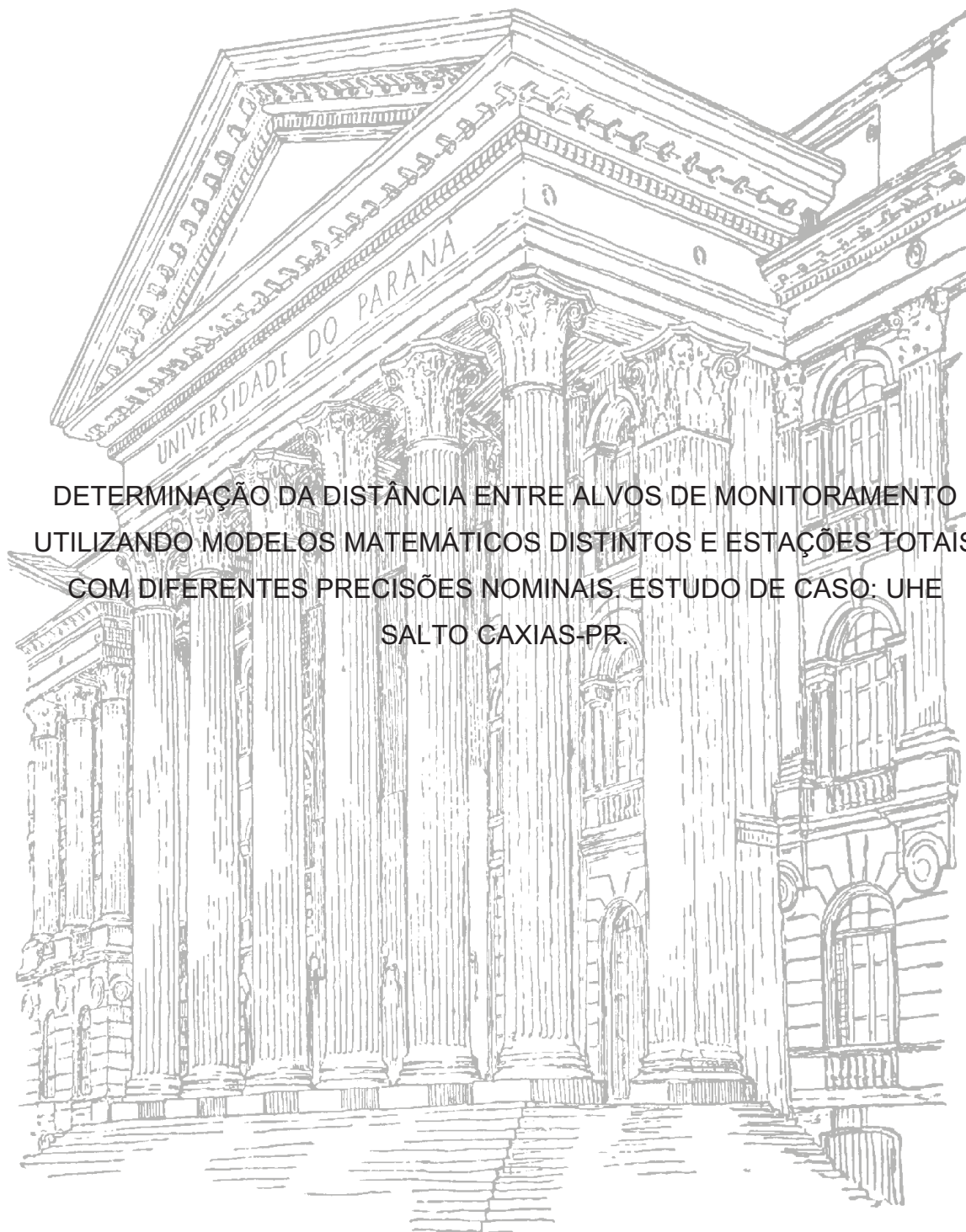


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARINALVA DE OLIVEIRA LIMA



DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ALVOS DE MONITORAMENTO
UTILIZANDO MODELOS MATEMÁTICOS DISTINTOS E ESTAÇÕES TOTAIS
COM DIFERENTES PRECISÕES NOMINAIS. ESTUDO DE CASO: UHE
SALTO CAXIAS-PR.

CURITIBA

2018

MARINALVA DE OLIVEIRA LIMA

DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ALVOS DE MONITORAMENTO
UTILIZANDO MODELOS MATEMÁTICOS DISTINTOS E ESTAÇÕES TOTAIS
COM DIFERENTES PRECISÕES NOMINAIS. ESTUDO DE CASO: UHE
SALTO CAXIAS-PR.

Dissertação de mestrado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre.

Orientação: Dr. Pedro Luís Faggion
Dr. Wander da Cruz

CURITIBA
2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

L732d

Lima, Marinalva de Oliveira

Determinação da distância entre alvos de monitoramento utilizando modelos matemáticos distintos e estações totais com diferentes precisões nominais. Estudo de caso: uhe Salto Caxias-PR / Marinalva de Oliveira Lima . – Curitiba, 2018.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésica, 2018.

Orientador: Pedro Luís Faggion – Coorientador: Wander da Cruz . -

1. Monitoramento. 2. Lei dos cossenos. 3. Distância euclidiana . I. Universidade Federal do Paraná. II. Faggion, Pedro Luís. III. Cruz, Wander da. IV. Título.

CDD: 526.1

Bibliotecária: Vanusa Maciel - CRB - 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **MARINALVA DE OLIVEIRA LIMA** intitulada: **DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE ALVOS DE MONITORAMENTO UTILIZANDO MODELOS MATEMÁTICOS DISTINTOS E ESTAÇÕES TOTAIS COM DIFERENTES PRECISÕES NOMINAIS. ESTUDO DE CASO: UHE SALTO CAXIAS-PR.**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 31 de Julho de 2018.

PEDRO LUÍS FAGGION

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

DANIEL CARVALHO GRANEMANN

Avaliador Externo (UFPR)

LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA

Avaliador Interno (UFPR)

A minha querida e amada família!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade que me foi concedida para realizar este trabalho. Ele me tem dado coragem para enfrentar tarefas difíceis e guiado pelo caminho mais suave.

Aos Professores Dr. Pedro Luís Faggion e Dr. Wander da Cruz pela orientação e confiança depositada.

Aos professores Dr. Luís Veiga e Dr. Daniel Granemann pelas discussões e sugestões.

A todos os professores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

A minha família, em especial aos meus pais Tiago Lima (em memória) e Maria Creuza, que mesmo distante, soube compreender e me ajudou na medida certa.

Aos meus amigos, que também são minha família, em ordem alfabética, Andrea Santacruz, Andreas Jerke, Chaenne Milene, Carolina Aguilar, Carla Casaroti, Dayane Wiggers, Felipe Carvajal, Glória Kaviak, Iris de Gelis, Leandro Medeiros, Lineardo Melo, Mariney Nunes, Prof Paulo Sérgio, Renan Daros, Suzana Daniela, Tanea Jarek, Wander, pela amizade, ideias e pelo apoio fundamental em todo o decorrer deste trabalho.

A Mônica, secretária do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, e a coordenadora Luciene Delazari pela disposição sempre dispensada.

Ao laboratório de topografia, LABTOPO, pela disposição dos equipamentos sempre que precisei.

Aos demais colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR.

Ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de realizar este curso de Mestrado.

Ao projeto de pesquisa de Automação da Instrumentação de Auscultação Geodésica de Controle e Segurança da Barragem de Salto Caxias;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio da bolsa de Mestrado. Sem esse apoio, minha permanência em Curitiba teria sido impossível.

E, finalmente a todos que, de forma direta ou indireta, deram sua contribuição para que este trabalho fosse concluído.

Eu faço da dificuldade a minha motivação.

A volta por cima, vem na continuação.

Charlie Brown Jr.

RESUMO

O monitoramento de deslocamentos em estruturas, sejam elas naturais ou antrópicas, é uma atividade complexa que exige o uso de métodos confiáveis e eficazes. Este monitoramento pode ser realizado a partir de métodos clássicos de levantamentos topográficos e geodésicos, como nivelamento geométrico de primeira ordem, poligonação, triangulação e trilateração geodésica, escaneamento terrestre e técnicas de posicionamento por satélite. Neste contexto, este trabalho propõe a utilização de duas Estações Totais com precisões nominais distintas para a determinação da distância entre alvos de monitoramento utilizando dois modelos matemáticos diferentes, distância Euclidiana, tradicionalmente utilizada, e a Lei dos Cossenos, que tem um número menor de etapas de cálculo. Para avaliar a acurácia dos dois modelos matemáticos, realizaram-se experimentos no Campus III da UFPR (Centro Politécnico) utilizando uma mira horizontal de invar com a distância entre alvos calibrada no Laboratório de Instrumentação Geodésica-LAIG, utilizando como Padrão de Referência um Interferômetro *Laser* com precisão micrométrica. Nos testes simulados verificou-se que o equipamento modelo TCRA1205 com precisão angular nominal 5" e linear de $\pm (2\text{mm} + 2\text{ppm})$, utilizado no monitoramento da UHE Salto Caxias, atende plenamente às exigências de precisão estabelecida pelo teste estatístico *t-Student*, utilizando como referência a distância entre os alvos da mira obtidos pelo processo de calibração. Quando se comparou estes resultados, com os resultados obtidos com a estação total modelo TS15, cuja precisão nominal angular de 1" e linear de $\pm(2\text{mm} + 2\text{ppm})$, para portadora *laser* sem prisma refletor, obteve-se a igualdade das distâncias entre os alvos, desde que estejam no mesmo plano horizontal, pois quando os mesmos estiverem em planos horizontais distintos, utilizando a Lei dos Cossenos, o resultado é a projeção da distância real entre eles em um plano horizontal, sendo necessário o cálculo da distância real utilizando como parâmetro a cota dos alvos. A fase seguinte da pesquisa foi aplicar os dois modelos matemáticos com os dados obtidos em duas campanhas de monitoramento na Usina Hidrelétrica de Salto Caxias (UHE Governador José Richa). As distâncias entre alvos na horizontal, obtidas pelos dois modelos matemáticos testados, a um nível e confiança de 90%, são iguais.

Palavras Chaves: Lei dos Cossenos. Distância Euclidiana. Deslocamento. Monitoramento.

ABSTRACT

The monitoring of displacements in structures, either they natural or anthropic, is a complex activity that requires the use of reliable and effective methods. This monitoring can be carried out using classical topographic and geodetic survey methods, such as first order geometric leveling, polygoning, triangulation and geodetic trilateration, terrestrial scanning and satellite positioning techniques. In this context, this work proposes to use two Total Stations of distinct nominal accuracies to determine the distance between monitoring targets using two different mathematical models, Euclidean distance, traditionally used, and the Cosines Law, which has a smaller number of stages of calculation. In order to evaluate the accuracy of the two mathematical models, experiments were carried out at the Campus III of UFPR (Centro Politécnico) using a horizontal invar aiming and the distance between targets being calibrated in the Laboratory of Geodetic Instrumentation -LAIG, using as Reference Standard a Laser Interferometer with micrometer precision. In the simulated tests it was verified that the TCRA1205 model equipment of nominal angular precision 5" and linear of $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$, used in the monitoring of the UHE Salto Caxias, fully meets the precision requirements established by the t-Student statistical test, using as reference the distance between the targets obtained by the calibration process. When comparing these results, with those one obtained from the total station model TS15, whose nominal angular precision of 1 "and linear of $\pm (2\text{mm} + 2\text{ppm})$, for laser carrier without reflector prism, the equality of the distances between the targets, showed that they are in the same horizontal plane, because when they are in different horizontal planes, using the Cosines Law, the result is the projection of the real distance between them in a horizontal plane, being necessary the calculation of the real distance using as parameter the target quota. The next phase of the research was to apply the two mathematical models with the data obtained in two monitoring campaigns at the Salto Caxias Hydroelectric (UHE Governador José Richa). The distances between horizontal targets, obtained by the two tested mathematical models, at a level and 90% confidence, are the same.

Keywords: Cosines Law. Euclidean distance. Monitoring. Sprain.

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DE ESTAÇÕES TOTAIS.....	57
QUADRO 2 - CAMPANHAS E MÉTODOS	58
QUADRO 3 - ESPECIFICAÇÕES DA UHE SALTO CAXIAS.....	59
QUADRO 4 - DEFINIÇÃO DAS HIPÓTESES	88

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRECISÕES DE ACORDO COM A DISTÂNCIA OBSERVADA E AS PRECISÕES NOMINAIS DAS ESTAÇÕES TOTAIS	89
TABELA 2 - DISTÂNCIA EUCLIDIANA - Estação Total TCRA1205	90
TABELA 3 - DISTÂNCIA EUCLIDIANA - Estação Total TS15	91
TABELA 4 - LEI DOS COSSENOS - ESTAÇÃO TOTAL TCRA1205.....	92
TABELA 5 - LEI DOS COSSENOS - ESTAÇÃO TOTAL TS15.....	92
TABELA 6 - MIRA INCLINADA E ROTACIONADA - DISTÂNCIA EUCLIDIANA (ESTAÇÃO TOTAL TCRA1205).....	94
TABELA 7 - MIRA INCLINADA E ROTACIONADA - DISTÂNCIA EUCLIDIANA (ESTAÇÃO TOTAL TS15).....	94
TABELA 8 - MIRA INCLINADA E ROTACIONADA - LEI DOS COSSENOS - ESTAÇÃO TOTAL TCRA1205	95
TABELA 9 - MIRA INCLINADA E ROTACIONADA - LEI DOS COSSENOS - ESTAÇÃO TOTAL TS15	95
TABELA 10 - DISTÂNCIA EUCLIDIANA x COSSENO - NOVEMBRO 2016 ...	97
TABELA 11 - DISTÂNCIA EUCLIDIANA x COSSENO - JULHO/17	98
TABELA 12 - DISTÂNCIA EUCLIDIANA - NOVEMBRO/16 x JULHO/17 (D.E)	99
TABELA 13 - LEI DOS COSSENOS - NOVEMBRO/16 x JULHO/17 (L.C)....	100

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO	34
FIGURA 2- NIVELAMENTO GEOMÉTRICO.....	35
FIGURA 3 - POSICIONAMENTO RELATIVO POR GNSS	37
FIGURA 4 - TIPOS DE POLIGONAIS.....	39
FIGURA 5 - MÉTODO DE TRIANGULAÇÃO.....	40
FIGURA 6 - MÉTODO DE TRILATERAÇÃO.....	41
FIGURA 7 - MÉTODO DE IRRADIAÇÃO.....	42
FIGURA 8 - DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA A PARTIR DAS COORDENADAS	44
FIGURA 9 - ELEMENTOS DEDUTÍVEIS DA LEI DOS COSSENOS NUM TRIÂNGULO QUALQUER	45
FIGURA 10 - TESTE DE HIPÓTESE	54
FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO T (DE STUDENT).....	56
FIGURA 12 - EQUIPAMENTOS PARA COLETA DE DADOS	57
FIGURA 13 - LOCALIZAÇÃO DA UHE SALTO CAXIAS	59
FIGURA 14 - VISTA GERAL DOS BLOCOS MONITORADOS A JUSANTE ...	60
FIGURA 15 - ALVOS DE MONITORAMENTO A JUSANTE DA BARRAGEM. 61	
FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ALVOS	61
FIGURA 17 - CENTRO POLITÉCNICO DA UFPR.....	62
FIGURA 18 - MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR DE 2 METROS.....	63
FIGURA 19 - BLOCOS MONITORADOS E PILAR 3 - VISTA EM PLANTA ...	64
FIGURA 20 - CENTRO POLITÉCNICO DA UFPR.....	65
FIGURA 21 - CROQUI DO LOCAL DOS EXPERIMENTOS	67
FIGURA 22 - CROQUI DO EXPERIMENTO 1	68
FIGURA 23 - POSIÇÕES ANGULARES DA MIRA EM 90° e 114°	68
FIGURA 24 - POSIÇÕES ANGULARES DA MIRA EM 133°	69
FIGURA 25 - ALVOS EM PLANOS HORIZONTAIS DISTINTOS	69
FIGURA 26 - MIRA INCLINADA.....	70
FIGURA 27 - POSIÇÃO ANGULAR DE 90° E 0° DE INCLINAÇÃO	71
FIGURA 28 - POSIÇÃO ANGULAR DE 90° E INCLINAÇÃO MÁXIMA DA MIRA HORIZONTAL	72
FIGURA 29 - POSIÇÃO ANGULAR DE 114°	72

FIGURA 30 - ETAPAS DE CÁLCULOS DAS MODELAGENS.....	74
FIGURA 31 - ELEMENTOS PARA RECUPERAÇÃO DO COMPRIMENTO REAL DA MIRA	76
FIGURA 32 - ALVOS DE MONITORAMENTO DO BLOCO 8.....	101
FIGURA 33 - ALVOS DE MONITORAMENTO DO BLOCO 11.....	102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.1.3	Justificativa	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS	20
2.1.1	Breve Histórico	21
2.2	TÉCNICAS GEODÉSICAS APLICADAS AO MONITORAMENTO	33
2.2.2	Posicionamento GNSS	35
2.2.3	Poligonação	38
2.2.4	Triangulação e Trilateração	39
2.2.5	Irradiação	42
2.2.5.1	Determinação da distância Euclidiana	43
2.2.5.2	Determinação da distância entre alvos aplicando a Lei dos Cossenos	44
2.3	AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES	47
2.3.1	Minimização de Erros	48
2.3.2	Propagação de variância-covariância	49
2.3.3	Método de ajustamento combinado	50
2.3.4	Verificação da igualdade das distâncias	53
3	METODOLOGIA	57
3.1	ÁREAS DE ESTUDOS	59
3.1.1	UHE Salto Caxias	59
3.1.2	Centro Politécnico	61
3.2	EXPERIMENTOS REALIZADOS NO CENTRO POLITÉCNICO	63

3.2.1	Mira Horizontal de ínvar na posição horizontal	63
3.2.2	Mira horizontal de ínvar inclinada	69
3.3	MODELAGEM	74
3.3.1	Estimativa da qualidade das observações.....	77
3.3.2	Solução única das observações	80
3.3.3	Análise Estatística	87
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
4.1	EXPERIMENTOS REALIZADOS NO CENTRO POLITÉCNICO	89
4.1.1	Mira Horizontal de ínvar na horizontal	90
4.1.2	Mira horizontal de ínvar inclinada	93
4.2	RESULTADOS OS DADOS DA UHE SALTO CAXIAS.....	96
4.2.1	Campanha de novembro de 2016	97
4.2.2	Campanha de julho 2017	97
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	103
5.1	CONCLUSÕES.....	103
5.2	RECOMENDAÇÕES	104
	REFERÊNCIAS	105

1 INTRODUÇÃO

Estruturas, sejam elas naturais ou antrópicas, sofrem deformações ao longo de sua vida, e dependendo da sua magnitude, precisam ser monitoradas.

Este monitoramento pode ser realizado de forma direta sobre o objeto estudado utilizando equipamentos geotécnicos como, por exemplo, os extensômetros, e/ou por técnicas geodésicas clássicas de levantamentos topográficos até as mais modernas, como escaneamento terrestre e Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS). Independentemente do método, a coleta de observações pode ser realizada de forma contínua ou periódica, o que está ligado diretamente à dimensão da estrutura, seu comportamento e recursos disponíveis.

As barragens sejam elas para geração de energia, acúmulo de resíduos ou captação de água, são exemplos de estruturas que necessitam de constante monitoramento, e dentro desse contexto, pesquisas vêm sendo desenvolvidas pelo Grupo de Pesquisas de Geodésia Aplicada a Engenharia, ligado ao Programa de pós-graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná (UFPR), nas barragens das usinas hidrelétricas (UHE): Bento Munhoz da Rocha (Foz do Areia), Governador Ney Braga (Segredo), Governador José Richa (Salto Caxias) e mais recentemente na Usina Hidrelétrica de Mauá, no Rio Tibagi (MUGUIO et al., 2015).

Tendo em vista que o avanço tecnológico tornou os equipamentos utilizados no monitoramento de estruturas mais precisos, diversos estudos têm sido desenvolvidos em âmbito nacional e internacional em busca de metodologias para a obtenção de resultados acurados. Como exemplo, o estudo desenvolvido por Faggion et al. (2013), foi realizado em laboratório utilizando como padrão de referência um interferômetro *Laser*, para testar uma Estação Total com precisão angular de 5" e linear de $\pm (2\text{mm} + 2\text{ppm})$, na determinação de deslocamentos relativos entre pontos. O modelo matemático utilizado pelos autores, para o processamento, foi a Lei dos Cossenos.

Os resultados obtidos, demonstraram que o modelo matemático utilizado pode ser aplicado para a determinação de distâncias relativa entre pontos com acurácia melhor que um milímetro. Desta forma, esta pesquisa propõe um estudo que busca avaliar metodologias baseadas nos conceitos da Lei dos

Cossenos e Geometria Euclidiana, na determinação da distância relativa entre alvos. Os dados utilizados foram coletados em campo com duas Estações Totais a TCRA1205 e TS15, com precisão nominal angular de 5" e linear de $\pm (2\text{mm} + 2\text{ppm})$ e de $1" \pm (2\text{mm} + 2\text{ppm})$, quando se utilizado a portadora *laser*.

Dois experimentos foram realizados no campus III da UFPR, Centro Politécnico, simulando alvos dispostos no mesmo plano horizontal e em planos diferentes. Nesses experimentos utilizou-se como referência uma mira horizontal de ínvar com distância entre alvos de 2 metros.

Além disso, foram utilizados dados de duas campanhas de monitoramento da UHE Salto Caxias, coletados em épocas distintas, uma em novembro de 2016 e a outra em julho de 2017, utilizando a Estação Total TCRA1205 em modo automático de operação.

Os resultados foram avaliados por meio do teste de hipóteses t-Student, a um nível de confiança de 90%, com a finalidade de verificar as diferenças entre as distâncias obtidas com os dois métodos (Distância Euclidiana e Lei dos Cossenos), tanto para os dados obtidos na barragem como os dados obtidos no Centro Politécnico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a distância entre alvos situados em estruturas antrópicas, para fins de monitoramento, utilizando modelos matemáticos distintos, e equipamentos com precisão nominal diferente.

1.1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Analisar os resultados dos experimentos aplicando os modelos matemáticos da distância Euclidiana e Lei dos Cossenos utilizando como referência uma mira horizontal de ínvar calibrada;

- ✓ Avaliar o comportamento dos dois modelos matemáticos quando os alvos de monitoramento, cujas distâncias devem ser determinadas, estiverem no mesmo plano horizontal e quando situam-se em planos horizontais diferentes;
- ✓ Avaliar o comportamento dos modelos matemáticos com os dados oriundos das campanhas realizadas em novembro de 2016 e julho de 2017 na UHE Salto Caxias;
- ✓ Analisar, a partir do teste de hipóteses, as diferenças entre as distâncias calculadas pelo modelo matemático da distância Euclidiana e Lei dos Cossenos em diferentes épocas.

1.1.3 Justificativa

Estruturas, em geral, estão sujeitas a variações em suas dimensões e posição, no espaço e no tempo, e neste contexto a Geodésia contribui de forma significativa, com metodologias, técnicas e equipamentos que podem fornecer resultados, permitindo ao gestor responsável acompanhar o comportamento da mesma de forma pontual e/ou dentro da área na qual está instalada. O monitoramento prevê, dentre outras coisas, o pleno funcionamento da estrutura e a prevenção de acidentes.

Os alvos instalados para monitoramento podem estar em áreas inacessíveis, muitas vezes devido a magnitude da estrutura, tornando difícil a ocupação dos mesmos com equipamentos, sendo necessária a realização de observações de forma indireta.

Em relação à obtenção de distâncias pelos métodos geodésicos utilizando a equação da distância Euclidiana, o processo possui várias etapas, sendo elas: cálculo do azimute, horizontalização das distâncias, cálculo das coordenadas tridimensionais dos dois alvos e por fim, obtém-se a distância entre os mesmos a partir das coordenadas. Com relação a Lei dos Cossenos a determinação da distância entre os alvos envolve a etapa de horizontalização, das distâncias, obtidas nas das duas direções observadas, e o ângulo formado entre elas, não sendo necessários cálculos intermediários, que por consequência, terá uma menor propagação de erros no processo.

Considerando o exposto, este trabalho propõe a implementação e a aplicação de uma metodologia baseada na Lei dos Cossenos como alternativa para a determinação da distância entre alvos referentes ao monitoramento de estruturas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS

O monitoramento de deformações pode ser entendido como determinação de mudanças geométricas na forma e dimensão, rotação e translação de corpos rígidos (absoluto e/ou relativa) de objetos monitorados (DEPARTMENT OF THE ARMY, 2002).

Segundo Chaves (1994), as mudanças de uma estrutura podem ocorrer na geometria externa, caracterizando um deslocamento da estrutura, ou na geometria interna, caracterizando as deformações da mesma. Em muitos casos, ocorrem os dois simultaneamente. Os deslocamentos dos pontos são as “quantidades” que se utilizam para a fácil identificação do modelo de deformação para uma análise geométrica.

As técnicas de medição e instrumentação para o monitoramento de deslocamento e deformações têm sido tradicionalmente categorizadas em dois grupos de acordo com *Department of The Army* (2002):

- Medições geodésicas, que incluem técnicas convencionais (terrestres), fotogramétricas, satélites e algumas técnicas especiais como interferometria, nivelamento hidrostático etc.
- Medições geotécnicas de deformações locais com *lasers scanners* terrestre, Inclinômetros, deformímetros, extensômetros, medidores de juntas, pêndulos, micrômetros, etc.

