d) Pesquisar sobre os impactos do gradiente térmico existente na conexão da parte externa e interna da galeria e os efeitos da refração no fechamento da poligonal.
- e) Estudar outras possibilidades de testes estatísticos para avaliar os resultados.
- f) Resolver o problema do uso inadequado das hastes que suportam os prismas por parte dos trabalhadores da obra.
- g) Continuação dos trabalhos de monitoramento geodésico da UHE Mauá durante toda a sua fase de operação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, P.C., ABAR, C.A.A.P. **Sobre o Boxplot no GeoGebra**, 1ª. Conferência Latino Americana de GeoGebra. ISSN 2237- 9657, pp.13-21, 2012

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Geração**: 2010. Disponível em: < http://www2.ana.gov.br/Paginas/imprensa/noticia.aspx?id_noticia=8938 >
Acessado em 24 de abril de 2013.

ANDRADE, J.B. **Fotogrametria** - Jose Bittencourt de Andrade. Curitiba; SBEE, 2003; 2.ed.

ANDRIOLO, M.V., PIROLI, C., ALBUQUERQUE JR., O.J., PINTO, N.L. DES. **Revestimento com concreto projetado em túneis de rocha Branda - O Exemplo da UHE Mauá**. XXIX SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Porto de Galinhas-PE 08 a 11 de abril de 2013

BRASIL - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL - SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA HIDRICA - **Manual de Segurança e Inspeção de Barragens**- Brasília, 2002. 148p

BRASIL, Decreto-Lei n. 12.334 de 20 de setembro de 2010. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 181, p.1, 21 set., 2010. Seção 1.

CASTRO, M.M., MARTINS, J.R.S., LUCCI, R.M., JACOBSEM, F.R.S. **Concepção de um sistema de gerenciamento de ações emergenciais em barragens**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió-AL. 2011

CBDB. COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. Núcleo de São Paulo. **Guia Básico de Segurança de Barragens, São Paulo**: 2001. 78p. Manual.

CHEN, Y. **Analysis of deformation surveys. A generalized method** Department of Surveying Engineering Technical, Thesis (Ph.D). University of New Brunswick, Fredericton. New Brunswick, Canada, 1983.

CHRZARNOWSKI, A. **Accuracy evaluation of geodetic monitoring of deformations in large open pit mines** 12th fig symposium on deformation measurements, Baden, May, 2006

CRAWFORD, W.G. **Construction surveying and layout: a field engineering methods manual** – 3rd edition 2003, 2002. 148p.

CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. 2ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

CRUZ, P. T., MATERÓN, B., FREITAS, M. **Barragens de Enrocamento com Face de Concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

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

FAGGION,P.L.,VEIGA,L.A.K.,SILVA,T.F.,ANDOLFATO,S.H.D.**Estudo da aplicação de estações totais para determinação de deslocamentos relativos em laboratório.** Bol.Cienc. Geodésicas V.19 nº1 p.34-44,jan-mar,2013.

GOMES, J. P. **Determinação de Desníveis de Precisão Utilizando Estação total.** Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2006.

GRANEMANN, D. C. **Estabelecimento de uma rede geodésica para o monitoramento de estruturas: estudo de caso na Usina Hidrelétrica Salto Caxias,** Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005.

IBRAHIM,M.R.,JAFAR,F.,YAHYA,Z.,SAMAD,A.M, **A Feasibility Study of Building Structural Deformation Monitoring Using Global Positioning System (GPS), Terrestrial Surveying Technique (TST) and Crack Gauge Measurement (CGM).** 6th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA)-2010

ITAIPU: **ENERGIA:** 2013. Disponível em: <
<http://www.itaipu.gov.br/energia/auscultacao> > Acessado em 23 de abril de 2013

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

LEICA GEOSYSTEMS® c. TPS1200. Manual de operação, versão 1.0, Português.

LENARTOVICZ,I. **Avaliação da Potencialidade do Laser Scanner Terrestre no monitoramento de estruturas: Estudo de caso Uhe Mauá,** Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2013

LUGNANI,J.B. **Introdução à Fototriangulação.** João Bosco Lugnani. Curitiba,1987. 134 p.

MARTINI,L. **Calibração de prismas de reflexão total em forma de fita adesiva, em acrílico e sua aplicação no controle de deslocamentos de estruturas** Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005.

MASSART,D.L., SMEYERS-VERBEKE, J., CAPRON, X., SCHLESIER, K. **Visual Presentation of Data by Means of Box Plots**. 2005 Disponível em: < <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.169.9952&rep=rep1&type=pdf> > Acessado em 14 de janeiro de 2014

MATOS,S.F. **Avaliação de instrumentos para auscultação de barragem de concreto. Estudo de caso: deformímetros e tensômetros para concreto na barragem de ITAIPU** Dissertação de mestrado Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2002.

MUGUIO,M.R. **Implantação e análise da estação GNSS para o monitoramento contínuo da barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá** . Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2012

NADAL,M.A.D. **Controle E Operação Remota De Estações Totais Robotizadas Voltado À Auscultação Geodésica** Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2008

NEVES, R. V. **Processamento e análise de levantamentos geodésicos aplicado ao monitoramento de estruturas civis**. 121 f. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2008

SANTOS,D.P. **Avaliação do uso do nivelamento trigonométrico no transporte de altitudes para regiões de difícil acesso**. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2009

SIGUEL,A.R., **Monitoramento da barragem da usina hidrelétrica Mauá utilizando irradiação tridimensional**. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2013

SILVA,R.N.F. **Avaliação do método de nivelamento trigonométrico, técnica Leap-Frog, na determinação de recalque em grandes estruturas: estudo de caso para a UHE Mauá** . Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2012'

SILVEIRA,J. F. A. **Instrumentação e comportamento de barragens de concreto** / João Francisco Alves Silveira. - São Paulo: Oficina de textos 2003

SILVEIRA,J. F. A. **Lições aprendidas com a Automação da Instrumentação de barragens no Brasil**, XXIX SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS. Porto de Galinhas-PE 08 a 11 de abril de 2013

SUCI,F.M.,FAGGION,P.L.,**Análise Da Estabilidade Da Rede Geodésica De Monitoramento Da Uhe Salto Caxias A Partir De Dados Gps.** Bol.Cienc. Geodésicas V.18 nº4 p.564-582,out-dez,2012.

TEIXEIRA,N.N, **Análise Geodésica De Deformações Da Crosta Em Regiões De Grandes Barragens A Partir De Deslocamentos Tridimensionais Obtidos Pelo Sistema De Posicionamento Global.** Tese (Doutorado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005.

VENTURI,J.J.,**Algebra Vetorial E Geometria Analítica-** 8 ed.-CURITIBA, 242 p-1949

WOLF,P.R.,GHILANI,C.D. **Adjustment Computations: Statistics and Least Squares in Surveying and GIS.** John Wiley & Sons. 3rd Edition, 1997.

ZOCOLOTTI, C.A. **Utilização de técnicas de poligonação de precisão para o monitoramento de pontos localizados em galerias de inspeção: estudo de caso da u.h. de Salto Caxias** Dissertação (Mestrado). Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas, Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005