As medições geotécnicas são utilizadas principalmente para as medições de deformação relativa dentro do objeto deformável e seus arredores. Os levantamentos geodésicos têm sido tradicionalmente utilizados principalmente para determinar os deslocamentos absolutos de pontos selecionados na superfície do objeto em estudo em relação a alguns pontos de referência que se supõe serem estáveis (DEPARTMENT OF THE ARMY, 2002).

Segundo *Department of The Army* (2002), cada tipo de medição tem suas próprias vantagens e desvantagens. Os métodos geodésicos, através de uma rede de pontos interligados por medidas de ângulos e distâncias, geralmente fornecem uma redundância de observações suficiente para a avaliação estatística de sua qualidade e para a detecção de erros. Eles fornecem

informações globais sobre o comportamento da estrutura deformável, enquanto que as medições geotécnicas fornecem informações localizadas e, muitas vezes, a verificação só é possível se comparadas com outras medições independentes. Por outro lado, os instrumentos geotécnicos são mais fáceis de adaptação para o monitoramento automático e contínuo do que os instrumentos geodésicos convencionais.

O monitoramento de estruturas é estudado de forma ampla mundialmente e no Brasil não é diferente. Dentro desse contexto, serão apresentadas a seguir, algumas pesquisas desenvolvidas em diversas instituições de ensino, nacionais e internacionais.

2.1.1 Breve Histórico

Zocolotti Filho (2005) desenvolveu uma metodologia e instrumental para o monitoramento de pontos em galerias de inspeção de barragens a partir do emprego do método topográfico poligonação. Para o desenvolvimento da pesquisa foi necessário o estabelecimento de uma poligonal de precisão, realizar o levantamento e cadastramento das galerias de inspeção, desenvolver dispositivos de centragem forçada para a materialização dos pontos no interior da galeria, realizar o cálculo de deformabilidade dos Dispositivos de Centragem Forçada (DCF), fazer análise prática da deformabilidade do DCF, medir as direções e distâncias da poligonal, corrigir os efeitos atmosféricos e, por último, fazer o cálculo das coordenadas tridimensionais.

Ao final da pesquisa, Zocolotti Filho (2005) concluiu que para a obtenção de distâncias angulares, principalmente em distâncias curtas, não é recomendado o uso de prismas com alvo e evitar distâncias curtas entre os mesmos. Outra conclusão colocada pelo autor foi a de que o sistema desenvolvido atende as necessidades do levantamento, não tendo influência nas medidas angulares e lineares observadas. Como as poligonais de apoio possuíam erros, a diferença no valor das coordenadas das duas campanhas realizadas não confirmou a existência de deslocamentos da estrutura. A análise das técnicas de ajustamento mostrou diferença entre o método de variação de coordenadas e o método correlato e que o método de variação de coordenadas

apresenta diretamente o valor das coordenadas ajustadas e precisões dos vértices da poligonal, sendo uma vantagem em relação ao método correlato.

No trabalho de Teixeira (2005) foi proposto uma análise geodésica de deformações da crosta em regiões de grandes barragens a partir de deslocamentos tridimensionais obtidos por meio do GPS (*Global Positioning System*). Para alcançar o objetivo foi necessária a realização de teste estatístico para a verificação de desempenho do ajustamento, localização de erros embutidos nas observações e análise da estabilidade das estações de referência. Para a obtenção dos deslocamentos tridimensionais, em relação às componentes X, Y e Z, dos pontos de monitoramento foram realizadas duas campanhas de levantamentos GNSS em épocas distintas, uma anterior e outra posterior ao enchimento do reservatório. Com relação à estimativa do tensor de deformação foi realizada a Colocação por Mínimos Quadrados e função polinomial. O autor constatou que os desvios padrão das coordenadas das linhas de bases processadas foram satisfatórios para as campanhas realizadas, apesar de haver uma redução da precisão das coordenadas da segunda campanha em relação à primeira. Em relação às análises estatísticas, os resultados mostraram que o teste de sensibilidade é eficaz na detecção de deslocamentos e aos resultados da estimativa do tensor de deformação da crosta pelo método de Colocação por Mínimos Quadrados mostraram a eficiência do método, indicando que o método pode ser amplamente usado em estudos de deformação de qualquer tipo de estrutura.

Martini (2005) desenvolveu um estudo para a calibração de prismas de reflexão total em forma de fita adesiva e prismas em acrílico, como uma alternativa aos prismas de vidro, visando a sua utilização nos processos de controle de deslocamentos de grandes estruturas, além de realizar uma análise da durabilidade das fitas adesivas quando expostas a diferentes intempéries. Para que o objetivo da pesquisa fosse alcançado foi necessária a calibração dos prismas refletores e sua aplicação nas comportas da Usina de Salto Caxias. Na etapa de calibração dos prismas realizaram-se testes do ângulo de rotação do refletor e a determinação de sua constante, tanto em laboratório quanto em campo. A aplicação das fitas refletoras nas comportas foi realizada para avaliar sua durabilidade e sua eficiência na obtenção de direções e distâncias nos processos de monitoramento.

Os resultados da pesquisa de Martini (2005) mostraram que o ângulo máximo de incidência do sinal de medida do refletor é de 50° graus para a fita adesiva e 25° para o refletor em acrílico. Para medidas acima desses valores a precisão da medida realizada fica comprometida, tendo em vista que a intensidade do sinal devolvido pelo refletor é baixa. Após a realização dos testes, a fita adesiva mostrou-se resistente às intempéries, desde que sua instalação aconteça de acordo com as recomendações do fabricante.

A pesquisa realizada por Granemann (2005) teve como objetivo estabelecer uma rede geodésica para o monitoramento da barragem Usina Hidrelétrica de Salto Caxias, com a criação de uma metodologia para realização das observações de campo e o processamento dos dados observados, a fim de verificar o comportamento da barragem quando exposta a diferentes intempéries. Para a realização da pesquisa, o autor, utilizou diferentes técnicas de monitoramento com o uso de uma combinação dos métodos clássicos de levantamento, sendo eles: triangulações, trilaterações, nivelamento geométrico de 1ª ordem; métodos modernos de levantamento a partir da realização de rastreamento GNSS e levantamento gravimétrico. Cada método de levantamento foi utilizado para um propósito específico durante o desenvolvimento do levantamento. Os resultados da pesquisa mostraram que o método proposto se mostrou adequado para apresentar a condição estrutural da barragem de forma precisa e confiável.

Em seu trabalho, Gomes (2006) pesquisou a acurácia na determinação de desníveis com o emprego de Estações Totais de baixa, média e de alta precisão, em comparação com os desníveis obtidos pelo método do nivelamento geométrico de precisão, estabelecido segundo as Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Resolução da Presidência do IBGE nº 22, de 21/07/1983. O autor pesquisou também o efeito da refração na observação do ângulo vertical, bem como os procedimentos a serem adotados para minimizar tal efeito. As medições foram realizadas entorno do reservatório da UHE Salto Caxias, com o objetivo de avaliar a subsidência da região com a formação do reservatório. O autor concluiu que os resultados obtidos na determinação de desníveis de precisão com estações totais no método de visadas iguais, são compatíveis com as precisões nominais de cada equipamento testado.

Shibayama (2007) realizou uma pesquisa para o desenvolvimento de três programas onde automatizou o registro, a verificação e o processamento dos dados obtidos em levantamentos de campo, utilizando Estações Totais e técnicas topográficas e geodésicas. Com a automação dos processos, diminuiu o tempo entre a coleta de dados e o processamento para a obtenção das coordenadas finais dos pontos. O primeiro programa desenvolvido foi denominado Séries, onde as observações são digitadas e o programa realiza a conferência dos dados e os armazena de forma organizada. No segundo programa, chamado de Observações Recebidas, é possível ler um arquivo de dados no formato da própria Estação Total e extrair as informações de interesse do usuário, bem como organizá-las em outro arquivo de saída. No último programa, denominado Séries Auto, o equipamento é conectado diretamente com o computador e as observações são transferidas automaticamente para o mesmo através de uma interface de comunicação. O autor concluiu que espera com este sistema minimizar o tempo de coleta das observações em campo, através da automação dos registros, a partir de uma interface por onde o usuário define de acordo com sua necessidade as técnicas de medição que estará utilizando em campo.

Um estudo realizado por Nadal (2008) teve por objetivo desenvolver um programa para controle e acesso remoto de estações totais robotizadas voltadas para aplicações de monitoramento geodésico de estruturas, utilizando-se modelos de interface. Para que o objetivo da pesquisa fosse alcançado foram realizados testes para estabelecimento da comunicação remota entre a Estação Total e o computador, com uso de cabo descarga de dados, comunicação wireless via Bluetooth e comunicação wireless via rádio-modem. Os resultados da pesquisa mostraram que o programa desenvolvido pode ser amplamente utilizado para o controle e acesso remoto de estações totais robotizadas e que apesar do programa ter sido desenvolvido para auscultação geodésica, o mesmo pode ser alterado ou adaptado para usos diversos.

Neves (2008) realizou uma pesquisa para avaliar a estabilidade de um conjunto de pontos da UHE Salto Caxias a partir do monitoramento geodésico, além de desenvolver um sistema automatizado para a realização do cálculo das coordenadas dos alvos implantados junto às fissuras existentes no paramento da barragem a jusante. Para o estudo de estabilidade dos pontos monitorados,

foi necessário à utilização da rede geodésica de monitoramento composta por seis pilares que possuem sistema de centragem forçada, cravados a jusante da barragem. O estudo da estabilidade foi realizado em duas etapas, onde a primeira consistiu em realizar uma análise da estrutura geral da barragem, com base em observações realizadas em diferentes épocas, e posteriormente realizar o ajustamento das observações aplicando o método de variação de coordenadas. A segunda etapa da pesquisa consistiu em realizar uma análise de deslocamento dos pontos monitorados fixados ao no paramento a partir da determinação das coordenadas dos mesmos.

Os resultados da pesquisa realizada por Neves (2008) mostraram que o sistema desenvolvido pode ser usado para decodificar e organizar os dados de monitoramento. Com análise dos resultados obtidos a partir dos cálculos realizados pela rotina computacional desenvolvida, constatou-se que as coordenadas da rede geodésica assim como os pontos monitorados no paramento a jusante da barragem, não sofreram alterações ao longo dos anos.

Suci (2012) realizou um estudo da estabilidade da rede geodésica que dá suporte ao monitoramento da Usina Saltos de Caxias, utilizando técnicas de levantamento moderno, posicionamento GNSS, a partir de observações de diferentes campanhas. Para a realização do estudo fez-se necessário determinar um pilar como referencial das observações, sendo definido o pilar 1. As coordenadas do pilar de referência foram obtidas a partir do método de posicionamento relativo, utilizando-se de quatro estações de monitoramento contínuos sendo três pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) e uma da Itaipu Binacional (ITAI). Após o ajustamento vetorial, realizado utilizando rotina elaborada no MATrix LABoratory (MATLAB), foi necessário à aplicação do teste Data Snooping, para a detecção de erros grosseiros nas observações e para a validação dos deslocamentos utilizou-se o Teste de Congruência Global.

Os resultados da pesquisa realizadas por Suci (2012) mostram a importância da atualização das coordenadas para uma dada época, evitando equívocos de interpretação. Com base nos resultados do Teste Data Snooping, o autor concluiu que o mesmo pode ter sido superestimado, já que foram detectados deslocamentos em todos os pilares da rede em uma das campanhas

estudada. Como os deslocamentos apresentaram o mesmo modelo, o autor concluiu que pode haver a presença de erros sistemáticos.

Silva (2012) realizou uma pesquisa com o objetivo de avaliar a precisão do método de nivelamento trigonométrico, técnica *LeapFrog*, no monitoramento de deslocamentos verticais em grandes estruturas, utilizando com área teste a barragem UHE Mauá. Para que o objetivo da pesquisa fosse alcançado foi necessário a realização de levantamento topográfico utilizando os métodos de nivelamento geométrico e nivelamento trigonométrico e realizar uma comparação dos resultados obtidos por ambos. Os resultados da pesquisa mostraram que os recalques obtidos com o método proposto na pesquisa apresentam valores inferiores aos admissíveis para o monitoramento de estrutura, com isso, comprova-se que o método proposto na pesquisa pode ser amplamente utilizado para a detecção de movimentos verticais em grandes estruturas.

Muguio (2012) desenvolveu uma pesquisa com o objetivo de projetar e instalar uma estação GNSS para monitoramento contínuo da barragem da UHE de Mauá. Para a instalação da estação foi necessário um estudo das características geotécnicas da usina, reconhecimento da área, escolha do ponto de instalação do equipamento, construção de um suporte para minimização das vibrações na antena, escolha da antena com base em diferentes aspectos que podem influencia na qualidade das observações, instalação da antena e do receptor do sinal GNSS, configuração do equipamento com base em sua utilização, determinação do modo de recepção e transmissão dos dados de acordo com sua finalidade. Após a coleta dos dados, realizou-se o ajustamento das observações obtidas pela estação implantada. A partir dos testes realizados, o autor concluiu que a estação instalada encontra-se em funcionamento, onde os dados estão sendo coletados, armazenados em cartão *Universal Serial Bus* (USB) e enviados para o servidor configurado. Após o processamento das observações, concluiu-se que os dados não têm melhoria significativa em seus resultados quando processados com efemérides transmitidas e com efemérides precisas. Os resultados mostraram ainda que a linha de base tem influência direta na qualidade dos resultados das observações, onde quanto menor for à linha de base, melhor os resultados encontrados.

Lenartovicz (2013) realizou uma pesquisa para averiguar o emprego de um *laser scanner* terrestre para o monitoramento de barragens, utilizando como área de estudo a UHE de Mauá. A metodologia proposta na pesquisa consistiu na realização do reconhecimento da área, escolhas dos pontos de referência e de instalação do laser em duas épocas distintas e levantamento dos pontos com laser terrestre e Estação Total robotizada em duas épocas distintas. Os resultados da pesquisa mostraram que a determinação de deslocamentos de grandes estruturas utilizando laser scanner terrestre depende da densidade de pontos utilizada, da quantidade e distribuição de pontos ocupados e observados.

Em Siguel (2013), um estudo foi feito para a verificação da estabilidade de pontos de monitoramento previamente selecionados e materializados a montante e a jusante da UHE de Mauá. Para a determinação das coordenadas tridimensionais dos pontos utilizou-se do método clássico de topografia, método de irradiação. Para o desenvolvimento do estudo fez-se necessário à observação de ângulos verticais, direções horizontais e distâncias inclinadas de 34 alvos distribuídos pela estrutura de barramento, onde as observações foram feitas com auxílio de Estação Total robotizada. Para a análise do comportamento dos pontos monitorados fez-se uma comparação das suas coordenadas em épocas distintas, a partir do estabelecimento de uma rede geodésica, por meio de pilares dotados de sistema de centragem forçada.

Após a realização de algumas campanhas GNSS nos pilares de monitoramento, a autora constatou que as coordenadas observadas não sofrem variações significativas. Em relação aos pontos previamente selecionados a montante e a jusante da barragem, os resultados apresentaram diferenças nas coordenadas de alguns pontos a montante ao nível de significância de 5%, o que pode indicar possíveis deslocamentos, não sendo verificado o mesmo comportamento a jusante.

Graça (2014) realizou um estudo na UHE Salto Caxias, com o objetivo de validar a determinação de deslocamentos relativos em grandes estruturas, obtidos através de técnicas geodésicas e Medidores Triortogonais de Junta - MTJ. Em seguida realizou-se levantamento dos alvos inseridos na barragem através do método de poligonação e irradiação do espaço tridimensional - 3D. Após o levantamento realizou-se o cálculo das coordenadas e das componentes vetoriais (posição relativa entre os pontos) e por último realizou-se a análise dos

resultados e a sua validação. Os resultados da pesquisa mostraram que o uso de coordenadas 3D é possível de se estabelecer componentes vetoriais para a comparação dos resultados entre os dois métodos estudados. Os resultados ainda mostraram que os valores obtidos por topografia divergem dos valores obtidos pelos medidores triortogonais. A discrepância existente entre os resultados ficou ainda mais em evidencia a partir da avaliação dos mesmos por meio do diagrama de caixa.

Da Cruz (2015) desenvolveu uma pesquisa visando à integração de dados de forma multidisciplinar, obtidos por diferentes áreas: Ciências Geodésicas, Geologia e Engenharia Civil; com base nas diretrizes da Associação Internacional de Geodésia (IAG), de promover atividades científicas nos diversos ramos da ciência em benefício da humanidade, a partir das ciências geodésicas. Cada área acima citada realiza o processo de monitoramento por técnicas e equipamentos diferentes, a integração dos dados obtidos tinha como objetivo combinar e interpretar os dados levantados de modo a proporcionar ao profissional os resultados necessários à sua área de atuação. Para alcançar os objetivos, foi necessária a determinação precisa da altura do prisma, levantamento por posicionamento GNSS, levantamentos topográficos utilizando os métodos de poligonação e irradiação, realização de nivelamento geométrico de primeira ordem e o desenvolvimento de um sistema computacional para o processamento e análise dos dados coletados. Ao final da pesquisa foi concluído que os pontos de monitoramento a jusante e a montante da barragem deslocam-se ao longo do tempo, onde os maiores deslocamentos acontecem na região central da barragem. Conclui-se ainda que os deslocamentos existentes nos pontos de controle não apresentam riscos quanto à segurança da barragem, podendo ser ocasionadas por variações térmicas e em razão da variação do volume de água.

O estudo realizado por Mezine (2016) teve por objetivo desenvolver uma metodologia para o monitoramento do assoreamento no reservatório da UHE Mauá, onde executou o levantamento batimétrico à montante da barragem em uma área de 170382,44m². Realizando linhas de sondagens regulares, perpendiculares ao curso d'água, para obter a superfície do fundo do lago, e linhas de sondagens de verificações, longitudinais ao fluxo do rio, para calcular as incertezas verticais e o Padrão de Exatidão Cartográfica dos produtos

gerados. O volume assoreado foi calculado comparando os dados provenientes do levantamento batimétrico com a superfície de referência obtida pelo recobrimento aéreo feito com o levantamento *Laser* antes do enchimento do reservatório. A redução das sondagens batimétricas com relação ao nível instantâneo da água do reservatório foi realizada utilizando três técnicas distintas de coleta de dados, régua linimétrica, *Real-time Kinematic* (RTK) estático e RTK móvel. As análises das diferenças entre as superfícies do fundo foram feitas através processamento digital de imagens utilizando a interpolação dos modelos digitais pelo método da Vizinhança Natural, estrutura de dados matricial.

Ao final, Mezine (2016) constatou que elas não representam apenas o volume assoreado do reservatório, mas também diferenças de elevação observadas em locais em que a presença de vegetação arbórea prejudica a definição real do fundo do lago. A aplicação de diferentes métodos de redução das sondagens batimétricas demonstrou que os dois primeiros métodos apresentaram resultados equivalentes, mostrando a viabilidade da aplicação dos mesmos.

Gemin (2017) realizou estudo para desenvolver um sistema para calibração horizontal de sistemas de nivelamento digitais, com a mira estática durante o procedimento de calibração. A metodologia proposta na pesquisa consistiu na adaptação de uma estrutura de calibração de miras verticais de invar, do Laboratório Aplicado a Geodésia (LAIG) da UFPR, para um sistema de calibração horizontal. Como conclusão da pesquisa foi colocado que a metodologia proposta pode ser empregada para a calibração de níveis digitais. Os resultados da pesquisa mostraram que a calibração realizada pela metodologia proposta atende aos padrões de qualidades da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, NBR ISO 9001:2000 (controle de dispositivos de medição e monitoramento), ABNT NBR ISO 10012: 2004 (Sistemas de Gestão da Medição - Requisitos para os processos de medição e equipamentos de medição) e ABNT NBR ISO/IEC 17025 (requisitos relativos à calibração de equipamentos).

Muguio (2018) em sua pesquisa realizada na UHE de Mauá, avaliou a densidade do Concreto Compactado a Rolo (CCR), utilizando o método gravimétrico para avaliar as variações de densidades e o método de eletrorresistividade (caminhamento elétrico 2D) para estimar a extensão e a

profundidade das anomalias, o método acima citado se baseia na injeção de correntes elétricas no solo através de eletrodos. Os resultados mostraram que avaliando a densidade do CCR, as anomalias negativas na região nordeste (NE) da barragem podem configurar baixas densidades influenciadas pela presença de água em partes do túnel do desvio. Na região central, os baixos gravimétricos devem refletir principalmente a presença de água no vertedouro e, secundariamente, o concreto saturado. Por fim, os altos gravimétricos podem ser explicados pelo concreto menos saturado, ou por uma maior espessura de soleira de diabásio situado no maciço rochoso da fundação da barragem e também pelos diques de diabásio associados ao Arco de Ponta Grossa. Outra conclusão evidenciada nesta pesquisa refere-se à variação do nível do reservatório que influencia diretamente no valor da gravidade. Assim, a diminuição do valor da gravidade está relacionada com a massa atrativa menor decorrente da diminuição do nível d'água no reservatório.

Ribeiro (2008) realizou estudo sobre os principais problemas no monitoramento das estruturas de uma barragem por meio de instrumentação geodésica, referente à confirmação da estabilidade dos pontos da rede geodésica de referência. Segundo o autor, os eventuais deslocamentos detectados nas estruturas podem ser resultados de análises e interpretações equivocadas; já que os pontos de referência podem ser considerados estáveis sem indicação dessa condição. Nesse contexto o autor realizou a verificação da estabilidade dos pilares da rede geodésica da UHE de ITAIPU por meio da tecnologia GPS, propondo uma metodologia que compreendesse o planejamento e a coleta dos dados realizada em quatro épocas (campanhas) distintas. No processamento dos dados verificou-se a melhor estratégia usando a fase da portadora L1; devido às linhas de base curtas (até 5km). Os resultados da aplicação da metodologia foram as coordenadas ajustadas dos pilares da rede com as suas respectivas precisões para cada época. Estas coordenadas e suas matrizes variância-covariância foram então comparadas entre combinação de campanhas com a aplicação do teste de congruência global; para a verificação final da significância estatística das diferenças encontradas.

Os resultados em Ribeiro (2008) demonstraram que as investigações da estabilidade dos pilares da rede geodésica em estudo, dependem diretamente da qualidade das observações e do ajustamento, bem como da configuração da

rede geodésica. Com os dados ajustados aplicou-se o Teste de Congruência Global para verificação estatística dos resultados obtidos. O autor concluiu que a rede de pilares de referência de ITAIPU é considerada estável dentro das diferenças de 0,5 mm até 3 mm nas coordenadas E e N e de 0,5 mm até 11 mm na altitude geodésica.

Deslocamentos em redes geodésicas foram alvos de estudo de Fazan (2010), na qual ele utilizou o sistema GNSS e redes geodésicas no monitoramento de estruturas para determinar as coordenadas dos pontos na UHE de Itaipu e confirmar a ocorrência de deslocamentos utilizando o Teste de Congruência Global (TCG) e Análise Geométrica. A metodologia proposta na pesquisa foi aplicada no monitoramento da barragem da UHE de Itaipu e pilares da sua rede de trilateração. Para o desenvolvimento da pesquisa foram realizadas quatro campanhas de observações. Os dados de cada campanha foram processados para determinar vetores, e posteriormente ajustados o vetorial pelo Método dos Mínimos Quadrados, para cada época de levantamento. Obtendo assim, as coordenadas dos pontos da rede e a matriz variância-covariância, para cada época de observação. As informações foram combinadas duas a duas para aplicar a Análise Geométrica e o TCG. Os resultados dos dois métodos de teste apresentaram boa correlação entre si e indicaram possíveis deslocamentos em pontos da rede de referência de monitoramento por trilateração e pontos da barragem.

Pereira (2012) em sua pesquisa demonstra o potencial da Geodesia por meio do estudo de uma área de risco natural, a partir de uma abordagem metodológica relacionada com o monitoramento da superfície de uma encosta em processo de deslizamento de terra, no município de Camaragibe, Pernambuco. Uma estrutura geodésica foi implantada com a finalidade de monitorar a encosta, através da detecção de deslocamentos de pontos, no qual se realiza uma comparação de dois conjuntos de coordenadas e desníveis oriundos dos dados ajustados de diferentes técnicas de levantamento, tais como: método polar, nivelamento geométrico e rastreamento estático GPS, cada um deles com um propósito específico dentro do projeto de monitoramento da encosta. A análise geodésica espaço temporal dos procedimentos realizados por Pereira (2012), demonstraram a movimentação representada pelos parâmetros de orientação e velocidade de blocos em deslizamento. O autor concluiu que a

Geodésia é uma ferramenta útil na caracterização de uma área em risco natural, como a superfície de uma encosta em processo de deslizamento, sendo possível identificar as regiões com possíveis tendências as movimentações futuras acompanhadas da sua respectiva orientação e velocidade de deslocamento, desta forma, é perfeitamente viável e justificável a adoção da metodologia para a detecção de deslocamentos superficiais em encostas, capaz de gerar resultados absolutos com alta precisão e confiabilidade.

Andrianova (2008) apresenta a importância de se monitorar possíveis deslocamentos desde o início da execução da obra, tendo em vista o aumento da complexidade dos edifícios e estruturas construídas. Essa complexidade ocorre devido ao aumento do número de andares e à profundidade da porção subterrânea destas construções. O autor descreve também um procedimento para a realização do monitoramento geodésico de alta precisão aplicado à construção civil com o objetivo de garantir a segurança e preservação destas estruturas. Como estudo de caso, apresenta o monitoramento durante a construção de um muro de retenção em Moscou.

Ibrahim et al. (2010), apresentaram um estudo sobre monitoramento de deformação estrutural em dois prédios na University Technology MARA (UiTM), na cidade de Selangor na Malaysia, usando técnicas de monitoramento geodésico a partir do posicionamento por GPS, poligonação para levantamento de alvos e técnicas geotécnicas, através de medição com paquímetro. No 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. Os autores comentam que as 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). Os deslocamentos detectados no edifício Twin Tower foram de 1 mm a 10 mm, e para o Centro de Inovação, os deslocamentos ficaram entre 1 mm e 9 mm. Segundo os autores, apesar dos deslocamentos detectados na estrutura em ambos os edifícios está dentro da tolerância permitida, o estudo mostrou vantagens e desvantagens para as técnicas adotadas.

Constantino e Angelini (2011) investigam um fenômeno de subsidência em várias áreas urbanas causadas pela mineração de uma mina de sal,

localizada na região de Bages, na Catalunha, conhecida como *Conca Potàsica*. Além da subsidência natural, ocorrida pela dissolução do potássio e do magnésio encontrados no local, a mineração superficial e subterrânea contínua realizada pelas empresas mineradoras acelera o processo de subsidência. Na segunda metade do século XX foram registradas deformações de aproximadamente 1m na região. O estudo utiliza uma rede geodésica de monitoramento utilizando equipamentos GPS para detectar eventuais deformações da região mencionada. A análise estatística da posição de trinta e seis pontos distribuídos em toda a região mostra a ocorrência de variações em oito deles.

Em 2014 a barragem de Ermenek, a segunda mais alta da Turquia, foi objeto de estudo para Yigit et. al. Os autores realizaram comparações de resultados obtidos através de métodos geodésicos e análises do Modelo de Elementos Finitos (MEF) durante o primeiro enchimento do reservatório, sendo realizadas oito campanhas de medições até o reservatório alcançar sua capacidade total. A conclusão foi que os deslocamentos ocorriam periodicamente e de maneira linear e se relacionavam com as variações térmicas sazonais e com o volume de água. Quanto aos resultados obtidos pelos diferentes métodos de análises, segundo os autores, as deformações medidas com base em dados geodésicos mostraram boa concordância com a deformação prevista obtida pela análise de MEF.

2.2 TÉCNICAS GEODÉSICAS APLICADAS AO MONITORAMENTO

Levantamentos geodésicos são empregados para a determinação de deslocamentos de pontos na superfície de um objeto em relação a outros pontos como estáveis, podendo estabelecer uma rede de monitoramento a partir destes (DEPARTMENT OF THE ARMY, 2002).

As redes de monitoramento geodésicas se classificam em rede absoluta, quando os pontos fixos estão fora do objeto estudado, sendo possível determinar o deslocamento de cada ponto individualmente ou rede relativa quando todos os pontos estão no objeto investigado (corpo deformável), determinando neste caso, os deslocamentos relativos (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

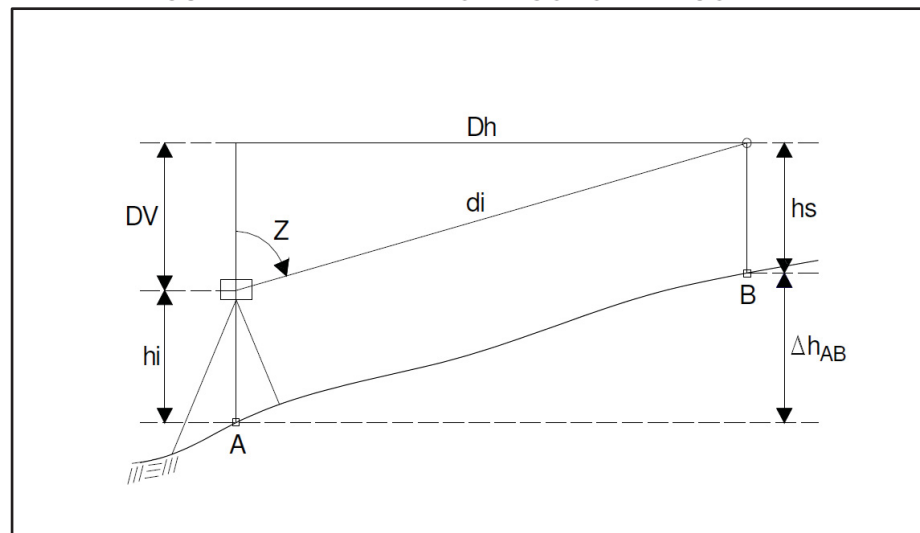
Alguns métodos e técnicas de levantamentos topográficos e geodésicos empregados no monitoramento de estruturas serão tratados no próximo tópico.

2.2.1 Nivelamento

É o processo para a determinação da distância vertical entre dois pontos em que uma linha de nivelamento é formada, onde os valores dos desníveis para os pontos subsequentes são cotas absolutas ou altitudes. Os principais métodos de nivelamento utilizados são:

- **Trigonométrico:** Realizado com o uso de Teodolitos e Estações Totais com visadas independentes da inclinação (FIGURA 1). O método é menos preciso do que o método geométrico. As cotas são obtidas por meio da leitura de ângulos e distâncias. Apesar do método ser menos preciso, é mais rápido de ser executado do que o geométrico;

FIGURA 1 - NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO



FONTE: VEIGA et al., (2012).

Onde:

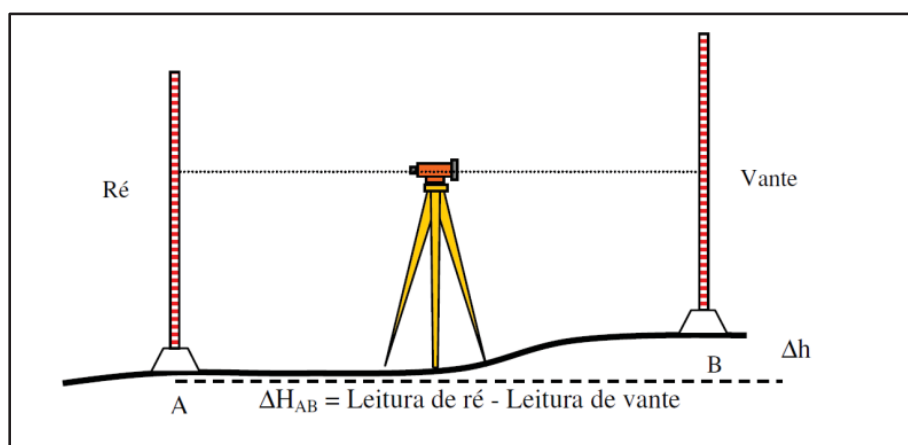
Δh_{AB} = Desnível entre os pontos A e B sobre o terreno;

h_i = Altura do instrumento;

h_s = Altura do sinal (prisma);
 D_i = Distância inclinada;
 D_h = Distância horizontal;
 D_v = Distância vertical;
 Z = Ângulo zenital.

- **Geométrico:** Neste método é utilizado miras verticais graduadas e níveis topográficos para medir o desnível por meio de visadas horizontais. O método de visadas iguais (FIGURA 2), onde a visada de ré e vante ficam aproximadamente iguais, com a variação máxima de 2 metros para a posição do equipamento, proporcionando a redução de erros, como por exemplo, erro de colimação vertical do nível, refração atmosférica e curvatura da Terra (IBGE, 2017).

FIGURA 2- NIVELAMENTO GEOMÉTRICO



FONTE: VEIGA et al., (2012).

2.2.2 Posicionamento GNSS

O Sistema Global de Navegação por Satélite – GNSS, tem sido ao longo dos anos cada vez mais empregado no monitoramento de estruturas, como barragens, represas, pontes, torres e outras construções.

GNSS é uma denominação que contempla sistemas de navegação com cobertura global, como o GPS, que pertence aos Estados Unidos da América

(EUA), o GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), sistema Russo, e o Galileo, sistema da União Europeia, além de uma série de infraestruturas espaciais (SBAS – *Satellite Based Augmentation System*) e terrestre (GBAS – *Ground Based Augmentation System*) que associadas aos sistemas proporcionam maior precisão e confiabilidade (SEGANTINE, 2005; MONICO, 2008).

As observações básicas GNSS que permitem determinar a posição 3D, velocidade e o tempo, são a pseudodistância e fase da onda portadora ou fase de batimento da onda portadora (SEEBER, 2003; MONICO, 2008).

A pseudodistância, a partir de medições de código, é obtida da correlação entre o código gerado pelo satélite no instante de transmissão e sua réplica gerada no receptor no instante de recepção, multiplicado pela velocidade da luz. É a medida da distância entre o satélite e a antena do receptor referido as épocas de emissão e recepção de códigos (MONICO, 2008; LEICA, 2015).

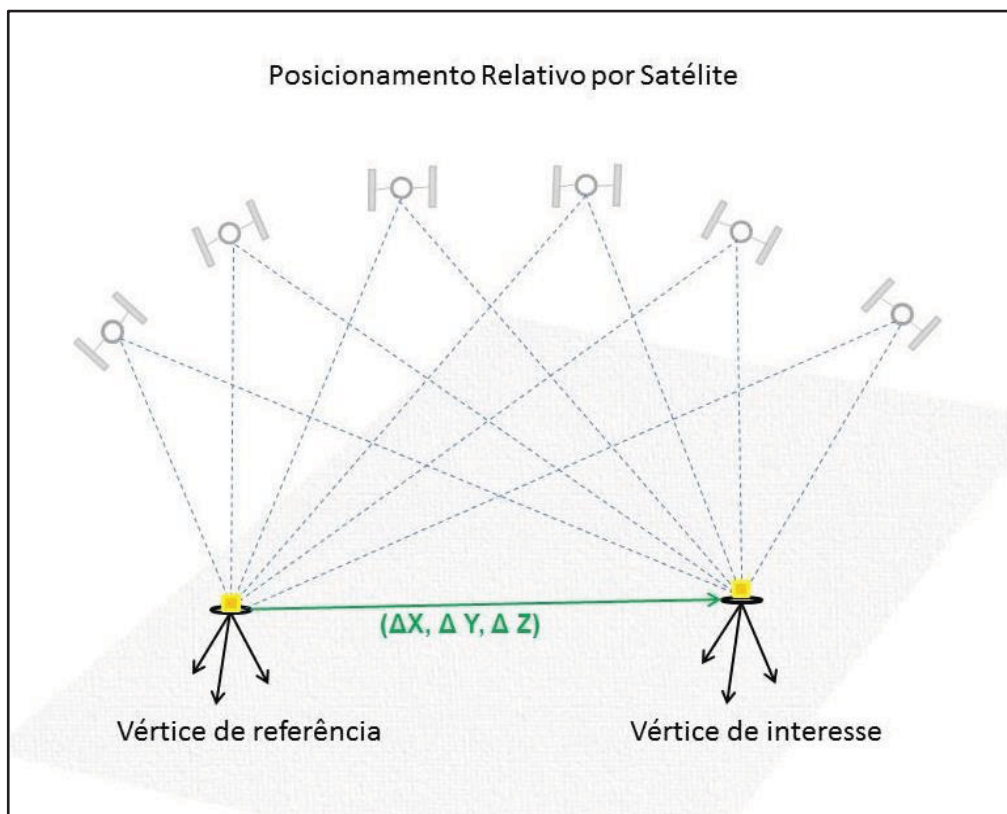
A fase da onda portadora é igual à diferença da fase do sinal do satélite, recebido no receptor, e a fase do sinal gerada no receptor, ambas no instante de recepção do sinal. Os receptores medem a parte fracional da portadora e a partir daí efetuam a contagem do número de ciclos, o que resulta em uma medida contínua (SEGANTINE, 2005; MONICO, 2008).

O posicionamento por GNSS pode ser realizado por diferentes métodos. O posicionamento absoluto ou posicionamento por ponto preciso (PPP) é o método de posicionamento GNSS em que as coordenadas de um ponto são obtidas com a utilização de somente um receptor. Para tal, o receptor necessita coletar medidas da pseudodistância derivada do código C/A. Esse código é modulado na portadora L1. As órbitas e correções para os relógios dos satélites são obtidos a partir das efemérides transmitidas. Quando se utiliza também a fase da onda portadora como observável, incluindo-se efemérides precisas, correções para os relógios dos satélites e modelos apropriados para vários fenômenos físicos que afetam as observações, o posicionamento por ponto passa a proporcionar acurácia ao nível do centímetro, chegando ao milímetro (ZUMBERGE et al., 1997; MONICO, 2000; 2008).

No posicionamento relativo, a posição de um ponto é determinada com relação a outros pontos, cujas coordenadas são conhecidas. Portanto, deve-se dispor de dois ou mais receptores GNSS. Estes pontos com coordenadas

conhecidas são chamados de estações de referência ou base. O conceito fundamental do posicionamento relativo é que os dois ou mais receptores envolvidos rastreiem, simultaneamente, pelo menos dois satélites comuns, conforme ilustrado na figura 3 (ZUMBERGE et al., 1997; MONICO, 2000; 2008).

FIGURA 3 - POSICIONAMENTO RELATIVO POR GNSS



FONTE: A autora (2018).

No posicionamento por RTK ou posicionamento cinemático em tempo real, uma estação de referência provê correções instantâneas para estações móveis, o que faz com que a precisão obtida chegue ao nível do centímetro. A estação base retransmite a fase da portadora que ela mediu, e as unidades móveis comparam suas próprias medidas da fase com a recebida da estação de referência. Isto permite que as estações móveis calculem suas posições relativas com precisão milimétrica, ao mesmo tempo em que suas posições relativas absolutas são relacionadas com as coordenadas da estação base.

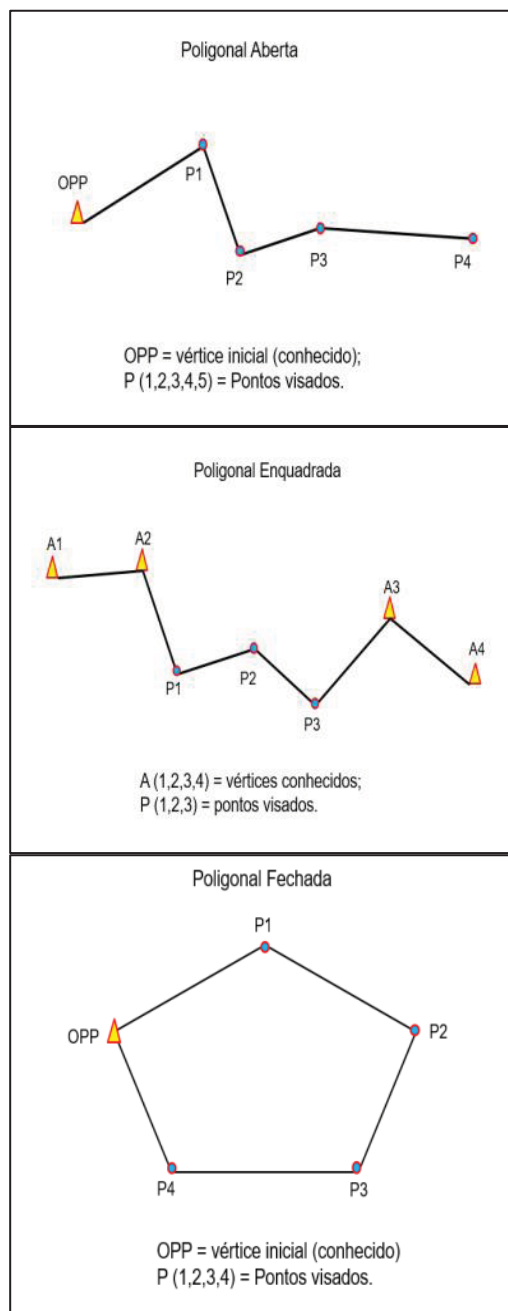
A técnica exige a disponibilidade de pelo menos uma estação de referência, com as coordenadas conhecidas e dotada de um receptor GNSS e um rádio-modem transmissor. A estação gera e transmite as correções

diferenciais para as estações móveis, que usam os dados para determinar suas posições. O formato das correções diferenciais é definido pela *Radio Technical Committee for Maritime Service* (RTCM). O emprego das correções diferenciais faz com que a influência dos erros (do relógio, das efemérides e da propagação do sinal da atmosfera) devidos à distância entre a estação base e a móvel seja minimizada (MONICO, 2008).

2.2.3 Poligonação

A poligonação consiste na medição de ângulos e distâncias resultando em uma sucessão de alinhamentos. As poligonais classificam-se em aberta, enquadrada e fechada (FIGURA 4), onde na poligonal aberta, parte-se de um ponto com coordenadas conhecidas e finaliza-se em um ponto cujas coordenadas deseja-se determinar. Não é possível determinar erros de fechamento, devendo tomar todos os cuidados necessários no decorrer do levantamento. Na poligonal enquadrada, parte de dois pontos conhecidos e finaliza em outros dois pontos com coordenadas também conhecidas, permitindo assim, a verificação do erro de fechamento angular e linear. Na poligonal fechada, o ponto inicial coincide com o final, sua principal vantagem é permitir a verificação de erro de fechamento angular e linear.

FIGURA 4 - TIPOS DE POLIGONAIS



FONTE: A autora (2018).

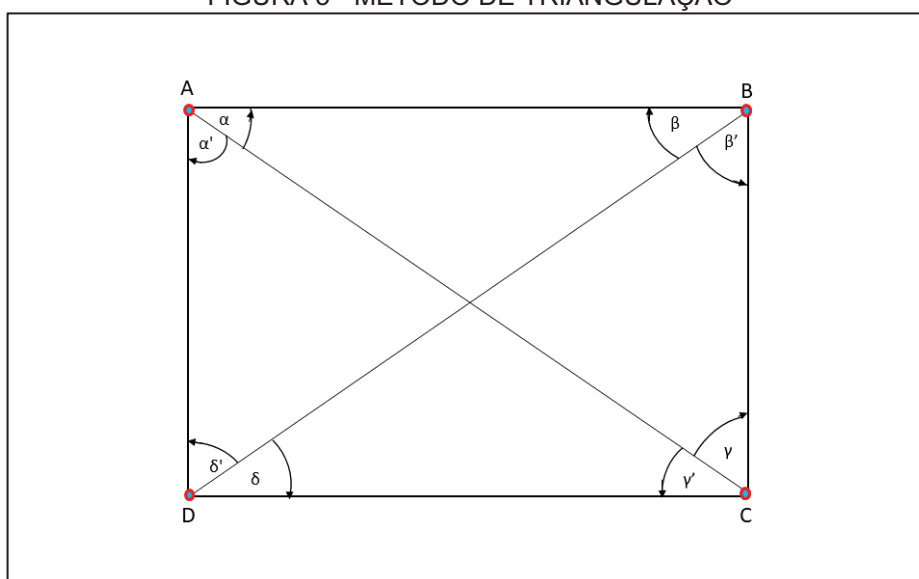
2.2.4 Triangulação e Trilateração

Segundo Sá (2016), o astrônomo dinamarquês Tycho Brahe (1546 – 1601) usou processos de triangulação para estabelecer a ligação geodésica entre a ilha de Hven e as principais ilhas da Dinamarca. Para Wolf (1997) a triangulação (FIGURA 5) é um método baseado em uma série de intersecções

sucessivas ou encadeadas, em que se mede uma única distância (base) e todos os ângulos dos triângulos formados entre os alinhamentos de vértices intervisíveis de uma rede de triângulos.

A triangulação é considerada um método preciso e foi utilizada para densificar a rede geodésica brasileira. O método privilegia a obtenção dos ângulos em detrimento das distâncias de um triângulo (KAHMEN; FAIG, 1994; BREED, 2012).

FIGURA 5 - MÉTODO DE TRIANGULAÇÃO



FONTE: A autora (2018).

Onde:

A,B,C,D = Vértices da triangulação;

$\alpha, \alpha', \beta, \beta', \gamma, \gamma', \delta, \delta'$ = Ângulos internos medidos.

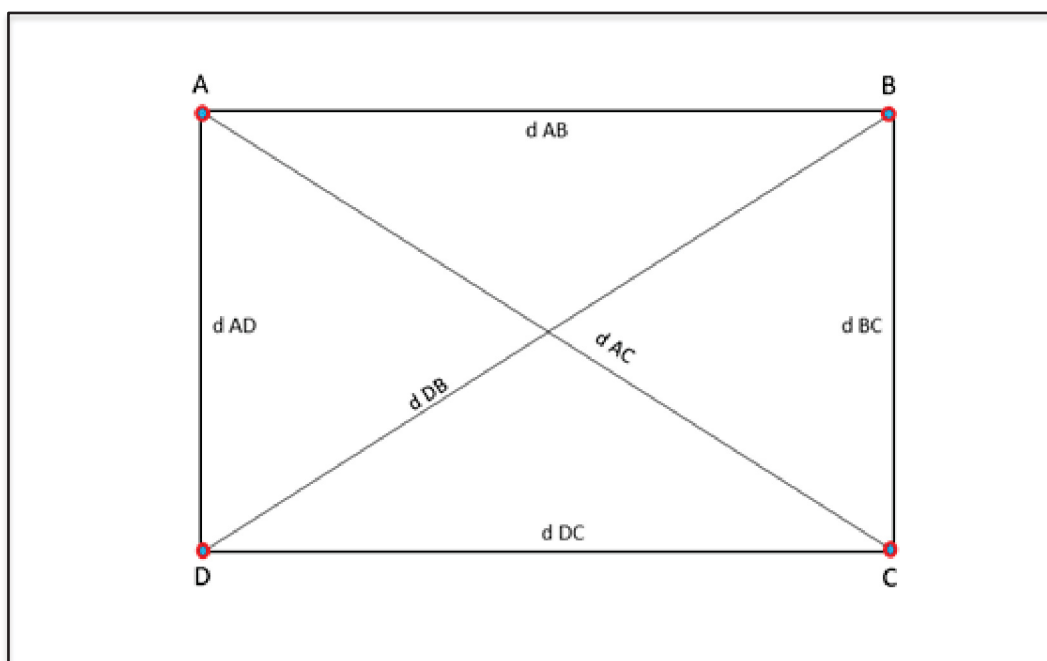
Com base na extensão e finalidade do trabalho e, conseqüentemente, no grau de precisão desejado, os levantamentos de triangulação são classificados como de primeira ordem, de segunda ordem ou de terceira ordem.

Um sistema de triangulação de segunda ordem consiste em uma rede dentro de uma triangulação de primeira ordem. Uma triangulação de terceira ordem é uma estrutura fixa dentro e conectada a um sistema de triangulação de

segunda ordem. Serve para fornecer o controle imediato para observações detalhadas de engenharia e localização (WOLF, 1997).

A trilateração consiste em uma série de triângulos unidos ou sobrepostos (FIGURA 6). No entanto, para a trilateração, os comprimentos de todos os lados do triângulo são medidos e apenas alguns ângulos são medidos para estabelecer o azimute. A Trilateração tornou-se viável com o desenvolvimento de medidores eletrônicos de distância que possibilitaram a medição dos comprimentos com alta precisão em quase todas as condições de campo (KAHMEN; FAIG, 1994).

FIGURA 6 - MÉTODO DE TRILATERAÇÃO



FONTE: A autora (2018).

Onde:

A,B,C,D = Vértices da trilateração;

d (AB, AD, AC, BC, DC, DB) = Lados dos triângulos.

Um sistema combinado de triangulação e trilateração forma uma rede de triângulos em que todos os ângulos e todos os comprimentos são medidos, esse sistema combinado é indicado para o controle horizontal. Os procedimentos de

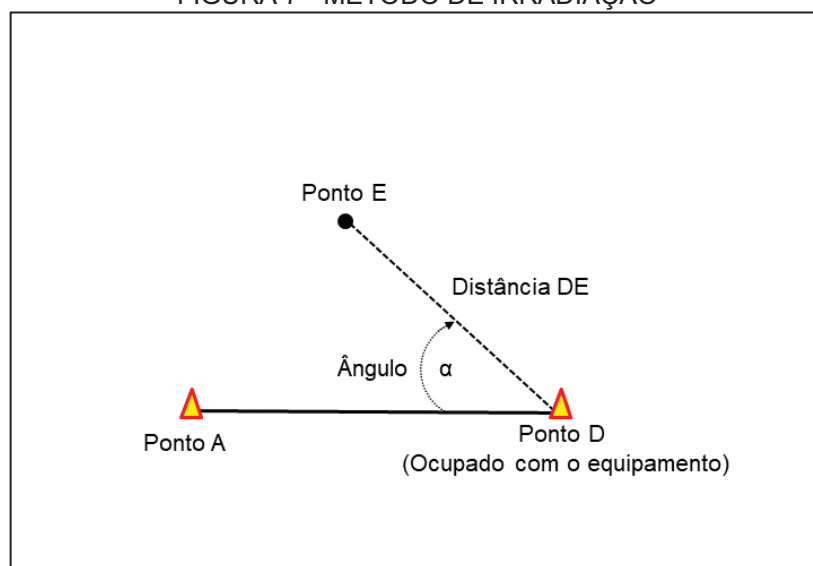
campo para o estabelecimento da estação de trilateração são semelhantes aos procedimentos utilizados para a triangulação assim como as figuras geométricas formadas (WOLF, 1980; BREED, 2012).

As redes de triangulações e trilaterações topográficas são essenciais para fornecer coordenadas de pontos na superfície terrestre com alta precisão, necessárias para o projeto, construção e monitoramento de obras importantes de engenharia como pontes, túneis ou barragens (MELO et al., 2012).

2.2.5 Irradiação

Consiste em, a partir de uma linha de referência conhecida, medir um ângulo e uma distância em relação a uma origem e uma direção de referência, para a determinação de coordenadas. É semelhante a um sistema de coordenadas polares. A distância pode ser obtida utilizando uma trena, distanciômetro eletrônico ou estação total. Este método é muito empregado no levantamento de detalhes em campo. A determinação de coordenadas do ponto de interesse é realizada a partir da observação da distância entre um dos vértices conhecidos até o vértice de interesse, bem como do ângulo formado entre o alinhamento do vértice de interesse e o alinhamento dos vértices conhecidos, como ilustrado na figura 7 (ESPARTEL, 1987; DOUBECK, 1989; BREED, 2012; SILVA; SEGANTINE, 2015).

FIGURA 7 - MÉTODO DE IRRADIAÇÃO



FONTE: A autora (2018).

Onde:

D = Ponto ocupado com a Estação Total, com coordenadas conhecidas;

A = Ponto de Orientação, com coordenadas conhecidas;

E = Ponto onde serão determinadas as coordenadas;

DE = Distância entre a estação Total e a vante;

α = Direção horizontal entre ponto A e o ponto E.

Diversas aplicações geodésicas, astronômicas e de navegação requerem soluções de triângulos fazendo uso da geometria plana. Um triângulo de forma geral tem seis características, onde três são lineares e três angulares. O problema clássico da trigonometria plana é especificar três das seis características e determinar as outras três. Para todos os casos no plano, pelo menos um dos comprimentos laterais deve ser especificado. O método padrão de resolver o problema é usar relações trigonométricas fundamentais com base no cálculo do comprimento da hipotenusa de um triângulo.

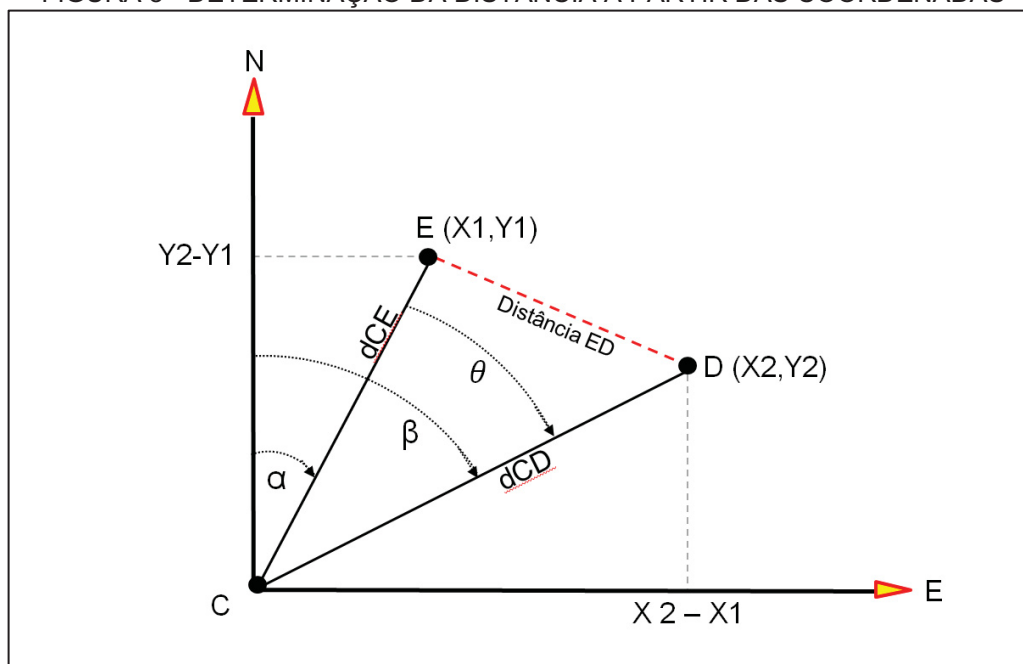
2.2.5.1 Determinação da distância Euclidiana

A distância entre dois pontos é o segmento de reta que liga o ponto A ao ponto B. Essa distância pode ser obtida por diversas formas sendo duas as mais comuns, utilizando a forma direta com uma trena ou utilizando a forma indireta, podendo ser através da aplicação de modelos matemáticos associados a resolução de triângulos.

Na figura 8, a distância entre os dois vértices E e D pode ser determinada fazendo uso da geometria euclidiana plana, onde a partir dos ângulos alfa e beta (azimute das direções CE e CD, respectivamente) e da distância observada entre os alvos CE e CD obtém-se as coordenadas dos vértices E e D, para então determinar a distância entre os vértices ED a partir da equação 1.

$$D_{D-E} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (1)$$

FIGURA 8 - DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA A PARTIR DAS COORDENADAS



FONTE: A autora (2018).

Onde:

C = Ponto de ocupação do equipamento;

E = Alvo esquerdo;

D = Alvo direito;

d_{CD} = Distância do alinhamento CD

d_{CE} = Distância do alinhamento CE

X e Y = Coordenadas dos alvos E e D.

α = Azimute do ponto E;

β = Azimute do ponto D;

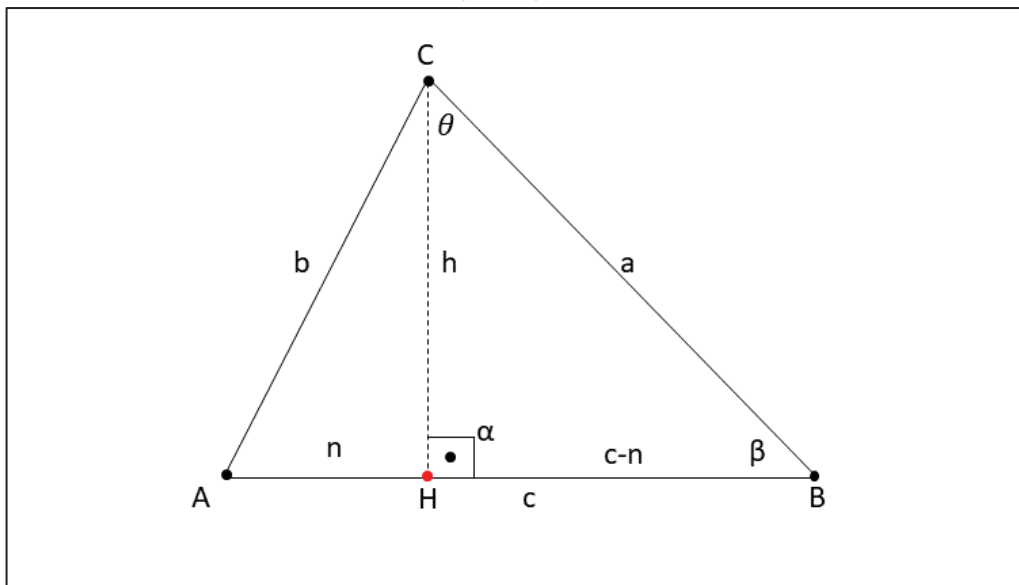
θ = Ângulo entre os alvos E e D;

2.2.5.2 Determinação da distância entre alvos aplicando a Lei dos Cossenos

Num triângulo qualquer, a distância entre dois vértices pode ser obtida por meio da Lei dos Cossenos. O entendimento geométrico dessa lei baseia-se na determinação de um dos lados do triângulo, tendo como informação os outros dois lados e o ângulo formado entre eles.

A partir da figura 9 (triângulo qualquer), e utilizando o teorema de Pitágoras, serão demonstradas as bases matemáticas para a concepção da Lei dos Cossenos:

FIGURA 9 - ELEMENTOS DEDUTÍVEIS DA LEI DOS COSSENOS NUM TRIÂNGULO QUALQUER



FONTE: A autora (2018).

O triângulo ABC não pode ser tratado diretamente pelo teorema de Pitágoras por não ter um de seus ângulos ou uma de suas faces conhecidas. Desta forma, faz-se necessária a definição de uma altura (h) que então permitirá considerar o triângulo original sendo formado por dois outros, porém agora retângulos (AHC e CHB) e com interface comum entre si no segmento CH. Feitas essas considerações, pode-se então resolver ambos os triângulos utilizando o teorema, a fim de correlacioná-los, como segue (ALENCAR FILHO, 1969):

$\triangle AHC$:

$$b^2 = n^2 + h^2 \quad (2)$$

$\triangle CHB$:

$$a^2 = (c - n)^2 + h^2$$

$$a^2 = c^2 - 2cn + n^2 + h^2 \quad (3)$$

$\triangle AHC$:

$$\begin{aligned} \cos\alpha &= \frac{n}{b} \\ n &= b * \cos\alpha \end{aligned} \quad (4)$$

Substituindo a equação (2) em (3) tem-se:

$$a^2 = c^2 - 2cn + b^2 \quad (5)$$

E substituindo a equação (4) na (5), obtém-se a expressão (6) que representa a Lei dos Cossenos em função dos lados e do ângulo α .

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos\alpha \quad (6)$$

$$a = \sqrt{b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos\alpha} \quad (7)$$

Na equação (7), α representa a distância ente os vértices B e C do triângulo.

Analogamente, com o uso respectivo da fórmula, é possível fazer os mesmos cálculos e deduções para os demais lados e ângulos:

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cdot \cos\beta \quad (8)$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos\theta \quad (9)$$

Estes recursos matemáticos têm aberto o horizonte de seu emprego para a solução dos mais diversos problemas na ciência de uma maneira abrangente. Estas aplicações têm especial emprego na determinação de distâncias planas entre pontos inacessíveis, como nas margens de rios, lagos e

em barragens, assim como a determinação de alturas de estruturas, entre outras.

2.3 AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES

O ajustamento só faz sentido nos casos em que o número de observações é maior que o número de incógnitas, ou seja, quando há redundância de informações. As observações são sujeitas às flutuações probabilísticas, de forma que os dados redundantes são geralmente inconsistentes com o modelo funcional e, assim cada amostra fornecerá resultados diferentes.

Para obter uma solução única, utiliza-se a técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados, o Método dos Mínimos Quadrados – MMQ. Uma grande vantagem do método é a possibilidade de efetuar o ajustamento simultâneo, de ângulos, distâncias, azimutes, coordenadas e observações de GPS, porém todas controladas através de pesos nos modelos matemáticos funcionais e estocásticos empregados (GEMAEL et al. ,2015). O ajustamento pelo MMQ pode ser realizado para os métodos paramétrico (modelo das equações de observações), o dos correlatos (modelo das equações de condição) ou ainda o combinado, método utilizado nesta pesquisa.

Segundo Wolf (1980) e Gemael et al. (2015), o ajustamento tem por objetivo:

- Estimar, mediante a aplicação de modelos matemáticos adequados e do MMQ, um valor único para cada uma das incógnitas do problema.
- Estimar a precisão de tais incógnitas e a eventual correlação entre elas.

2.3.1 Minimização de Erros

As grandezas fundamentais das observações efetuadas em topografia são as medidas de direções horizontais, ângulos verticais e distâncias inclinadas, que podem ser obtidas tanto por métodos diretos quanto indiretos.

Pelo método direto, a observação é processada diretamente sobre a grandeza procurada, comparando-a com um valor padrão. No método indireto, pode-se utilizar o tempo e a velocidade de propagação da onda eletromagnética aliados a modelos matemáticos que consideram tais informações e assim calcular o valor da distância desejada (WOLF; GHILANI, 1997; GEMAEL, 2004; GEMAEL et al., 2015).

Toda e qualquer medida ou observação possui uma incerteza ou “erros de medição” das mais diversas magnitudes, neste contexto, o uso de observações redundantes no ajustamento se faz necessário para melhorar a acurácia dos resultados estimados e detectar possíveis erros, que não sejam aleatórios, nos modelos e ou nas observações. Gemael (2004), afirma que estes erros podem ser atribuídos à falibilidade humana, à imperfeições do equipamento e a influências das condições ambientais.

O *Department of The Army* (2002) 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;
- 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) serve para as correções da influência destes fatores nas distâncias medidas eletronicamente e das direções observadas (MARTINI, 2005; GOMES, 2006). As estações totais, em sua totalidade, permitem a aplicação da correção desse erro sistemático em tempo real.

Cabe salientar que cada fabricante utiliza seu modelo matemático para corrigir as distâncias medidas, de acordo com o manual do fabricante do equipamento. Para tal, a Estação Total Leica, modelos TCRA1205 e TS15, utiliza as equações 10 e 11, respectivamente (LEICA, 2017):

$$C_a = 286,34 - \left[\frac{0,29525 \cdot P}{(1+\alpha \cdot t)} - \frac{4,126 \cdot 10^{-4} \cdot h}{(1+\alpha \cdot t)} \cdot 10^X \right] \quad (10)$$

$$C_a = 288,34 - \left[\frac{0,29195 \cdot P}{(1+\alpha \cdot t)} - \frac{4,126 \cdot 10^{-4} \cdot h}{(1+\alpha \cdot t)} \cdot 10^X \right] \quad (11)$$

Onde:

$$X = \frac{7,5 \cdot t}{237,3 + t} + 0,7857$$

C_a = correção atmosférica (ppm);

P = pressão em (mb);

t = temperatura ambiente (°C);

h = humidade relativa do ar (%);

$$\alpha = \frac{1}{273,15}$$

2.3.2 Propagação de variância-covariância

Assumindo-se que as observações são isentas de erros grosseiros e sistemáticos, as variâncias são utilizadas como estimativas de precisão das observações. Segundo Vanícek e Krakiwsky (1986), a matriz variância covariância (MVC) ou simplesmente matriz covariância é, provavelmente, a quantidade mais importante da estatística usada em Geodésia.

As quantidades medidas nos levantamentos geodésicos, topográficos e na engenharia em geral, normalmente são utilizadas para cálculo de outras quantidades. A análise das variâncias e covariâncias das medidas calculadas a

partir de outras é feita por meio de propagação. A Lei de propagação das covariâncias é dada por (GEMAEL, 2004):

$$\Sigma_y = G\Sigma_x G^T \quad (12)$$

Onde:

Σ_y = Vetor das quantidades calculadas;

G = Matriz dos coeficientes;

Σ_x = MVC das observações.

O resultado da equação 12 é uma matriz do tipo $n \times n$, onde os elementos na diagonal principal representam as variâncias, e os elementos fora da diagonal são as covariâncias de um conjunto de observações.

2.3.3 Método de ajustamento combinado

No ajustamento, o modelo funcional descreve as propriedades determinísticas da realidade física, enquanto, o modelo estocástico descreve as propriedades probabilísticas das variáveis envolvidas, particularmente aquelas que representam as observações (MIKHAIL; ACKERMAN, 1976; GEMAEL et al., 2015).

Os modelos funcionais aplicados ao método combinado são formados por equações não explícitas do tipo (WOLF, 1980; GEMAEL, 2004; GEMAEL et al., 2015):

$$F = (L_a, X_a) = F(L_b + V, X_0 + X) = 0 \quad (13)$$

Onde:

$L_a = L_b + V$ (Observações ajustadas)

$X_a = X_0 + X$ (Parâmetros ajustados);

O modelo linearizado correspondente ao método combinado de ajustamento de observações é obtido através da linearização da equação (17) utilizando a expansão em série de Taylor. Tomando-se apenas os dois primeiros

termos da série, tem-se: (GEMAEL, 2004; WOLF; GHILANI, 1997; GEMAEL et al., 2015):

$$A = \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{X_0} \quad B = \frac{\partial F}{\partial L_a} \Big|_{L_b} \quad W = F(X_0, L_b) \quad (14)$$

Resulta:

$$F = (X_a, L_a) = F(X_0 + X, L_b + V) = 0 \quad (15)$$

$$F(X_a, L_a) \approx F(X_0, L_b) + \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{X_0} (X_a - X_0) + \frac{\partial F}{\partial L_a} \Big|_{L_b} (L_a - L_b) \quad (16)$$

$$F = (X_a, L_a) \approx AX + BV + W = 0 \quad (17)$$

$${}_r A_u \quad {}_u X_1 + {}_r B_n \quad {}_n V_1 + {}_r W_1 = {}_r 0_1 \quad (18)$$

Sendo,

$A = \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{X_i, L_i}$: Matriz das derivadas parciais do modelo matemático funcional em relação aos parâmetros ajustados;

X = Vetor das correções dos parâmetros;

$B = \frac{\partial F}{\partial L_a} \Big|_{X_a, L_b}$: Matriz das derivadas parciais do modelo matemático funcional em relação às observações ajustadas;

V = Vetor dos resíduos;

$W = F(X_0, L_b)$: Vetor das correções.

As dimensões das matrizes da equação 18 são dadas por:

n = Valores observados;

u = Parâmetros;

r = Equações;

1 = Constante.

A condição do MMQ é formulada através da seguinte equação:

$$\phi = V^T P V = (L - AX)^T P(L - AX) = \text{mínimo} \quad (19)$$

Onde, P é a matriz (n x n) dos pesos, simétrica e definida positiva, a qual é dada por:

$${}_n P_n = \sigma_0^2 ({}_n \sum L_n^b)^{-1} \rightarrow {}_n P_n^{-1} \approx {}_n \sum L_n^b \quad (20)$$

Sendo: $\sigma_0^2 = 1$ (adimensional)

σ_0^2 = Fator de variância a priori;

${}_n \sum L_n^b$ = Matriz variância-covariância dos valores observados.

V = Os resíduos, obtidos por:

$${}_n V_1 = {}_n P_n^{-1} {}_n B_r^t {}_r K_1 \quad (21)$$

Obtendo as observações ajustadas:

$$L_a = A X + L_0 \quad (22)$$

2.3.4 Verificação da igualdade das distâncias

Os resultados dos experimentos, assim como os resultados do monitoramento, foram avaliados através de teste estatístico para verificar a igualdade dos resultados com os valores utilizados como referências.

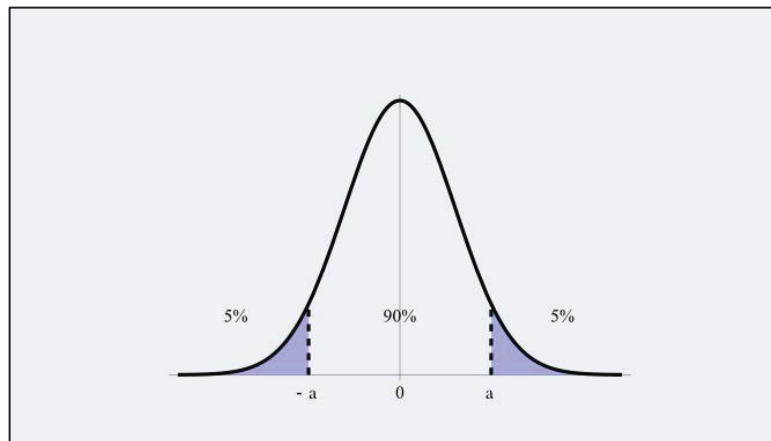
Um teste de hipótese implica a não rejeição ou a rejeição da hipótese nula H_0 . Alguns erros podem ser cometidos, e são denominados de (ANDRIOTTI, 2003; TRIOLA, 2009):

- Erro tipo I (α): probabilidade de rejeitar a hipótese nula quando ela é correta;
- Erro tipo II (β): probabilidade de aceitar a hipótese nula quando ela é incorreta.

A probabilidade de cometer o erro tipo I é chamado de nível de significância σ e a probabilidade de tomar a decisão correta é chamada de nível de confiança $(1 - \sigma)$. A probabilidade de cometer o erro tipo II é chamado de β e a probabilidade de tomar a decisão correta chama-se de poder ou força dos testes $(1 - \beta)$. Como não se trabalha com toda a população, mas apenas com amostras, deve-se tomar a decisão dentro de um nível de confiança. Quanto menor o nível de confiança, menor a credibilidade atribuída à hipótese nula. Se a confiabilidade é suficientemente baixa, a hipótese H_0 deve ser rejeitada.

Caso contrário, se a probabilidade não é pequena a ponto de reduzir a credibilidade na hipótese nula, H_0 deve ser aceito. A escolha do nível de significância é subjetiva e em Geodésia os valores ficam geralmente entre 0,001 e 0,05 (FIGURA 10) e é fixado “*a priori*”. O menor nível de significância expressa a maior relutância para rejeitar H_0 injustamente (WOLF, 1980; KUANG, 1996; ANDRIOTTI, 2003; TRIOLA, 2009).

FIGURA 10 - TESTE DE HIPÓTESE



FONTE: ANDRIOTTI (2003).

Para verificar a igualdade estatística das distâncias em diferentes épocas, formulam-se os testes admitindo a igualdade das distâncias ou postulando uma hipótese em que as diferenças entre elas variam em um determinado intervalo (MONICO, 1988; GEMAEL, 2004).

A definição de qual teste estatístico poderá ser utilizado em cada trabalho é feita de acordo com o tamanho da amostra ou população. Caso os dados sejam menores do que 30 observações, o teste mais indicado é t da distribuição de Student.

A estatística t utiliza a média amostral, que mais se aproxima da curva normal, na medida em que o tamanho de amostras aumenta. O procedimento geral adotado é (ANDRIOTTI, 2003; TRIOLA, 2009):

- ✓ Estabelece as hipóteses H_0 e H_a (hipótese alternativa);
- ✓ Estabelece α relacionado ao intervalo de confiança;
- ✓ Escolhe o teste apropriado ao trabalho;
- ✓ Compara o t_{calc} (t calculado) com o t_{tab} (t tabelado); (se o valor obtido for maior do que o valor tabelado, H_0 é rejeitado, caso contrário H_0 não é rejeitado);

A determinação do intervalo de confiança da média é dada por:

$$P = \left[\bar{X} - t_{1-\frac{\alpha}{2}} x \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{1-\frac{\alpha}{2}} x \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] = 1 - \alpha \quad (23)$$

que é a probabilidade de que o intervalo aleatório definido pelos extremos contenha o parâmetro populacional μ .

Onde:

\bar{X} = Média das observações;

$t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ = Distribuição de Student;

σ = Desvio-padrão amostral;

n = Número de observações.

Para o intervalo de 90%:

$$P = \left[\bar{X} - t_{0,95} x \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{0,95} x \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] = 90\% \quad (24)$$

Onde $1 - \alpha = 90\%$ e $1 - \frac{\alpha}{2} = 0,95$

Os valores calculados para o t utilizando a equação 21, não podem ultrapassar os valores tabelados (FIGURA 11), de acordo com o grau de liberdade. Segundo Triola (2009):

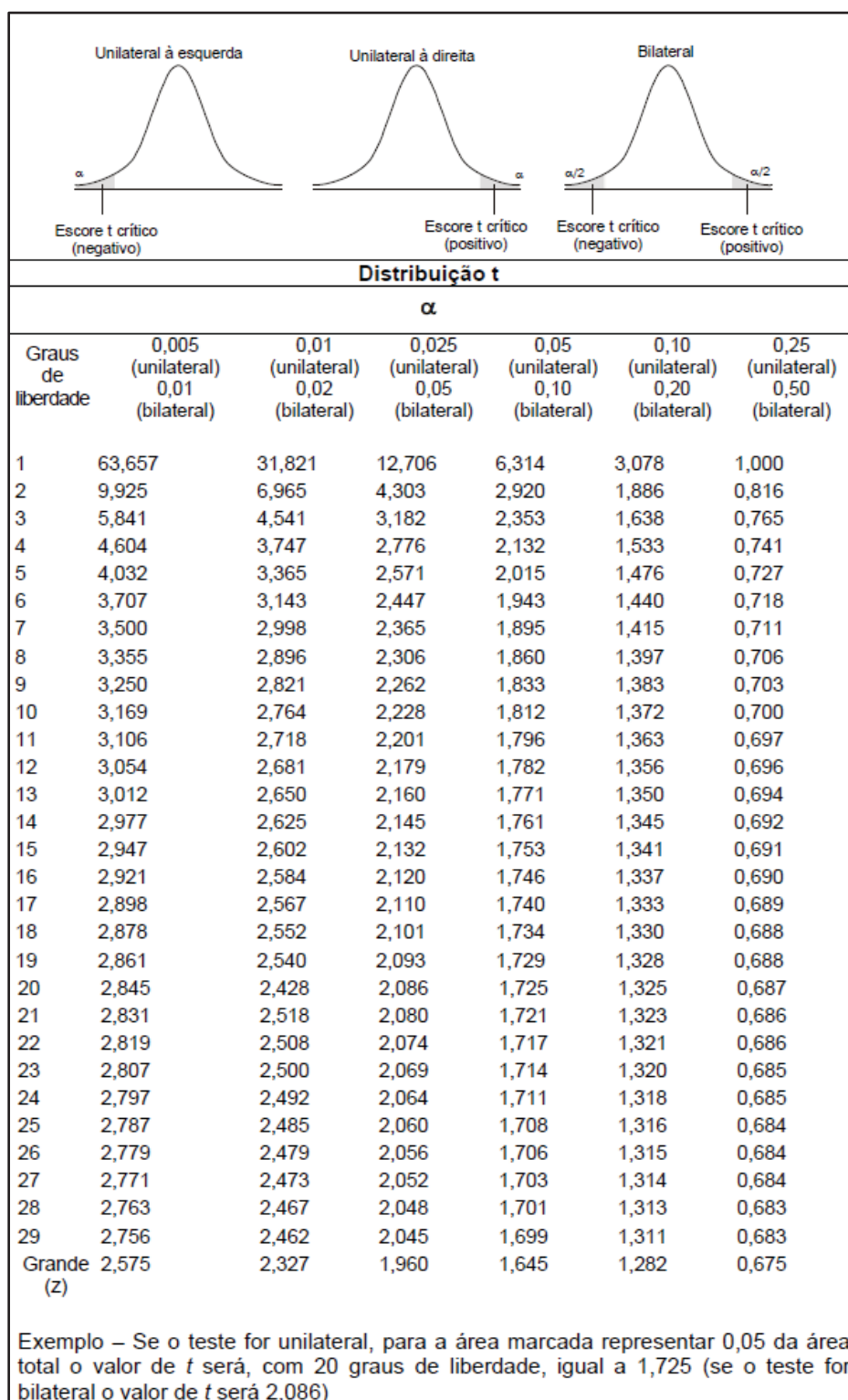
$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (25)$$

Dependendo da definição da hipótese nula, deve ser usado uma ou duas caudas da distribuição t de Student na avaliação do teste. Se a hipótese nula for $\bar{x} < \mu_0$ e a hipótese alternativa $\bar{x} > \mu_0$, o teste deve ser feito somente para valores maiores do que t, ou seja, unicaudal (ANDRIOTTI, 2003).

Por outro lado, se a hipótese nula for $\bar{x} = \mu_0$ e, conseqüentemente, a hipótese alternativa $\bar{x} \neq \mu_0$, avalia-se ao mesmo tempo a possibilidade de $\bar{x} < \mu_0$ e de $\bar{x} > \mu_0$. Para isso, devem ser consideradas as áreas abaixo da curva para valores superiores a t e inferiores a -t, ou seja, bicaudal. Como a

distribuição é simétrica, os tamanhos dessas áreas são iguais (ANDRIOTTI, 2003).

FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO T (DE STUDENT)



FONTE: ANDRIOTTI (2003).

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho para a determinação de distâncias entre alvos para fins de monitoramento, a partir de dois modelos matemáticos, a Lei dos Cossenos e a Distância Euclidiana.

As Estações Totais utilizadas para coleta dos dados nos experimentos foram TCRA1205 com precisão angular de 5" e linear de $\pm (2\text{mm} + 2\text{ppm})$ e o modelo TS15 com precisão angular de 1" e linear de $\pm (2\text{mm} + 2\text{ppm})$ utilizando a portadora *laser* (FIGURA 12), ambas da marca Leica. As mesmas são classificadas de alta precisão conforme apresentado no quadro 1.

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DE ESTAÇÕES TOTAIS

Classificação de estações totais	Desvio-Padrão Precisão angular	Desvio-Padrão Precisão linear
1 - Precisão baixa	$\leq \pm 30''$	$\pm (5\text{mm} + 10 \text{ ppm} \times D)$
2 - Precisão média	$\leq \pm 07''$	$\pm (5\text{mm} + 5 \text{ ppm} \times D)$
3 - Precisão alta	$\leq \pm 02''$	$\pm (3\text{mm} + 3 \text{ ppm} \times D)$

FONTE: NBR 13133 (1994).

FIGURA 12 - EQUIPAMENTOS PARA COLETA DE DADOS



FONTE: A autora (2018).

Para a coleta dos dados atmosféricos (temperatura, pressão e humidade) foi utilizado o equipamento termo higrômetro acoplado às Estações Totais durante todo o processo de observações.

Foram realizados dois experimentos no Centro Politécnico da UFPR. O primeiro simulando alvos dispostos no mesmo plano horizontal e um segundo com alvos em planos diferentes, tendo a distância entre eles conhecida e comparadas com as calculadas pelas duas metodologias aplicadas nesta pesquisa, a Lei dos Cossenos e Distância Euclidiana.

Dados brutos do monitoramento da UHE Salto Caxias também foram processados utilizando as duas metodologias. A coleta dos dados foi realizada em pares de alvos considerados no mesmo plano horizontal, e as observações realizadas em pontaria direta (PD) e pontaria inversa (PI) da luneta utilizando o modo automático de operação da Estação Total TCRA1205 (FIGURA 12), em concordância com a NBR 13133/94.

No quadro 2 são apresentadas as campanhas de monitoramento e os métodos de processamento utilizados para a determinação das distâncias entre os alvos da barragem:

QUADRO 2 - CAMPANHAS E MÉTODOS

Épocas e métodos	Dados comparados
Novembro 2016	Distância Euclidiana x Lei dos Cossenos
Julho 2017	Distância Euclidiana x Lei dos Cossenos
Distância Euclidiana (D.E)	Novembro/16 x Julho/17
Lei dos Cossenos (L.C)	Novembro/16 x Julho/17

FONTE: A autora (2018).

3.1 ÁREAS DE ESTUDOS

3.1.1 UHE Salto Caxias

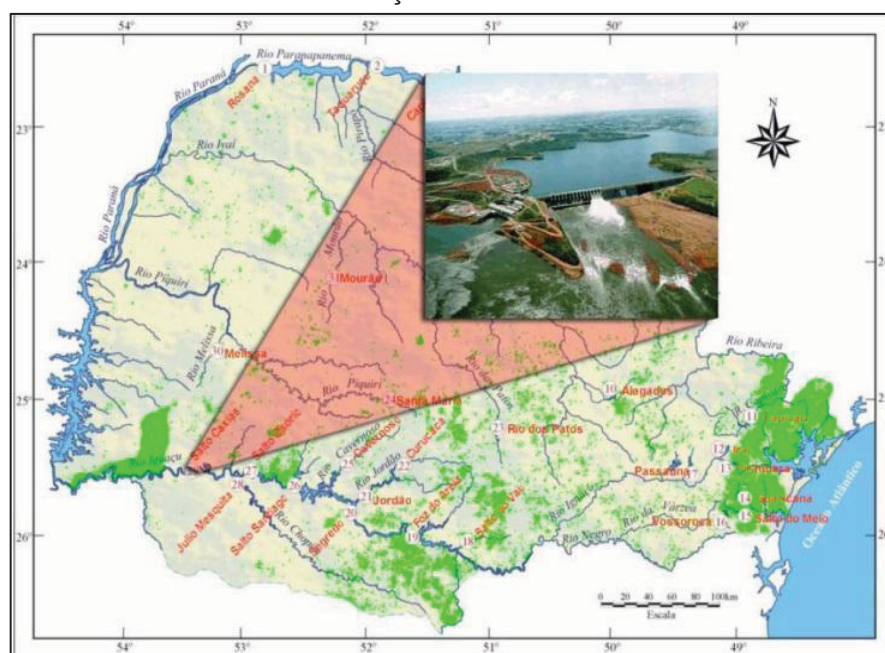
A Usina Hidrelétrica Governador José Richa, mais conhecida como Usina hidrelétrica de Salto Caxias, localiza-se entre os municípios de Capitão Leônidas Marques e Nova Prata do Iguaçu a aproximadamente 600 km da capital paranaense, Curitiba (FIGURA 13), suas principais características estão destacadas no quadro 3.

QUADRO 3 - ESPECIFICAÇÕES DA UHE SALTO CAXIAS

Altura	67m
Comprimento	1083m
14 Comportas	Com 16,5m de largura e 20m de altura cada.
Capacidade de armazenamento	3,5 bilhões de m ³
Volume represado	9,12x10 ⁵ m ³
Vazão	49600 m ³ /s
Capacidade instalada de Produção	1240 MW

FONTE: COPEL (2017).

FIGURA 13 - LOCALIZAÇÃO DA UHE SALTO CAXIAS



FONTE: ZOCOTTI FILHO (2005).

A barragem é a 8ª maior do mundo feita de Concreto Compactado a Rolo (CCR), com 912 mil m³ de concreto. Segundo a empresa que administra a usina, a COPEL – Companhia Paranaense de Energia, a oferta de energia foi consideravelmente ampliada ao mercado consumidor das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país e em 2010, a hidrelétrica bateu seu recorde de geração anual: 7,46 bilhões de quilowatts-hora, equivalente a 27% de todo o consumo paranaense. Um potencial de geração de energia suficiente para abastecer as duas maiores cidades do Estado, Curitiba e Londrina, ou, ainda, para cobrir todo o consumo residencial do Paraná.

O monitoramento de alvos situados em três blocos da barragem (FIGURA 14) é realizado pelo grupo de pesquisa da UFPR, ligado ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. O processamento para determinação da distância entre os alvos, nas campanhas de medição, é feito utilizando a equação de distância Euclidiana, ou seja, a partir das coordenadas dos alvos.

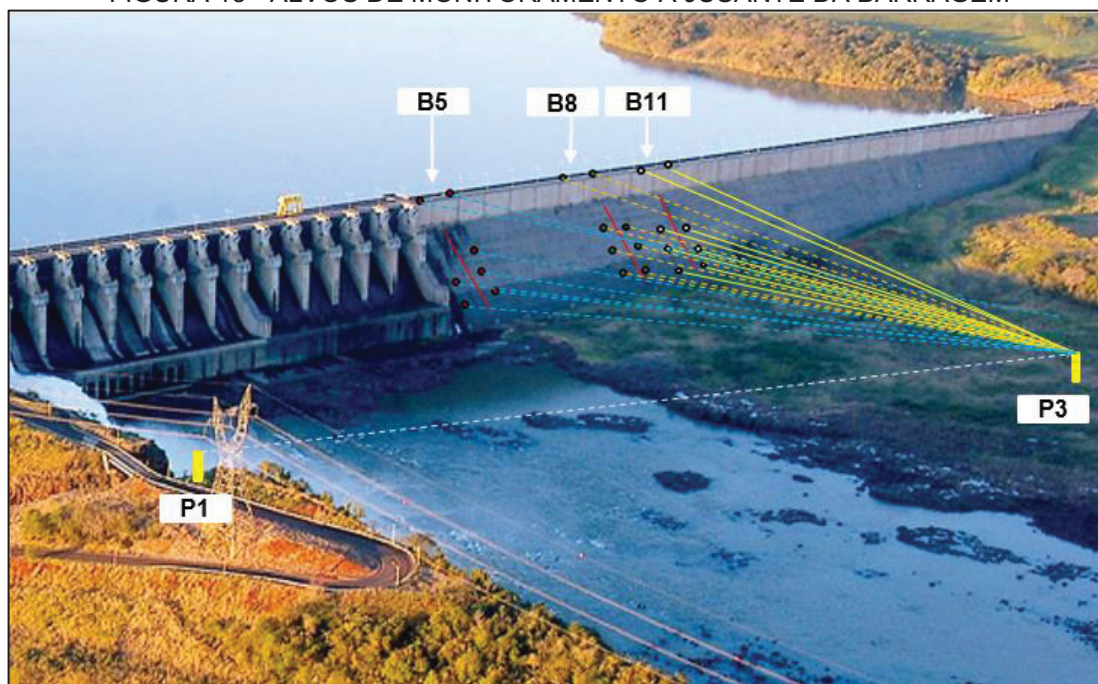
FIGURA 14 - VISTA GERAL DOS BLOCOS MONITORADOS A JUSANTE



FONTE: Adaptado de SOARES et al. (2011).

Na área de estudos existem 23 alvos de monitoramento (Marco Geodésico – MGE) fixados no paramento a jusante da barragem, desses, 7 alvos estão engastados no bloco 5, 8 alvos engastados no bloco 8 e mais 8 alvos no bloco 11 (FIGURAS 15 e 16).

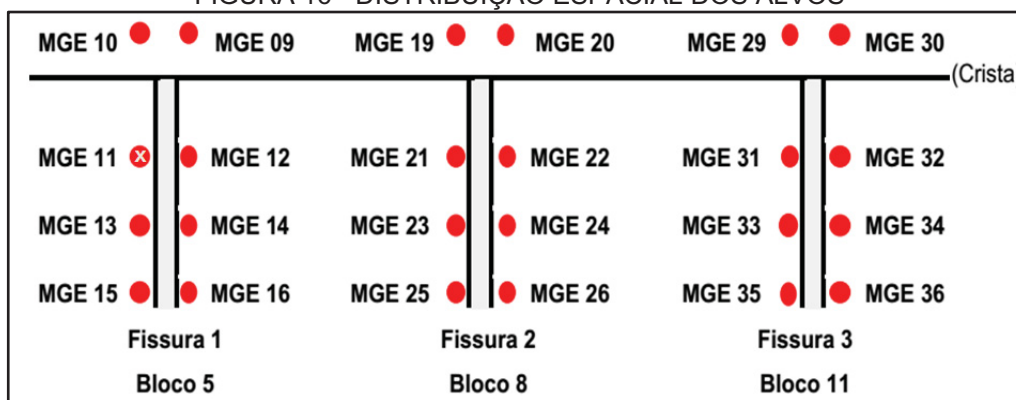
FIGURA 15 - ALVOS DE MONITORAMENTO A JUSANTE DA BARRAGEM



FONTE: Adaptado de COPEL (2017).

Apesar da barragem possuir pontos de monitoramento a jusante em três blocos, foram processados e analisados somente os dados dos alvos instalados nos blocos 8 e 11, tendo em vista que estes contemplam um conjunto maior de dados, pois no bloco 5, o MGE11 não existe, conforme mostra a figura 16.

FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ALVOS



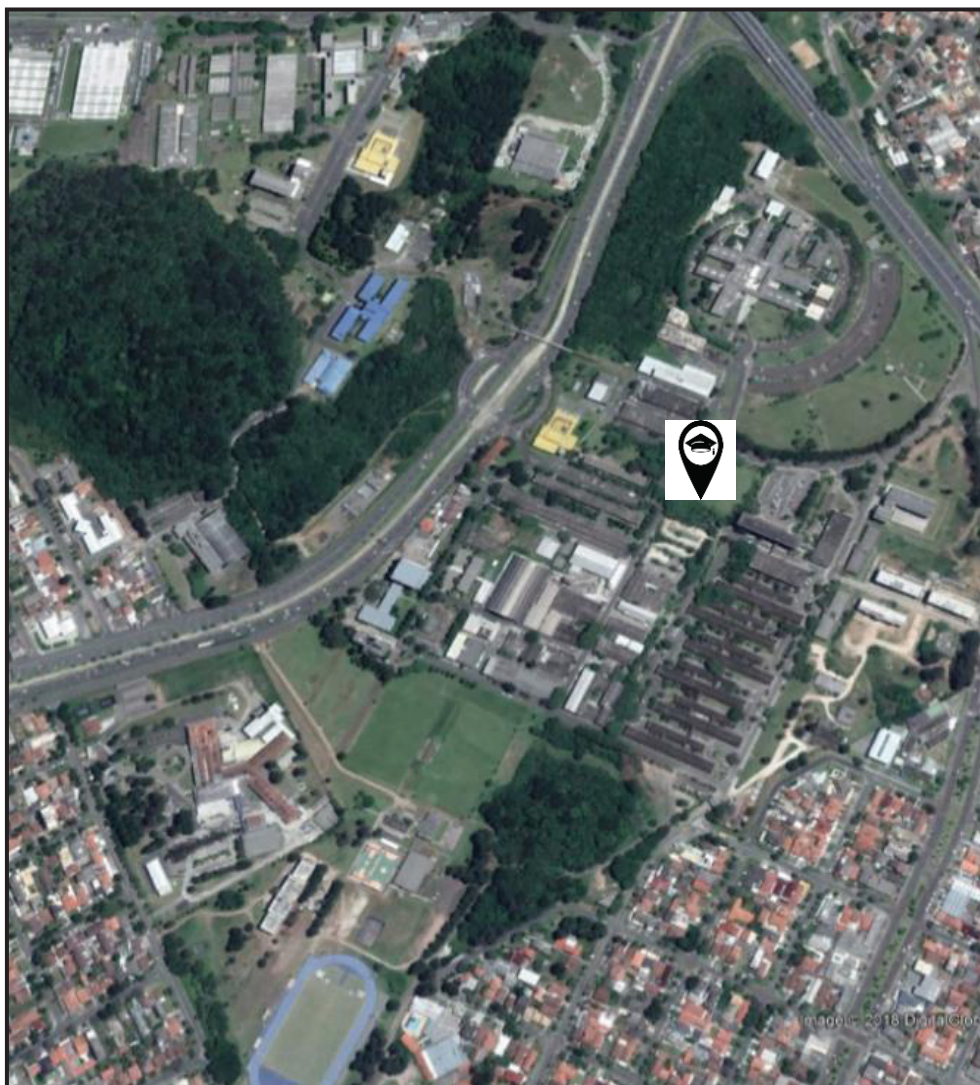
FONTE: A autora (2018).

3.1.2 Centro Politécnico

O Centro Politécnico (FIGURA 17) é o campus III da UFPR, construído no ano de 1961, sendo o maior campus em Curitiba, abrigando diversos cursos

de graduação e pós-graduação em diversas áreas de conhecimento, sendo um deles o Programa de pós-graduação em Ciências Geodésicas. O local foi escolhido para a realização dos experimentos por viabilizar visadas livres, possibilitando uma simulação com distâncias compatíveis com as distâncias entre os alvos monitorados dos blocos 8 e 11 e o pilar 3 (P3), na UHE Salto Caxias, conforme ilustrado na figura 15.

FIGURA 17 - CENTRO POLITÉCNICO DA UFPR



FONTE: Adaptado de Google Earth (2018).

Nos experimentos realizados no Centro Politécnico, uma mira horizontal de ínvar com dois metros de comprimento devidamente calibrada, utilizando o interferômetro *laser* no laboratório de instrumentação geodésica (LAIG) da UFPR como padrão de referência (FIGURA 18). A mira de ínvar possui baixo

coeficiente de dilatação, qualidade fundamental nas medidas de distância de precisão.

Os alvos observados nos experimentos foram os extremos da mira horizontal. Coletou-se três séries de observações de direções horizontais, ângulos zenitais e distâncias inclinadas, em pares conjugados, utilizando o modo manual de operação das Estações Totais.

FIGURA 18 - MIRA HORIZONTAL DE ÍNVAR DE 2 METROS



FONTE: A autora (2018).

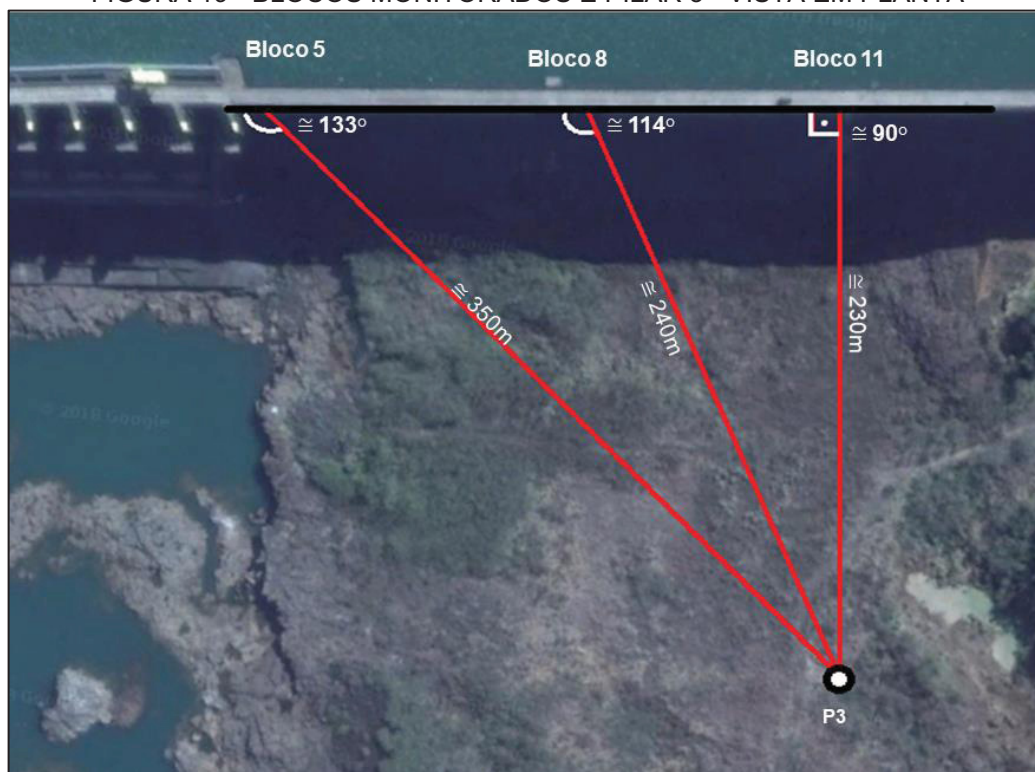
3.2 EXPERIMENTOS REALIZADOS NO CENTRO POLITÉCNICO

3.2.1 Mira Horizontal de ínvar na posição horizontal

O experimento com a mira horizontal ínvar, posicionada na horizontal, foi denominado de experimento 1. A mira foi rotacionada, em relação ao alinhamento com a Estação Total, ocupando três posições distintas, simulando uma situação que se aproximasse das mesmas condições dos alvos engastados nos blocos 5, 8 e 11 no paramento a jusante da barragem.

O primeiro passo para criar um cenário similar foi calcular, a partir dos dados brutos do monitoramento da barragem, as distâncias e os ângulos entre os alvos monitorados e o pilar 3 (FIGURA 19).

FIGURA 19 - BLOCOS MONITORADOS E PILAR 3 - VISTA EM PLANTA



FONTE: Adaptado de Google Earth (2018).

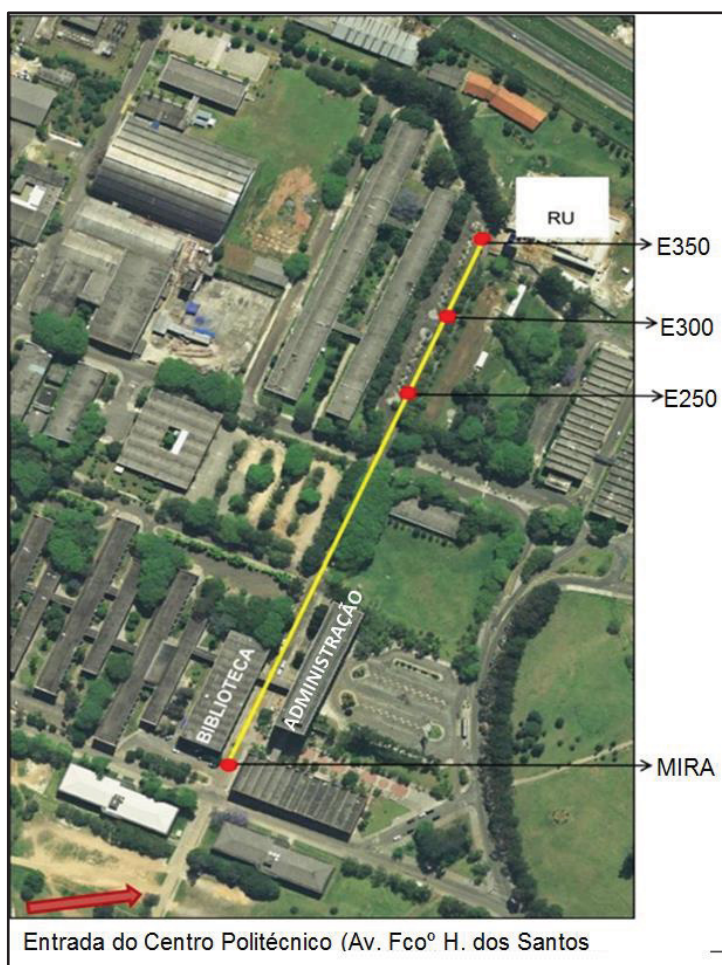
Conforme mostra a figura 19, os alvos da crista, monitorados nos blocos, estão distantes do pilar 3 na seguinte ordem:

- Alvos do bloco 5: Aproximadamente 350m e forma um ângulo de aproximadamente 133° ;
- Alvos do bloco 8: Aproximadamente 240m e forma um ângulo de aproximadamente 114° ;
- Alvos do bloco 11: Aproximadamente 230m e de aproximadamente 90° .

A partir disto, reproduziu-se um cenário semelhante dentro do Centro Politécnico, onde a mira horizontal de ínvar é a referência de distância entre dois alvos de cada bloco, considerando um plano horizontal. Foi definido que as distâncias entre as estações de observação e a mira seriam de 250, 300 e 350 metros.

O ponto central da mira representa a distância entre os alvos e o pilar 3, que, conforme mostra a figura 20, é representado pelas estações E250, E300, E350. Essas estações foram os locais de ocupação das Estações Totais para coleta das observações dos alvos (extremos da mira).

FIGURA 20 - CENTRO POLITÉCNICO DA UFPR



FONTE: Adaptado de ESTEIO (2018).

A materialização das estações de observações e das posições angulares se deu na seguinte ordem:

1º: Instalou-se a Estação Total modelo TCAR1205 no ponto denominado MIRA;

2º: Instalou-se um prisma com bastão e bipé materializando um ponto a uma distância de 350 metros da Estação Total;

3º: Orientou-se a Estação Total no ponto descrito no passo 2 acima;

4º: Rotacionou-se a Estação Total no sentido horário até se obter o ângulo de 90° , onde foi materializado o que seria a posição dos alvos do bloco 11;

5º: Girou-se a Estação Total a partir do ângulo 90° até se obter o ângulo de 114° , onde foi materializado a posição dos alvos do bloco 8;

6°: A Estação Total foi rotacionada a partir da posição angular de 114° até se obter o ângulo de 133° , materializando finalmente a posição dos alvos do bloco 5;

7°: Orientou-se a Estação Total novamente no prisma instalado no ponto E350, de onde com o auxílio de outro prisma instalado em bastão bipé, e mantendo o alinhamento entre o ponto MIRA e o ponto E350, o prisma foi deslocado até uma distância de 50 metros, materializando o ponto E300. O mesmo procedimento foi realizado para materializar o ponto E250;

8°: Retirou-se a Estação Total mantendo o tripé no ponto MIRA e Instalou-se a mira horizontal de invar;

9°: Instalou-se nas estações E350, E300 e E250 tripés com bases nivelante, simulando um sistema de centragem forçada;

10°: Instalou-se o prisma na estação E300 para orientação das Estações Totais e controle da poligonal;

11°: As observações foram iniciadas na estação E350 com a mira na posição angular de 90° , utilizando a Estação Total TCRA1205 e na sequência a TS15 e assim até o final dos trabalhos;

12°: Ao final das observações na E350 as Estações Totais foram transferidas para ocupar a estação E300 e orientadas na E350. Finalizadas as observações com as duas Estações Totais no ponto ocupado, as mesmas foram transferidas para ocupar a estação E250;

13°: A Estação Total TCRA1205 foi instalada na E250 e orientada na E350 e em seguida o processo foi repetido para a TS15, finalizando as leituras com a mira na posição de 90° ;

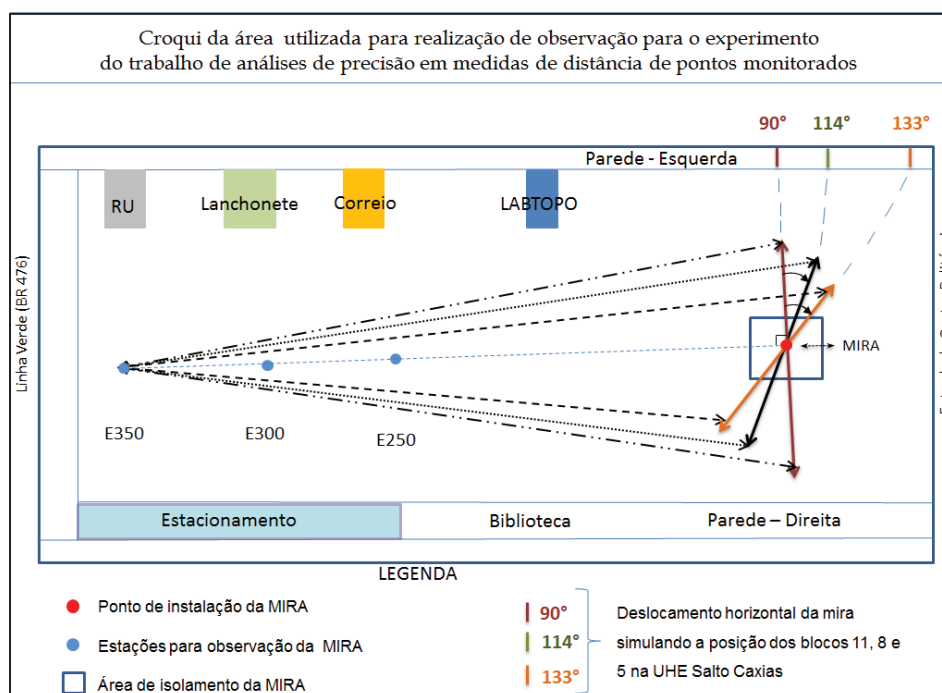
14°: A mira foi rotacionada para a posição angular de 114° da qual foram realizadas as observações com as duas Estações Totais ocupando, ainda, a estação E250 (orientada na E350) e na sequência foram ocupadas as estações E300 (orientada na E350) e E350 (orientada na E300) e realizada a leitura dos alvos;

15°: Finalizando a etapa 14, a mira foi rotacionada para a posição angular de 133° e nesta posição angular foram realizadas as observações com as duas Estações Totais ocupando as estações E350, E300 e finalizando a coleta de dados do experimento na estação E250, repetindo-se as mesmas orientações da etapa 14.

As figuras 21 e 22 mostram as posições de rotações horizontal realizadas com a mira simulando as posições dos blocos onde estão engastados os alvos monitorados na barragem, sendo o bloco 11, representado pelo ângulo 90° , o bloco 8 pelo ângulo 114° e o bloco 5 pelo ângulo 133° .

Como pode ser visto na figura 21, para a segurança do equipamento, a área onde a mira horizontal foi instalada ficou isolada durante todo o experimento.

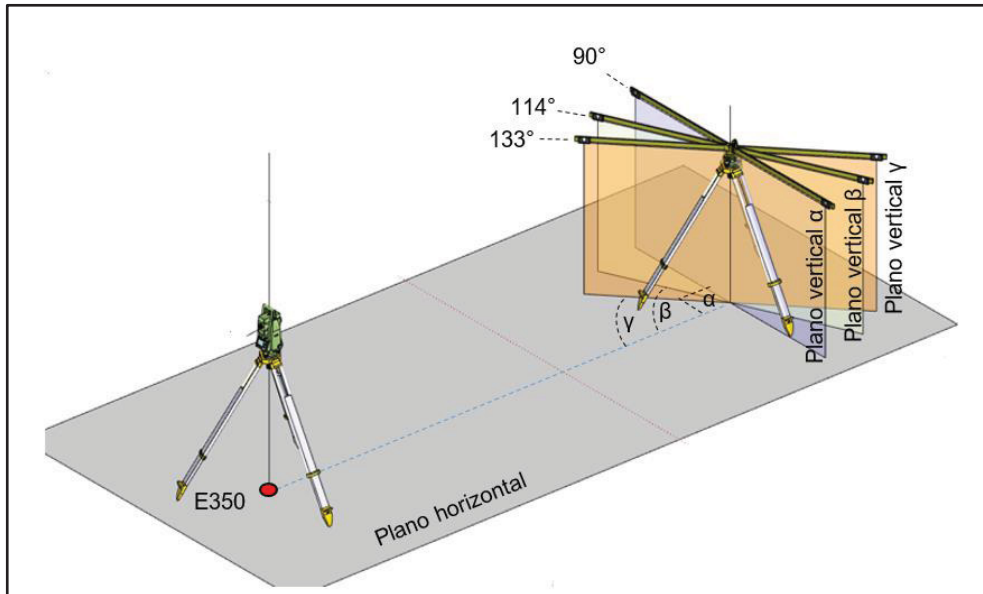
FIGURA 21 - CROQUI DO LOCAL DOS EXPERIMENTOS



FONTE: A autora (2018).

Na figura 22 o ângulo e o plano vertical α indicam a posição do bloco 11, o ângulo e o plano vertical β indicam a posição do bloco 8 e o ângulo e o plano vertical γ a posição do bloco 5, todos em relação ao alinhamento com a Estação Total (E350).

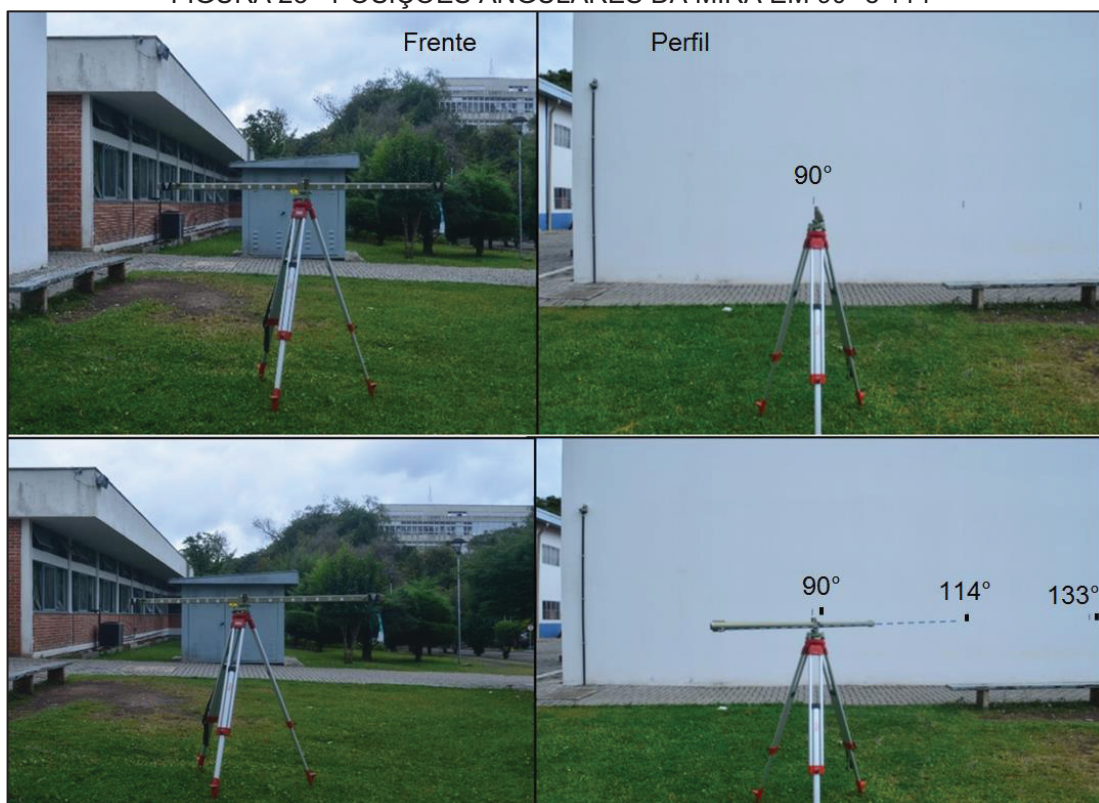
FIGURA 22 - CROQUI DO EXPERIMENTO 1



FONTE: A autora (2018).

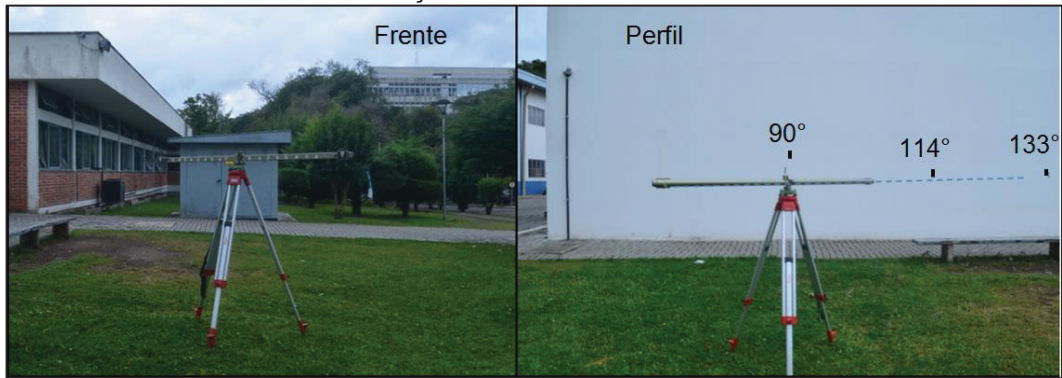
As posições angulares nas quais a mira horizontal foi colocada e teve seus alvos observados, estão representadas na figura 23 e 24.

FIGURA 23 - POSIÇÕES ANGULARES DA MIRA EM 90° e 114°



FONTE: A autora (2018).

FIGURA 24 - POSIÇÕES ANGULARES DA MIRA EM 133°

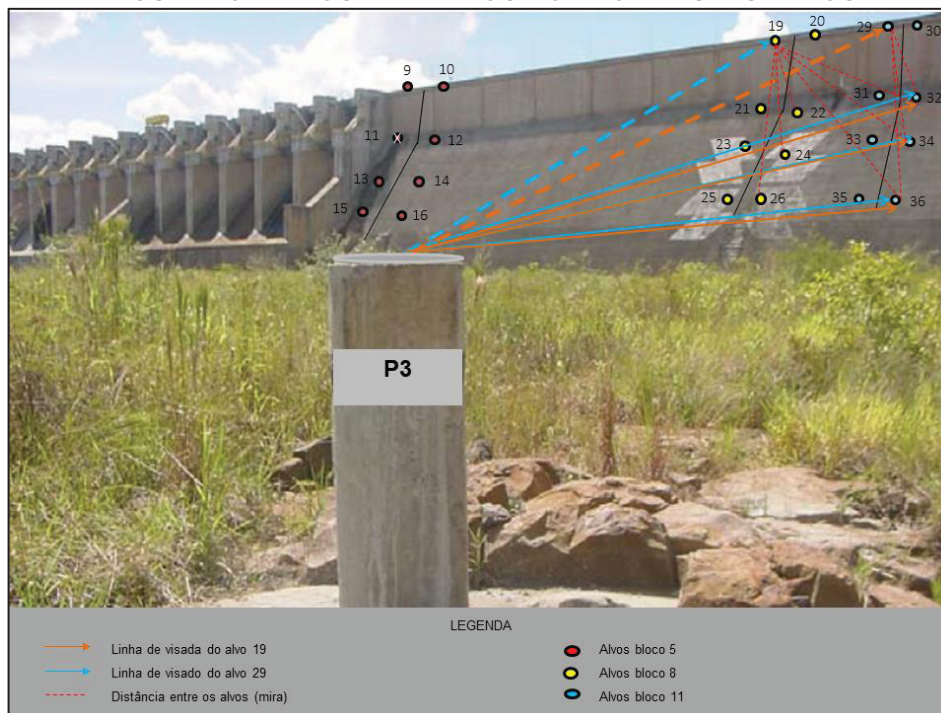


FONTE: A autora (2018).

3.2.2 Mira horizontal de ínvar inclinada

Este experimento, denominado de experimento 2, teve como objetivo simular a determinação da distância entre alvos em planos horizontais diferentes, ou seja, pontos não alinhados, como por exemplo, os pontos 19-22, 19-24 e 19-26, engastados no paramento da barragem (figura 25).

FIGURA 25 - ALVOS EM PLANOS HORIZONTAIS DISTINTOS



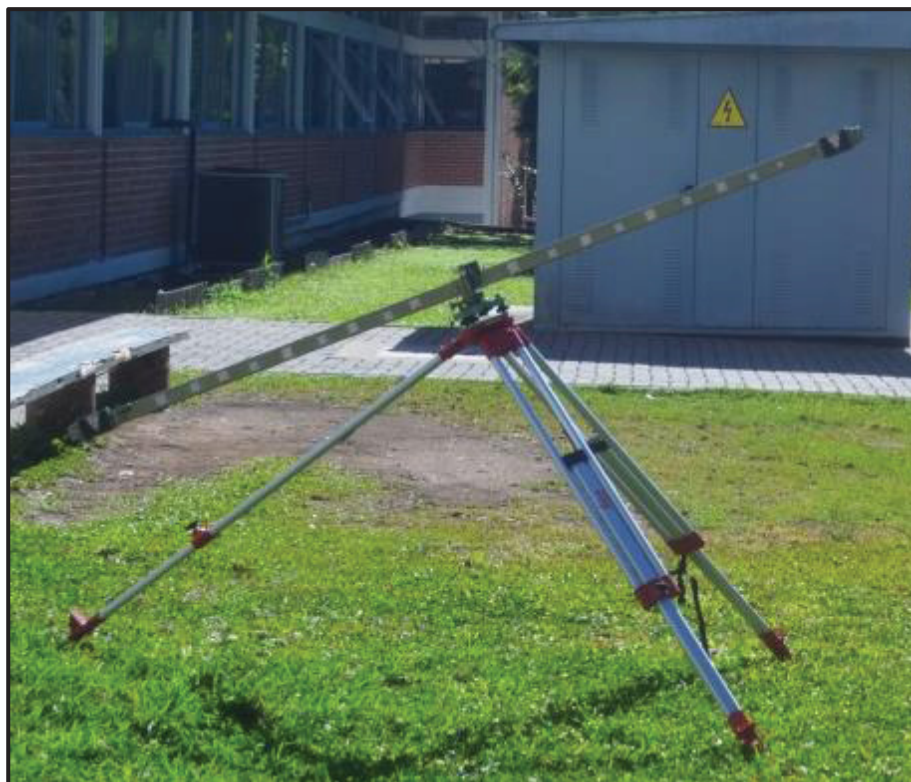
FONTE: Adaptado de GRANEMANN (2005).

Para realização do experimento, a mira horizontal teve seus alvos observados em três posições, sendo a primeira na posição horizontal e ortogonal à linha de visada com a Estação Total. Na segunda posição, obteve-se a inclinação máxima da mira, mantendo-se a mesma ortogonalmente à linha de visada.

Na terceira e última posição, a mira horizontal teve sua inclinação reduzida, aleatoriamente, em relação à inclinação anterior e foi deslocada para a posição horizontal simulando os alvos engastados no bloco 8, ou seja, a 114° . As posições angulares de 90° e 114° foram as materializadas na execução do experimento 1.

No Centro Politécnico, não há como reproduzir desníveis da magnitude de uma barragem, então a solução para representar a situação de alvos em planos horizontais distintos, foi inclinar a mira em torno do eixo y, obtendo a inclinação máxima da mira deslocando lateralmente apenas uma das pernas do tripé (figura 26). Os ângulos de inclinação alcançados foram conhecidos somente na etapa de processamento.

FIGURA 26 - MIRA INCLINADA



FONTE: A autora (2018).

As etapas dos procedimentos realizados para a execução do experimento 2 foram as seguintes:

1° Instalou-se a mira horizontal no ponto MIRA materializado quando da realização do experimento 1 (FIGURA 21), na posição de 90° ao alinhamento com o ponto E250, e 0° de inclinação;

2° Instalou-se a Estação Total TCRA1205 no ponto E250 e realizou-se 3 séries de observações dos alvos da mira, em pares conjugados;

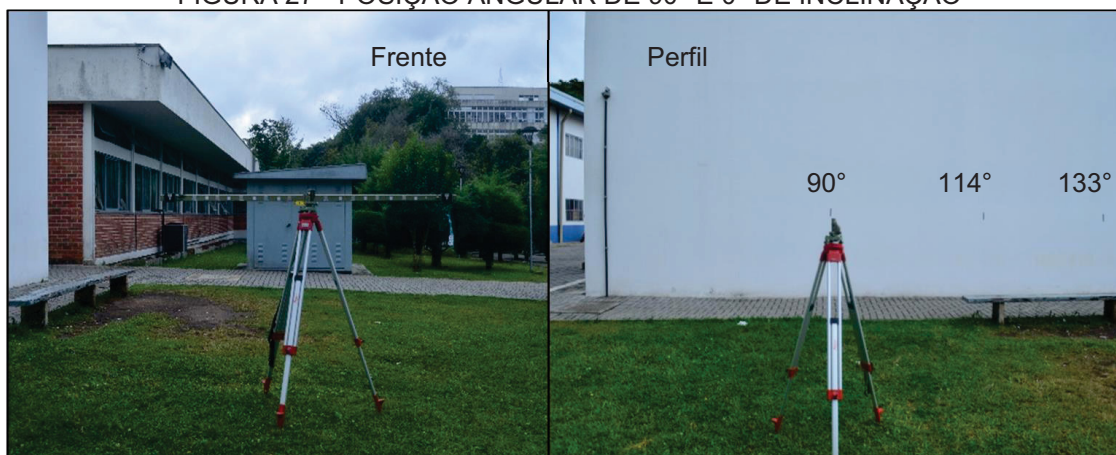
3° Trocou-se a Estação Total pela TS15 e realizou-se o mesmo processo de observação;

4° A mira foi mantida na posição de 90° ao alinhamento com a estação E250 e teve seu alvo esquerdo inclinado, utilizando apenas uma das pernas do tripé para alcançar a inclinação máxima da mira, mantendo a sua estabilidade. Com a mira na posição determinada, deu-se início as observações com as duas Estações Totais;

5° A mira teve seu alvo esquerdo levemente elevado (FIGURA 29), diminuindo o grau de inclinação, o movimento foi realizado utilizando a mesma perna do tripé deslocada na etapa anterior e na sequência rotacionou-se a mira para a posição angular de 114° e assim, as observações foram realizadas finalizando a coleta dos dados para este experimento.

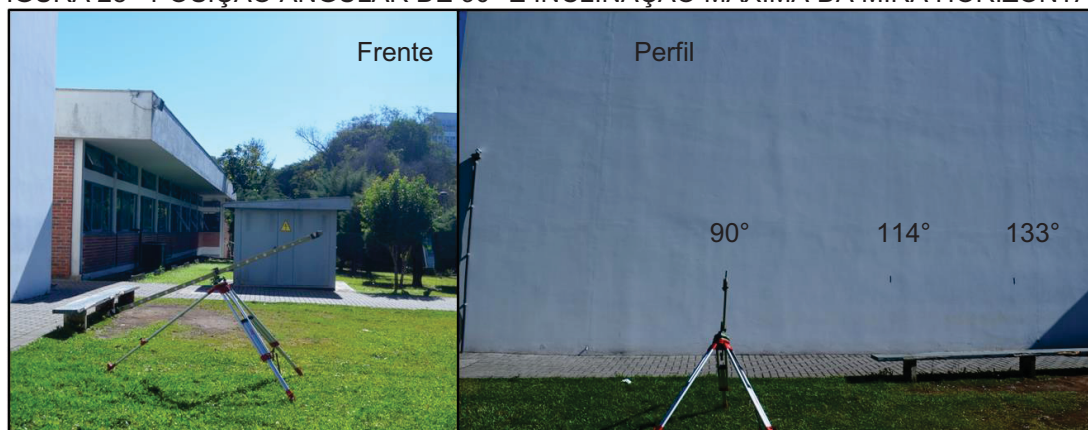
As figuras 27 e 28 ilustram as posições da mira horizontal no 2° e 4° passo, respectivamente.

FIGURA 27 - POSIÇÃO ANGULAR DE 90° E 0° DE INCLINAÇÃO



FONTE: A autora (2018).

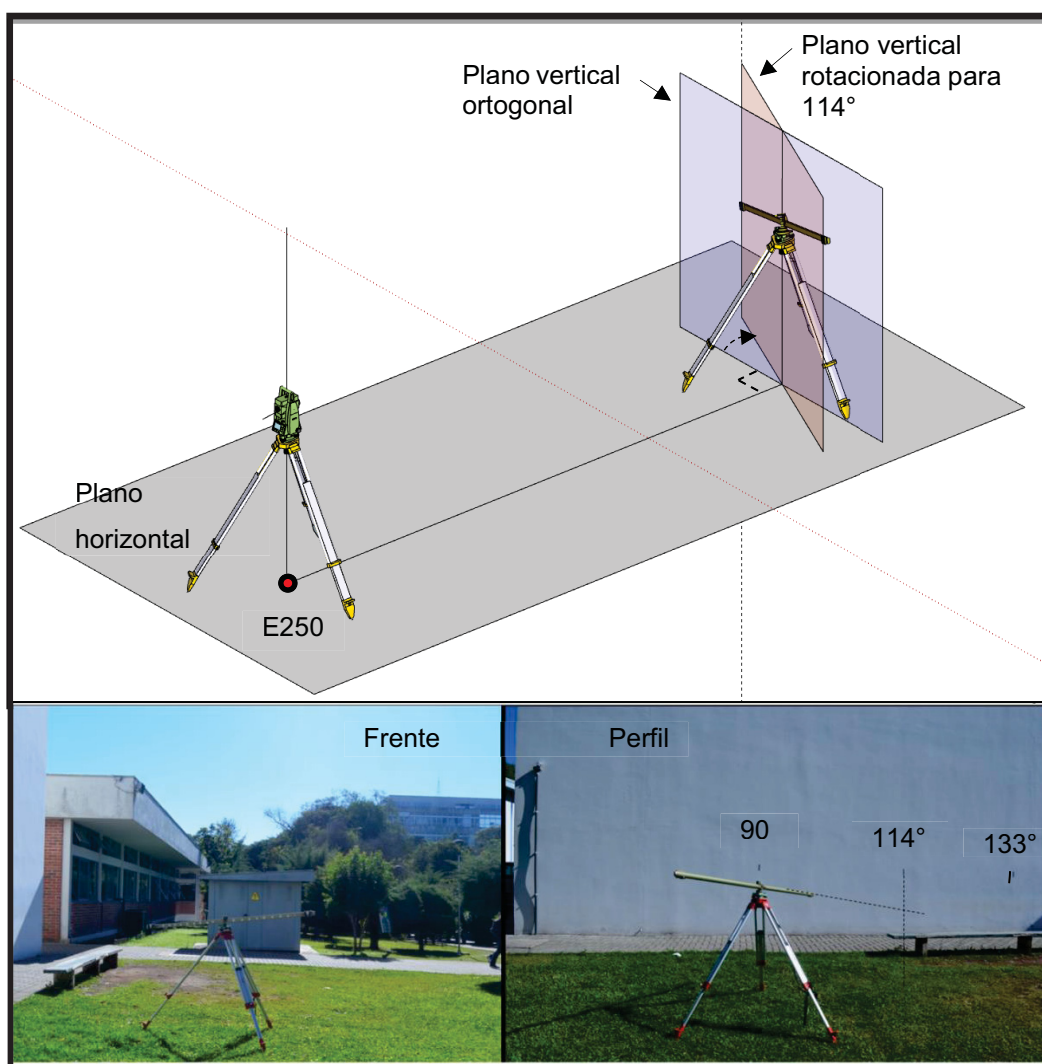
FIGURA 28 - POSIÇÃO ANGULAR DE 90° E INCLINAÇÃO MÁXIMA DA MIRA HORIZONTAL



FONTE: A autora (2018).

A figura 29 ilustra a posição da mira horizontal no 5° passo.

FIGURA 29 - POSIÇÃO ANGULAR DE 114°



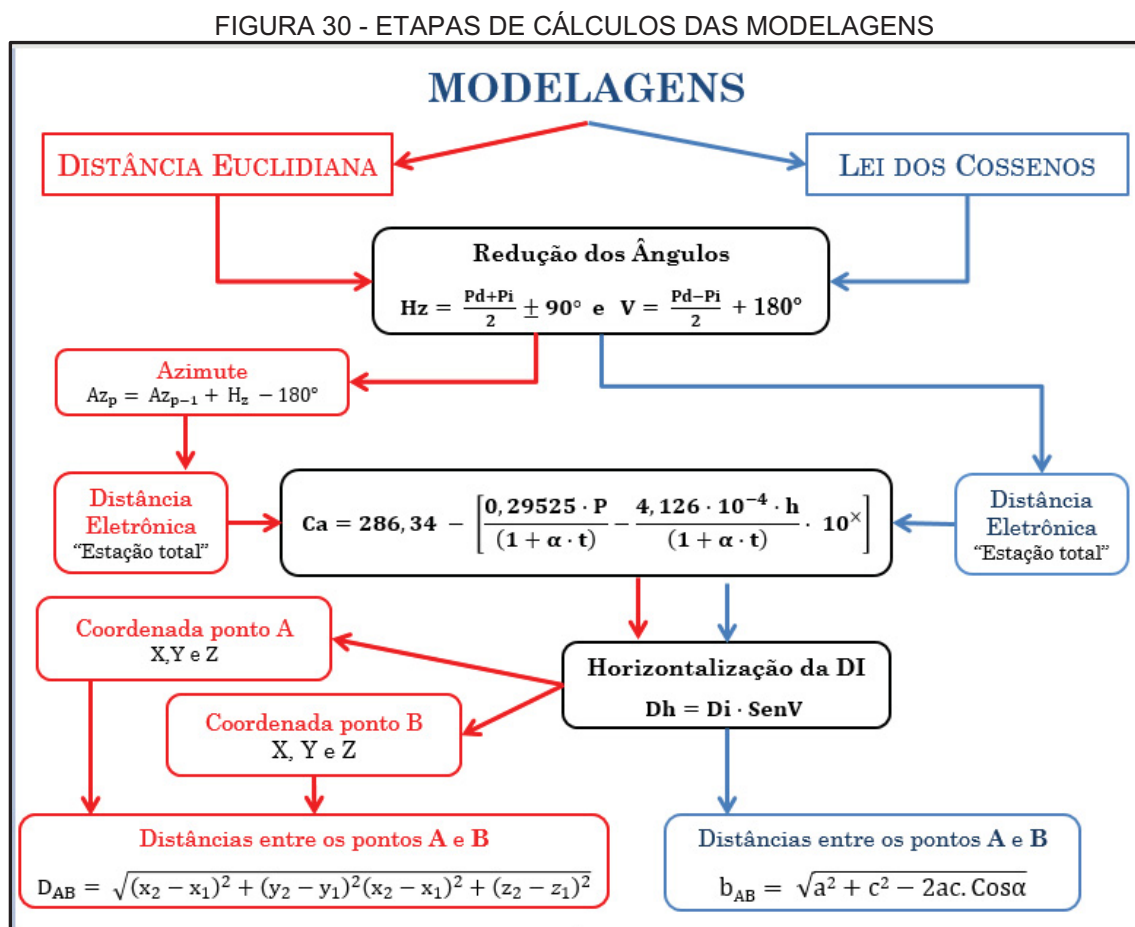
FONTE: A autora (2018).

Após a coleta dos dados em campo dos dois experimentos, realizaram-se as etapas a seguir:

- *Download* dos dados das observações realizadas com as Estações totais em formato .txt;
- *Download* dos dados atmosféricos de temperatura, humidade e pressão coletados durante o levantamento utilizando o equipamento termohigrômetro;
- Processamento dos dados e modelagem matemática em ambiente computacional (Excel e MatLab);

3.3 MODELAGEM

Sempre que se necessita descrever matematicamente uma realidade física recorre-se a fórmulas, equações ou expressões na tentativa de representar a realidade da melhor forma possível. As etapas de cálculos para a determinação da distância entre alvos, utilizando os dois modelos matemáticos investigados nesta pesquisa, possuem etapas diferentes (FIGURA 30).



FONTE: A autora (2018).

As coordenadas dos pontos de monitoramento são obtidas pelas equações a seguir.

$$X = Dh \cdot \sin Az \quad (26)$$

$$Y = Dh \cdot \cos Az$$

$$Z = Dh \cdot \cos Az + h_i - h_s$$

Onde:

X = coordenada no eixo x;

Y = coordenada no eixo y;

Z = coordenada no eixo z;

Dh = distância horizontal do alinhamento;

Az = azimute do alinhamento.

A distância Euclidiana entre os pontos é determinada com base na equação 1, do item 2.2.5.1, utilizando as coordenadas tridimensionais dos alvos observados, conforme equação 27:

$$D_{E-D} = \sqrt{(X_D - X_E)^2 + (Y_D - Y_E)^2 + (Z_D - Z_E)^2} \quad (27)$$

Onde:

D_{E-D} = Distância entre os alvos D e E;

X, Y, Z = Coordenadas dos alvos observados D e E.

A distância entre os pontos, calculada pela Lei dos Cossenos é determinada com base na equação 7, do item 2.2.5.2, rerepresentada na equação 24.

$$D_{D-E} = \sqrt{D^2 + E^2 - 2 \cdot D \cdot E \cdot \cos(\alpha)} \quad (28)$$

Onde:

D_{D-E} = Distância entre os alvos D e E;

D = Distância entre a Estação Total e o alvo D;

E = Distância entre a Estação Total e o alvo E;

α = Ângulo horizontal entre as direções horizontais aos alvos.

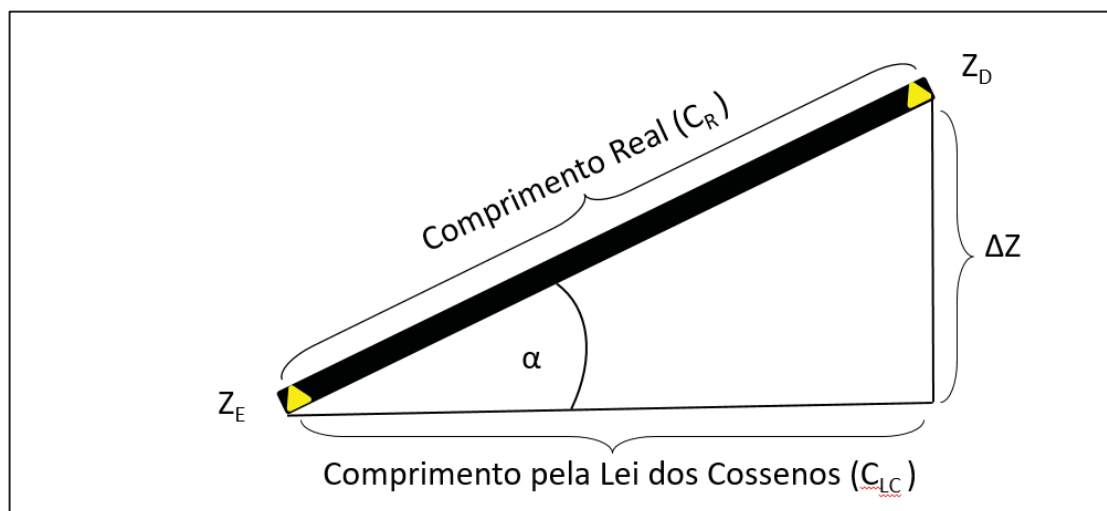
A metodologia da Lei dos Cossenos modela a distância no plano horizontal, ou seja, o resultado obtido é a projeção da distância real ou verdadeira. Quando os alvos estiverem no mesmo plano horizontal, como no experimento 1, a distância entre os mesmos é obtida pela modelagem mostrada na figura 30.

Para se obter a distância real entre alvos localizados em planos horizontais diferentes, a partir da Lei dos Cossenos, como no experimento 2, é necessário incluir algumas etapas matemáticas para obter a distância real, esta é obtida a partir da diferença entre as alturas dos alvos.

A figura 31 ilustra os elementos adotados para a obtenção da distância entre alvos. A mira e sua projeção formam um triângulo onde a hipotenusa é a distância entre os alvos (C_R), o cateto adjacente (C_{LC}) é a sua projeção no plano horizontal e o cateto oposto é a diferença de altura (ΔZ) entre os alvos da mira.

Qualquer deslocamento dos alvos, seja ele vertical ou horizontal, vai afetar diretamente o comprimento obtido do cateto adjacente, ou seja, a projeção da mira (C_{LC}), mas não afetará o comprimento real da distância entre os alvos.

FIGURA 31 - ELEMENTOS PARA RECUPERAÇÃO DO COMPRIMENTO REAL DA MIRA



FONTE: A autora (2018).

Onde:

Z_E = altura do alvo esquerdo da mira;

Z_D = altura do alvo direito da mira;

ΔZ = Diferença de altura entre os alvos da mira;

C_{LC} = Comprimento da mira calculado pela Lei dos Cossenos (ou projeção da mira no plano);

C_R = Comprimento real da mira (2m);

α = Ângulo de inclinação.

Para o conhecimento dos ângulos de inclinação da mira, obtidos no experimento 2, utilizou-se a equação 30. Com base nos elementos apresentados na figura 31, o cálculo para a obtenção do comprimento real foi realizado utilizando as seguintes equações:

$$\Delta Z = Z_D - Z_E \quad (29)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\Delta Z}{C_{LC}}\right) \quad (30)$$

$$\cos \alpha = \frac{C_{LC}}{C_R} \quad (31)$$

$$C_R = \frac{C_{LC}}{\cos \alpha} \quad (32)$$

3.3.1 Estimativa da qualidade das observações

Utilizando-se das precisões nominal angular e linear dos equipamentos, por meio da propagação de covariâncias, pode-se realizar uma pré-análise para estimar as precisões das medidas a serem obtidas a partir das observações e assim conhecer a qualidade que se pode alcançar antes da realização do levantamento em campo. Um dos aspectos que se pode analisar ao estimar a qualidade das observações, é, qual a precisão nominal do instrumento, necessária, para atingir as especificações estabelecidas para o trabalho (MIKHAIL; ACKERMAN, 1976; GEMAEL et al., 2015). Assim sendo, de forma análoga à equação 12, a Lei de propagação das Covariâncias para a distância calculada d_{AB} é dada por:

$$\Sigma_{d_{AB}} = D\Sigma_{Lb}D^T \quad (33)$$

Onde:

D = Matriz das derivadas parciais (matriz jacobiana);

Σ_{Lb} = MVC das observações d_1, d_2, Az_{AB} (Lei dos Cossenos);

As Matrizes D e Σ_{Lb} , 34 e 35, são referentes ao cálculo para a estimativa da precisão da distância pela Lei dos Cossenos:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial d_1} & \frac{\partial F_1}{\partial d_2} & \frac{\partial F_1}{\partial Hz_{AB}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial d_1} & \frac{\partial F_2}{\partial d_2} & \frac{\partial F_2}{\partial Hz_{AB}} \\ \frac{\partial F_3}{\partial d_1} & \frac{\partial F_3}{\partial d_2} & \frac{\partial F_3}{\partial Hz_{AB}} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Onde:

d = Distância entre a Estação Total e os alvos;

H_z = Ângulo formado entre as direções "A" e "B".

$$\Sigma_{Lb} = \begin{bmatrix} \sigma_{d_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{d_2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Hz_{AB}}^2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

Onde:

σ_d^2 = Precisão linear do equipamento;

σ_{Hz}^2 = Precisão angular do equipamento.

De acordo com a equação 26 as coordenadas X,Y e Z são obtidas por:

$$X = X_0 + \text{dist} \cdot \sin(\text{angZ}) \cdot \sin(Az) \quad (36)$$

$$Y = Y_0 + \text{dist} \cdot \sin(\text{angZ}) \cdot \cos(Az) \quad (37)$$

$$Z = Z_0 + \text{dist} \cdot \cos(\text{angZ}) \quad (38)$$

As Matrizes D e Σ_{Lb} , 39 e 40 respectivamente, são referentes ao cálculo para a estimativa da precisão da distância pela metodologia da distância Euclidiana.

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial Xa} & \frac{\partial F_1}{\partial Xb} & \frac{\partial F_1}{\partial Ya} & \frac{\partial F_1}{\partial Yb} & \frac{\partial F_1}{\partial Za} & \frac{\partial F_1}{\partial Zb} \\ \frac{\partial F_2}{\partial Xa} & \frac{\partial F_2}{\partial Xb} & \frac{\partial F_2}{\partial Ya} & \frac{\partial F_2}{\partial Yb} & \frac{\partial F_2}{\partial Za} & \frac{\partial F_2}{\partial Zb} \\ \frac{\partial F_3}{\partial Xa} & \frac{\partial F_3}{\partial Xb} & \frac{\partial F_3}{\partial Ya} & \frac{\partial F_2}{\partial Yb} & \frac{\partial F_2}{\partial Za} & \frac{\partial F_2}{\partial Zb} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Onde:

X,Y,Z = Coordenadas dos alvos

$$\Sigma_{Lb} = \begin{bmatrix} \sigma_{X_A}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{X_B}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{Y_A}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{Y_B}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Z_A}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{Z_B}^2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Onde:

σ_X^2 , σ_Y^2 , σ_Z^2 = Precisão das coordenadas X, Y e Z

De acordo com a equação 33, obtém-se a MVC da distância utilizando-se da precisão nominal do equipamento.

3.3.2 Solução única das observações

Neste trabalho foi realizado o ajustamento pelo método combinado, tendo em vista que, para atender as especificidades dos modelos matemáticos, foi necessária a realização do ajustamento dos parâmetros e das observações juntamente, isto foi principalmente para a distância Euclidiana.

No ajustamento pelo método combinado, tendo a Lei dos Cossenos como modelo matemático, o processamento é realizado diretamente na média dos conjuntos de observações, obtendo a distância entre os alvos monitorados ajustada.

No modelo matemático da distância Euclidiana, o processo para se obter a distância ajustada é realizado em duas etapas, sendo que inicialmente calcula-se as coordenadas tridimensionais (X,Y,Z) dos alvos e seus desvios padrões, a partir das observações de distâncias e direções e ângulos. Na fase seguinte calcula-se a distância entre os alvos e suas precisões conforme a equação 1 do tópico 2.2.5.1. Dependendo do modelo matemático utilizado, os valores para n, u e r são os seguintes:

Lei dos Cossenos:

n = Valores observados = 12

u = Parâmetros = 1

r = Equações = 3

Distância Euclidiana:

n = Valores observados = 18

u = Parâmetros = 1

r = Equações = 3

O número de observações (n) tem que ser maior do que a quantidade de equações (r), o que se define como sendo o grau de liberdade (gl), e pode ser representado da seguinte forma:

$$gl = r - u \quad (41)$$

De acordo com os dados acima, se conhece as dimensões de cada matriz que compõem o ajustamento pelo método combinado para cada modelagem, como demonstrado a seguir:

Matrizes para a distância Euclidiana:

$${}_3A_{1 \ 1}X_1 + {}_3B_{18 \ 18}V_1 + {}_3W_1 = {}_30_1 \quad (42)$$

Matrizes para a Lei dos Cossenos:

$${}_3A_{1 \ 1}X_1 + {}_3B_{12 \ 12}V_1 + {}_3W_1 = {}_30_1 \quad (43)$$

A sequência do ajustamento foi realizada na seguinte ordem:

- 1° Preenchimento das matrizes e vetores conhecidos de acordo com os dados observados para o trabalho: L_b, X_0, P ;
- 2° Cálculo das matrizes: W, A, B ;
- 3° Cálculo das equações normais: $M = BP^{-1}B^T$.

As etapas para a realização do ajustamento são descritas a seguir:

➤ Matriz das observações (L_b):

Lei dos Cossenos:

$$L_{b_{12 \times 1}} = \begin{bmatrix} dA_1 \\ dA_2 \\ dA_3 \\ dB_1 \\ dB_2 \\ dB_3 \\ AzA_1 \\ AzA_2 \\ AzA_3 \\ AzB_1 \\ AzB_2 \\ AzB_3 \end{bmatrix} \quad (44)$$

Distância Euclidiana:

$$L_{b_{18 \times 1}} = \begin{bmatrix} XA_1 \\ XA_2 \\ XA_3 \\ YA_1 \\ YA_2 \\ YA_3 \\ ZA_1 \\ ZA_2 \\ ZA_3 \\ XB_1 \\ XB_2 \\ XB_3 \\ YB_1 \\ YB_2 \\ YB_3 \\ ZB_1 \\ ZB_2 \\ ZB_3 \end{bmatrix} \quad (45)$$

➤ Solução inicial (X_0): $X_{0\ 1 \times 1}$

$$X_0 = [d_{ED}] \quad (46)$$

Onde:

d_{ED} = Distância entre os alvos

➤ Matriz dos pesos: $P = (\sum l_b)^{-1}$

Distância Euclidiana:

$$P_{18 \times 18} = \begin{bmatrix} \sigma_{XAB_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{XAB_2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{XAB_3}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{YAB_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{ZAB_n}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\sigma ZAB_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{\sigma ZAB_n}^2 \end{bmatrix} \quad (47)$$

Onde:

X, Y, Z = Coordenadas dos alvos;

σ = Precisão das coordenadas

Lei dos Cossenos:

$$P_{12 \times 12} = \begin{bmatrix} \sigma_{dA_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{dA_2}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{dA_3}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{dB_1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_{AZB_n}^2 \end{bmatrix} \quad (48)$$

Onde:

d = Distância entre a Estação Total e os alvos;

Az = Azimute dos pontos.

➤ Matriz das derivadas em função dos parâmetros: $A = \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{X_0}$

$$A_{3 \times 1} = \left[\frac{\partial F_1}{\partial d_{AB}} \right] \quad (49)$$

➤ Matriz das derivadas em função das observações: $B = \frac{\partial F}{\partial L_a} \Big|_{L_b}$

Lei dos Cossenos:

$$B_{3 \times 12} = \left[\begin{array}{cccc|cccc|cccc} \frac{\partial F_1}{\partial d_{A_1}} & \frac{\partial F_1}{\partial d_{B_1}} & \frac{\partial F_1}{\partial Az_{A_1}} & \frac{\partial F_1}{\partial Az_{B_1}} & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial d_{A_n}} & \frac{\partial F_1}{\partial d_{B_n}} & \frac{\partial F_1}{\partial Az_{A_{1n}}} & \frac{\partial F_1}{\partial Az_{B_n}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial d_{A_1}} & \frac{\partial F_2}{\partial d_{B_1}} & \frac{\partial F_2}{\partial Az_{A_1}} & \frac{\partial F_2}{\partial Az_{B_1}} & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial F_2}{\partial d_{A_n}} & \frac{\partial F_2}{\partial d_{B_n}} & \frac{\partial F_2}{\partial Az_{A_{1n}}} & \frac{\partial F_2}{\partial Az_{B_n}} \\ \frac{\partial F_3}{\partial d_{A_1}} & \frac{\partial F_3}{\partial d_{B_1}} & \frac{\partial F_3}{\partial Az_{A_1}} & \frac{\partial F_3}{\partial Az_{B_1}} & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{\partial F_3}{\partial d_{A_n}} & \frac{\partial F_3}{\partial d_{B_n}} & \frac{\partial F_3}{\partial Az_{A_{1n}}} & \frac{\partial F_3}{\partial Az_{B_n}} \end{array} \right] \quad (50)$$

Sendo:

d_A, d_B = Distância entre a Estação Total e os alvos;

Az_A e Az_B = Azimute dos alvos.

A matriz B abaixo apresentada (distância Euclidiana) tem sua dimensão original 3x18, ou seja, 3 linhas e 18 colunas. Porém, para melhor apresentação, a mesma foi transposta, ficando 18x3.

Distância Euclidiana:

$$B_{18 \times 3} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial XE_1} & \frac{\partial F_2}{\partial XE_1} & \frac{\partial F_3}{\partial XE_1} \\ \frac{\partial F_1}{\partial YE_1} & \frac{\partial F_2}{\partial YE_1} & \frac{\partial F_3}{\partial YE_1} \\ \frac{\partial F_1}{\partial ZE_1} & \frac{\partial F_2}{\partial ZE_1} & \frac{\partial F_3}{\partial ZE_1} \\ \frac{\partial F_1}{\partial XD_1} & \frac{\partial F_2}{\partial XD_1} & \frac{\partial F_3}{\partial XD_1} \\ \frac{\partial F_1}{\partial YD_1} & \frac{\partial F_2}{\partial YD_1} & \frac{\partial F_3}{\partial YD_1} \\ \frac{\partial F_1}{\partial ZD_1} & \frac{\partial F_2}{\partial ZD_1} & \frac{\partial F_3}{\partial ZD_1} \\ \frac{\partial F_1}{\partial XE_2} & \frac{\partial F_2}{\partial XE_2} & \frac{\partial F_3}{\partial XE_2} \\ \frac{\partial F_1}{\partial YE_2} & \frac{\partial F_2}{\partial YE_2} & \frac{\partial F_3}{\partial YE_2} \\ \frac{\partial F_1}{\partial ZE_2} & \frac{\partial F_2}{\partial ZE_2} & \frac{\partial F_3}{\partial ZE_2} \\ \frac{\partial F_1}{\partial XD_2} & \frac{\partial F_2}{\partial XD_2} & \frac{\partial F_3}{\partial XD_2} \\ \frac{\partial F_1}{\partial YD_2} & \frac{\partial F_2}{\partial YD_2} & \frac{\partial F_3}{\partial YD_2} \\ \frac{\partial F_1}{\partial ZD_2} & \frac{\partial F_2}{\partial ZD_2} & \frac{\partial F_3}{\partial ZD_2} \\ \frac{\partial F_1}{\partial XE_3} & \frac{\partial F_2}{\partial XE_3} & \frac{\partial F_3}{\partial XE_3} \\ \frac{\partial F_1}{\partial YE_3} & \frac{\partial F_2}{\partial YE_3} & \frac{\partial F_3}{\partial YE_3} \\ \frac{\partial F_1}{\partial ZE_3} & \frac{\partial F_2}{\partial ZE_3} & \frac{\partial F_3}{\partial ZE_3} \\ \frac{\partial F_1}{\partial XD_3} & \frac{\partial F_2}{\partial XD_3} & \frac{\partial F_3}{\partial XD_3} \\ \frac{\partial F_1}{\partial YD_3} & \frac{\partial F_2}{\partial YD_3} & \frac{\partial F_3}{\partial YD_3} \\ \frac{\partial F_1}{\partial ZD_3} & \frac{\partial F_2}{\partial ZD_3} & \frac{\partial F_3}{\partial ZD_3} \end{bmatrix} \quad (51)$$

Onde:

X, Y, Z = Coordenadas dos alvos;

E e D = Alvos Esquerdo e Direito da mira, respectivamente;

➤ Matriz M : $M = BP^{-1}B^T$

$$\begin{bmatrix} P-B^T 0 \\ B & 0 & A \\ 0 & A^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ K \\ X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ W \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$\begin{bmatrix} V \\ K \\ X \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} P-B^T 0 \\ B & 0 & A \\ 0 & A^T & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ W \\ 0 \end{bmatrix}$$

As matrizes que resultam na matriz M possuem dimensões e elementos de acordo com os modelos matemáticos.

➤ Vetor de erro de fechamento: $W_{3 \times 1} = F(L_b, X_0)$

Distância Euclidiana:

$$W = \begin{bmatrix} (dAB_1) - \sqrt{(XA_1 - XB_1)^2 + (YA_1 - YB_1)^2 (ZA_1 - ZB_1)^2} \\ (dAB_2) - \sqrt{(XA_2 - XB_2)^2 + (YA_2 - YB_2)^2 (ZA_2 - ZB_2)^2} \\ (dAB_3) - \sqrt{(XA_3 - XB_3)^2 + (YA_3 - YB_3)^2 (ZA_3 - ZB_3)^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (53)$$

Lei dos Cossenos:

$$W = \begin{bmatrix} (dAB_1) - \sqrt{A_1^2 + B_1^2 - 2 * A_1 * B_1 (\cos(\alpha_1 - \beta_1))} \\ (dAB_2) - \sqrt{A_2^2 + B_2^2 - 2 * A_2 * B_2 (\cos(\alpha_2 - \beta_2))} \\ (dAB_3) - \sqrt{A_3^2 + B_3^2 - 2 * A_3 * B_3 (\cos(\alpha_3 - \beta_3))} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (54)$$

➤ Vetor de correções (X): $X_a = X_{0_{1x1}} + X_{1x1}$

$$X = -(A^T M^{-1} A)^{-1} A^T M^{-1} W \quad (55)$$

Após as iterações de X é necessário calcular o vetor dos Lagrangianos (K) para a obtenção dos resíduos, que será de acordo com os modelos matemáticos:

$$K = -M^{-1} (AX + W) \quad (56)$$

$$V = P^{-1} B^T K \quad (57)$$

O ajustamento converge, quando os resíduos e os parâmetros tendem a estabilizar e as correções dos parâmetros tendem a zero. Finalmente obtém-se o vetor das observações ajustadas:

$$L_a = L_b + V \quad (58)$$

3.3.3 Análise Estatística

A hipótese nula H_0 foi definida como sendo a distância calculada pelos modelos matemáticos igual ao valor de referência. Assim, a distribuição t de Student é bicaudal, tendo em vista que se pode obter resultados com valores maiores ou menores do que o valor de referência

$$H_0: X_1 - X_m = 0 \quad (59)$$

$$H_A: X_1 - X_m \neq 0 \quad (60)$$

Onde:

X_1 = Distâncias calculadas pelos modelos matemáticos;

X_m = Valor de referência.

Caso as distâncias sejam estatisticamente iguais dentro de um nível de confiança de 90%, a hipótese H_0 não é rejeitada. Se as distâncias não são estatisticamente iguais, então H_0 é rejeitada.

Para os resultados dos experimentos realizados no Centro Politécnico, o valor de referência para a construção das hipóteses foi o comprimento da mira horizontal de invar, 2 metros.

Para os resultados das campanhas de monitoramento da UHE Salto Caxias, quando comparadas as distâncias obtidas com os diferentes métodos, a medida de referência é a distância entre os alvos obtida pela modelagem da distância Euclidiana. Quando a análise se referir ao mesmo método em diferentes campanhas, a referência utilizada é a distância da campanha de novembro de 2016.

O quadro 4 apresenta a definição do valor de referência das hipóteses para cada experimento realizado.

QUADRO 4 - DEFINIÇÃO DAS HIPÓTESES

Épocas e métodos	X_m	X_1
Novembro 2016	Distância Euclidiana	Lei dos Cossenos
Julho 2017	Distância Euclidiana	Lei dos Cossenos
Distância Euclidiana	Novembro/16	Julho/17
Lei dos Cossenos	Novembro/16	Julho/17

FONTE: A autora (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 EXPERIMENTOS REALIZADOS NO CENTRO POLITÉCNICO

Os resultados apresentados na tabela 1 são referentes a estimativa da qualidade das distâncias entre os pontos ocupados (E250, E300, E350) com as Estações Totais e o ponto MIRA, mostrados na figura 20, do tópico 3.2.1.

A estimativa da qualidade das observações foi realizada conforme propagação de covariâncias, descrita no tópico 3.3.1, considerando-se as precisões nominais angular e linear das Estações Totais. Os resultados obtidos são referentes a um conjunto (PD-PI) de observação em cada ponto de ocupação.

TABELA 1 - PRECISÕES DE ACORDO COM A DISTÂNCIA OBSERVADA E AS PRECISÕES NOMINAIS DAS ESTAÇÕES TOTAIS

Distância entre Estação Total e mira (m)	Desvio padrão Distância Euclidiana (mm)		Desvio padrão Lei dos Cossenos (mm)	
	TCRA1205	TS15	TCRA1205	TS15
250,108	10,0	4,4	6,5	2,3
300,060	10,0	4,4	7,8	2,5
350,582	10,0	4,4	8,9	2,7

FONTE: A autora (2018).

O estudo comparativo na tabela 1 demonstrou que ambas as Estações Totais apresentaram melhores resultados quando empregado a Lei dos Cossenos. A propagação mostra que as precisões calculadas para o método da Lei dos Cossenos são melhores do que no caso das distâncias euclidiana entre os pontos, uma vez que o modelo matemático, no primeiro caso, envolve um número menor de cálculos matemáticos e determinação de grandezas auxiliares.

Os resultados com a Estação Total TS15 se mostraram melhores nos dois modelos matemáticos. Os valores de desvio padrão das distâncias obtidas com os dados coletados com a Estação TS15, nas duas modelagens matemáticas, tiveram melhorias acima de 50% em relação à outra Estação Total. Com a distância Euclidiana, as precisões foram por volta de 4,4 mm e com a Lei dos Cossenos a maior foi de 2,7mm. Para a TCRA1205 as precisões foram de

aproximadamente 10mm para a distância Euclidiana e a maior de 8,9mm para a Lei dos Cossenos.

Em análise da tabela 1 verifica-se que conforme menor a distância calculada, melhor é a precisão obtida. Isso pode ser visto tanto para a Estação Total TCRA1205 e TS15 nos resultados obtidos pela Lei dos Cossenos. Já para a distância Euclidiana, não houve variação na precisão calculada.

4.1.1 Mira Horizontal de ínvar na horizontal

Os resultados apresentados nas tabelas 2, 3, 4 e 5 referem-se às distâncias entre os alvos da mira calculadas pela distância Euclidiana e pela Lei dos Cossenos, com as observações obtidas com as Estações Totais TCRA1205 e TS15.

Os resultados foram submetidos ao teste de hipóteses, t-Student, em que se verifica, a um nível de confiança de 90%, se os valores são iguais estatisticamente ao valor de referência para os experimentos, o comprimento da mira (2 metros).

TABELA 2 - DISTÂNCIA EUCLIDIANA - Estação Total TCRA1205

Distância da Estação Total em relação a Mira (m)	Mira em relação a linha de visada da Estação Total (°)	Comprimento Calculado (m)	Desvio padrão do comprimento calculado (mm)	Diferença com o valor de referência (m)	Resultado do teste Estatístico t Student a 90% de confiabilidade
250	90°	1,999	10,0	0,001	Igual
	114°	2,002	10,0	-0,002	Igual
	133°	2,003	10,0	-0,003	Igual
300	90°	2,001	10,0	-0,001	Igual
	114°	1,999	10,0	0,001	Igual
	133°	1,999	10,0	0,000	Igual
350	90°	1,998	10,0	0,001	Igual
	114°	1,998	10,0	0,002	Igual
	133°	1,997	10,0	0,003	Igual

FONTE: A autora (2018).

TABELA 3 - DISTÂNCIA EUCLIDIANA - Estação Total TS15

Distância da Estação Total em relação a Mira (m)	Mira em relação a linha de visada da Estação Total (°)	Comprimento Calculado (m)	Desvio padrão do comprimento calculado (mm)	Diferença com o valor de referência (m)	Resultado do teste Estatístico t Student a 90% de confiabilidade
250	90°	1,998	4,4	0,001	Igual
	114°	2,002	4,4	-0,002	Igual
	133°	2,001	4,4	-0,001	Igual
300	90°	1,999	4,4	0,001	Igual
	114°	1,998	4,4	0,002	Igual
	133°	2,002	4,4	-0,002	Igual
350	90°	1,996	4,4	0,004	Igual
	114°	1,999	4,4	0,001	Igual
	133°	1,998	4,4	0,002	Igual

FONTE: A autora (2018).

Comparando-se os resultados das tabelas 2 e 3, tanto para a Estação Total TCRA1205 quanto para TS15 observa-se que em média, a diferença com relação ao valor de referência da mira e o desvio padrão são maiores para o ponto que está a 350m da mira, ou seja, o ponto mais distante.

Na tabela 2 referente aos resultados obtidos pelo equipamento TCRA1205, o valor médio tanto para a diferença com o valor de referência como para os três ângulos, são melhores para estação E300 (2,06mm e 0,43mm, respectivamente). No geral, as diferenças com relação ao valor de referência não passaram de 4mm, para as duas Estações Totais. Não foi possível verificar um padrão para definição da melhor precisão dos resultados de acordo com a posição angular. Para a Estação Total TCRA1205 (tabela 1), a variação menor de distância com relação ao valor de referência foi na posição angular de 90°, tanto para o ponto a 250 m da mira, quanto para o ponto a 350m. Para a Estação Total TS15 (tabela 2) para o ponto a 250m da mira, a menor variação de distância com relação ao valor de referência (0,8mm) foi para a posição angular de 133°. Para o ponto a 300 m da mira, a menor variação de distância (0,6mm) foi para a posição angular de 90°. Para o ponto a 350 m da mira, a menor variação de distância (0,9mm) foi para a posição angular de 114°.

Nas tabelas 4 e 5 são apresentados os resultados obtidos pela modelagem da Lei dos Cossenos utilizando os dois modelos de Estação Total.

TABELA 4 - LEI DOS COSSENOS - ESTAÇÃO TOTAL TCRA1205

Distância da Estação Total em relação a Mira (m)	Mira em relação a linha de visada da Estação Total(°)	Comprimento Calculado (m)	Desvio padrão do comprimento calculado (mm)	Diferença com o valor de referência (m)	Resultado do teste Estatístico t Student a 90% de confiabilidade
250	90°	1,999	6,5	0,000	Igual
	114°	2,001	6,5	-0,001	Igual
	133°	2,003	6,5	-0,003	Igual
300	90°	2,001	7,8	-0,001	Igual
	114°	1,999	7,8	0,000	Igual
	133°	1,999	7,8	0,000	Igual
350	90°	1,997	8,9	0,001	Igual
	114°	1,998	8,9	0,002	Igual
	133°	1,996	8,9	0,003	Igual

FONTE: A autora (2018).

TABELA 5 - LEI DOS COSSENOS - ESTAÇÃO TOTAL TS15

Distância da Estação Total em relação a Mira (m)	Mira em relação a linha de visada da Estação Total (°)	Comprimento Calculado (m)	Desvio padrão do comprimento o calculado (mm)	Diferença com o valor de referência (m)	Resultado do teste Estatístico t Student a 90% de confiabilidade
250	90°	1,999	2,3	0,001	Igual
	114°	2,002	2,3	-0,002	Igual
	133°	2,001	2,3	-0,001	Igual
300	90°	1,999	2,5	0,000	Igual
	114°	1,998	2,5	0,002	Igual
	133°	2,001	2,5	-0,002	Igual
350	90°	1,996	2,7	0,004	Igual
	114°	1,999	2,7	0,001	Igual
	133°	1,998	2,7	0,002	Igual

FONTE: A autora (2018).

Os resultados das tabelas 4 e 5, calculados utilizando a modelagem da Lei dos Cossenos, mantiveram o mesmo comportamento dos resultados obtidos com a Distância Euclidiana, tabelas 2 e 3. Tanto para a Estação Total TCRA1205 quanto para TS15 observa-se que em média, a diferença com relação ao valor de referência da mira e o desvio padrão são maiores para o ponto que está a 350m da mira. Na tabela 4, referente aos resultados obtidos pelo equipamento TCRA1205, o valor médio para a diferença com o valor de referência para os três ângulos, são melhores para estação E250. Na tabela 5, com a TS15, o desvio padrão do comprimento calculado é, em geral, melhor para todas as posições angulares da mira na E250.

Analisando-se os resultados pela posição angular da mira, na tabela 4, para a Estação Total TCRA1205, as variações menores de distância com relação

ao valor de referência também foram na posição angular de 90° , tanto para o ponto a 250m da mira, quanto para o ponto a 350m.

Para a Estação Total TS15 (tabela 5) para o ponto a 250m da mira, a menor variação de distância com relação ao valor de referência foi para a posição angular de 90° e 133° . Para o ponto a 300m da mira, a posição que não apresentou variação de distância foi a posição angular de 90° . Para o ponto a 350m da mira, a menor variação de distância (1mm) foi para a posição angular de 114° .

Assim como para a distância Euclidiana, as diferenças das distâncias obtidas com a Lei dos Cossenos com relação ao valor de referência não superaram 4mm, para as duas Estações Totais.

Todas as distâncias calculadas foram comparadas estatisticamente a um grau de confiabilidade de 90% com o valor de referência, e resultados se mostraram iguais.

4.1.2 Mira horizontal de ínvar inclinada

Os resultados apresentados neste tópico são referentes aos dados coletados com as duas Estações Totais observando a mira horizontal na posição inclinada. Neste experimento, apenas a estação E250 foi ocupada para a realização das observações, a mesma fica a 250 metros de distância dos alvos, conforme descrição e ilustrações no item 3.2.2 da metodologia.

As tabelas 6 e 7 apresentam os resultados obtidos pela modelagem da distância Euclidiana, calculados a partir dos dados coletados pelas Estações Totais TCRA1205 e TS15.

Os graus de inclinação da mira foram de aproximadamente 25° e 6° . Estes, por sua vez, somente foram conhecidos na etapa de cálculos, por meio da equação 30, apresentada no tópico 3.3.

TABELA 6 - MIRA INCLINADA E ROTACIONADA - DISTÂNCIA EUCLIDIANA (ESTAÇÃO TOTAL TCRA1205)

Distância da Estação Total em relação a Mira (m)	Mira em relação a linha de visada da Estação Total (°)	Comprimento Calculado (m)	Desvio padrão do comprimento calculado (mm)	Diferença com o valor de referência (m)	Resultado do teste Estatístico t Student a 90% de confiabilidade
250	90°/0°	2,003	10,0	-0,003	Igual
	90°/25°	2,002	10,0	-0,002	Igual
	114°/6°	1,999	10,0	0,001	Igual

FONTE: A autora (2018).

TABELA 7 - MIRA INCLINADA E ROTACIONADA - DISTÂNCIA EUCLIDIANA (ESTAÇÃO TOTAL TS15)

Distância da Estação Total em relação a Mira (m)	Mira em relação a linha de visada da Estação Total (°)	Comprimento Calculado (m)	Desvio padrão do comprimento calculado (mm)	Diferença com o valor de referência (m)	Resultado do teste Estatístico t Student a 90% de confiabilidade
250	90°/0°	1,999	4,4	0,001	Igual
	90°/25°	2,002	4,4	-0,002	Igual
	114°/6°	2,002	4,4	-0,002	Igual

FONTE: A autora (2018).

Em análise dos dados das tabelas 6 e 7, verifica-se que os valores de distâncias mais próximos do valor de referência são os apresentados na tabela 7, relacionados a Estação Total TS15. De forma geral, não houveram diferenças significativas entre os valores obtidos com a mira observada com os alvos no mesmo plano horizontal (90°/0) e em planos horizontais distintos (90°/25°) ou quando deslocada para a posição angular de 114° (90°/6°). As diferenças com relação ao valor de referência não foram maiores do que 3 mm, para as duas Estações Totais.

Nas tabelas 8 e 9 estão os resultados obtidos com os dados observados com a modelagem da Lei dos Cossenos. Conforme dito anteriormente, quando utilizada a Lei dos Cossenos para calcular as distâncias entre os alvos em planos horizontais distintos, o que se calcula é a projeção da distância entre os mesmos. As tabelas citadas possuem um campo nomeado “Valor Recuperado”. Este campo é referente a etapa matemática realizada para a recuperação do comprimento “Real” da mira, equações 25 a 28, apresentadas no tópico 3.3.

TABELA 8 - MIRA INCLINADA E ROTACIONADA - LEI DOS COSSENOS - ESTAÇÃO TOTAL TCRA1205

Distância da Estação Total em relação a Mira (m)	Mira em relação a linha de visada da Estação Total (°)		Comprimento Calculado (m)	Desvio padrão do comprimento calculado (mm)	Diferença com o valor de referência (m)	Resultado do teste Estatístico t Student a 90% de confiabilidade
250	Valores Calculados	90°/0°	2,003	6,5	-0,003	Igual
		90°/25°	1,815	6,5	0,185	Diferente
		114°/6°	1,984	6,5	0,015	Diferente
	Valores Recuperados	90°/0°	2,003	6,5	-0,003	Igual
		90°/25	2,003	6,5	-0,003	Igual
		114°/6	1,997	6,5	0,002	Igual

FONTE: A autora (2018).

TABELA 9 - MIRA INCLINADA E ROTACIONADA - LEI DOS COSSENOS - ESTAÇÃO TOTAL TS15

Distância da Estação Total em relação a Mira (m)	Mira em relação a linha de visada da Estação Total (°)		Comprimento Calculado (m)	Desvio padrão do comprimento o calculado (mm)	Diferença com o valor de referência (m)	Resultado do teste Estatístico t Student a 90% de confiabilidade
250	Valores Calculados	90°/0°	1,999	2,3	0,001	Igual
		90°/25°	1,811	2,3	0,189	Diferente
		114°/6°	1,989	2,3	0,012	Diferente
	Valores Recuperados	90°/0°	1,999	2,3	0,001	Igual
		90°/25	1,999	2,3	0,001	Igual
		114°/6°	2,001	2,3	-0,001	Igual

FONTE: A autora (2018).

Nas tabelas 8 e 9 os valores analisados são referentes ao campo nomeado “Valor Recuperto”. Os resultados médios dos desvios padrões para as duas tabelas são iguais. A menor diferença entre o valor calculado e o valor padrão, foi obtida com a Estação Total TS15.

Assim como na tabela 7, referente aos resultados da distância Euclidiana com a Estação Total TS15, também para a Lei dos Cossenos, os valores de distâncias mais próximos do valor de referência são relacionados a esse equipamento, com 1,1 mm, 0,7mm e 1 mm para as posições de inclinação 0°, 25° e 6°, respectivamente.

Comparando as tabelas 6 e 8, para a Estação Total TCRA1205, os valores de desvio padrão e diferença entre o valor de referência e a distância calculada foram melhores para a Distância Euclidiana do que para a Lei dos Cossenos. Já com a Estação Total TS15, tabelas 7 e 9, os resultados foram melhores para a Lei dos Cossenos.

O teste estatístico *t Student* confirmou a igualdade das distâncias calculadas, apenas na posição angular de $90^{\circ}/0^{\circ}$. Já os valores recuperados, apresentados nas tabelas 8 e 9, tiveram a igualdade estatística a 90% de confiabilidade.

4.2 RESULTADOS OS DADOS DA UHE SALTO CAXIAS

Conforme apresentado no tópico 3, quadro 2, os resultados obtidos a partir dos dados brutos das campanhas de monitoramento da UHE Salto Caxias, coletados pela Estação Total TCRA1205, foram processados com as metodologias baseadas na Lei dos Cossenos e Distância Euclidiana. Todos os alvos os quais tiveram suas distâncias calculadas neste trabalho estão localizados a aproximadamente 240 metros até o ponto de observação, conforme ilustrado na figura 19 no tópico 3.2.

Os pontos destacados nas tabelas 10, 11, 12 e 13 estão localizados no mesmo plano horizontal, no paramento da barragem. Para os demais pontos, localizados em planos horizontais diferentes, quando calculadas as distâncias pela Lei dos Cossenos, o valor apresentado é referente ao valor recuperado, conforme apresentado no tópico 3.3.

4.2.1 Campanha de novembro de 2016

Na tabela 10, são apresentados os resultados referentes ao monitoramento dos alvos engastados nos blocos 8 e 11, da campanha de novembro de 2016, obtidos com as modelagens da Distância Euclidiana e Lei dos Cossenos.

4.2.1 Campanha de novembro de 2016

TABELA 10 - DISTÂNCIA EUCLIDIANA x COSSENO - NOVEMBRO 2016

Pontos de monitoramento	Distância EUCLIDIANA NOV-16 (m)	Desvio D.E (mm)	Distância LEI DOS COSSENO NOV-16 (m)	Desvio L.C (mm)	Diferença D.E NOV - L.C NOV (m)	Resultado do teste Estatístico t Student a 90% de CONFIABILIDADE
						LEI DOS COSSENO
19-20	2,820	10,0	2,821	6,5	-0,001	Igual
21-22	1,821	10,0	1,816	6,5	0,005	Igual
23-24	1,714	10,0	1,717	6,5	-0,003	Igual
29-30	1,314	10,0	1,315	6,5	0,001	Igual
31-32	1,511	10,0	1,510	6,5	0,001	Igual
33-34	1,280	10,0	1,279	6,5	0,001	Igual
35-36	9,504	10,0	9,503	6,5	0,001	Igual
19-26	41,801	10,0	41,814	6,5	-0,013	Igual
19-30	113,165	10,0	113,165	6,5	0,000	Igual
19-32	113,903	10,0	113,902	6,5	0,001	Igual
19-34	115,146	10,0	115,146	6,5	0,000	Igual
19-36	125,552	10,0	125,552	6,5	0,000	Igual
29-34	25,581	10,0	25,575	6,5	0,006	Igual
29-36	45,714	10,0	45,719	6,5	-0,005	Igual

FONTE: A autora (2018).

Para os alvos localizados em planos horizontais diferentes, a média da diferença das distâncias calculadas pelas duas modelagens foi abaixo do do desvio padrão, portanto podem ser consideradas iguais. A maior diferença encontrada foi de 13mm e refere-se aos alvos 19-26 engastados no bloco 8.

4.2.2 Campanha de julho 2017

Na tabela 11 a seguir se comparam os resultados obtidos utilizando as modelagens da distância Euclidiana e da Lei dos Cossenos na campanha de julho de 2017.

TABELA 11 - DISTÂNCIA EUCLIDIANA x COSSENO - JULHO/17

Pontos de monitoramento	Distância EUCLIDIANA JUL-17 (m)	Desvio D.E (mm)	Distância LEI DOS COSSENO JUL-17 (m)	Desvio L.C (mm)	Diferença D.E JUL-L.C JUL (m)	Resultado do teste Estatístico t Student a 90% de CONFIABILIDADE
						LEI DOS COSSENO
19-20	2,817	10,0	2,815	6,5	0,002	Igual
21-22	1,816	10,0	1,815	6,5	0,001	Igual
23-24	1,717	10,0	1,717	6,5	0,000	Igual
29-30	1,311	10,0	1,305	6,5	0,006	Igual
31-32	1,510	10,0	1,505	6,5	0,005	Igual
33-34	1,282	10,0	1,282	6,5	0,000	Igual
35-36	9,508	10,0	9,507	6,5	0,001	Igual
19-30	113,165	10,0	113,165	6,5	0,000	Igual
19-34	115,156	10,0	115,154	6,5	0,002	Igual
19-36	125,559	10,0	125,562	6,5	-0,003	Igual
29-32	14,339	10,0	14,351	6,5	-0,012	Igual
29-36	45,717	10,0	45,720	6,5	-0,003	Igual

FONTE: A autora (2018).

Para os pontos de monitoramento localizados no mesmo plano horizontal, a análise estatística mostrou que as distâncias calculadas pela Lei dos Cossenos são estatisticamente iguais com relação aos resultados calculados pela distância Euclidiana. A maior diferença encontrada entre as distâncias calculadas pelas duas modelagens testadas foi de 6mm e se refere aos alvos 29-30, engastados no bloco 08. Não existem diferenças na média das distâncias calculadas pelas duas modelagens.

4.2.3 Campanha de Novembro/16 x Julho/17

Na tabela 12 encontram-se os resultados das distâncias calculadas pela distância Euclidiana para as campanhas de novembro de 2016 e julho de 2017.

TABELA 12 - DISTÂNCIA EUCLIDIANA - NOVEMBRO/16 x JULHO/17 (D.E)

Pontos de monitoramento	Distância EUCLIDIANA- NOV-16 (m)	Desvio D.E (mm)	Distância EUCLIDIANA- JUL-17 (m)	Desvio D.E (m)	Diferença D.E NOV - D.E JUL (m)	Resultado do teste Estatístico t Student a 90% de CONFIABILIDADE
						DISTÂNCIA EUCLIDIANA
19-20	2,820	10,0	2,817	6,5	0,003	Igual
21-22	1,821	10,0	1,816	6,5	0,005	Igual
23-24	1,714	10,0	1,717	6,5	-0,003	Igual
29-30	1,314	10,0	1,311	6,5	0,003	Igual
31-32	1,511	10,0	1,510	6,5	0,001	Igual
33-34	1,280	10,0	1,282	6,5	-0,002	Igual
35-36	9,504	10,0	9,508	6,5	-0,004	Igual
19-22	14,619	10,0	14,620	6,5	-0,001	Igual
19-26	41,801	10,0	41,808	6,5	-0,007	Igual
19-30	113,165	10,0	113,165	6,5	0,000	Igual
19-32	113,903	10,0	113,901	6,5	0,002	Igual
19-34	115,146	10,0	115,156	6,5	-0,010	Igual
19-36	125,552	10,0	125,559	6,5	-0,007	Igual
29-32	14,339	10,0	14,339	6,5	0,000	Igual
29-34	25,581	10,0	25,588	6,5	-0,007	Igual
29-36	45,714	10,0	45,717	6,5	-0,003	Igual

FONTE: A autora (2018).

Na tabela 12, de acordo com o teste estatístico aplicado, foi mantido o padrão de igualdade estatística das distâncias entre as campanhas em todos os resultados onde a diferença é menor do que o desvio padrão da distância comparada.

Na tabela 13 são apresentados os resultados obtidos utilizando a modelagem da Lei dos Cossenos com o processamento dos dados das campanhas de novembro de 2016 e julho de 2017.

TABELA 13 - LEI DOS COSSENOS - NOVEMBRO/16 x JULHO/17 (L.C)

Pontos de monitoramento	Distância LEI DOS COSSENOS- NOV-16 (m)	Desvio L.C (mm)	Distância LEI DOS COSSENOS- JUL (m)	Desvio L.C (mm)	Diferença L.C NOV - L.C JUL (m)	Resultado do teste Estatístico t Student a 90% de CONFIABILIDADE
						LEI DOS COSSENOS
19-20	2,821	6,5	2,815	6,5	0,006	Igual
21-22	1,816	6,5	1,815	6,5	0,001	Igual
23-24	1,717	6,5	1,717	6,5	-0,003	Igual
29-30	1,315	6,5	1,305	6,5	0,010	Igual
31-32	1,510	6,5	1,505	6,5	0,005	Igual
33-34	1,279	6,5	1,282	6,5	-0,002	Igual
35-36	9,503	6,5	9,507	6,5	-0,003	Igual
19-22	3,259	6,5	3,246	6,5	0,013	Igual
19-26	16,891	6,5	16,886	6,5	0,005	Igual
19-30	113,165	6,5	113,165	6,5	0,000	Igual
19-32	113,008	6,5	113,008	6,5	0,000	Igual
19-34	112,463	6,5	112,470	6,5	-0,007	Igual
19-36	118,588	6,5	118,597	6,5	-0,009	Igual
29-32	1,689	6,5	1,683	6,5	0,006	Igual
29-36	19,751	6,5	19,746	6,5	0,005	Igual

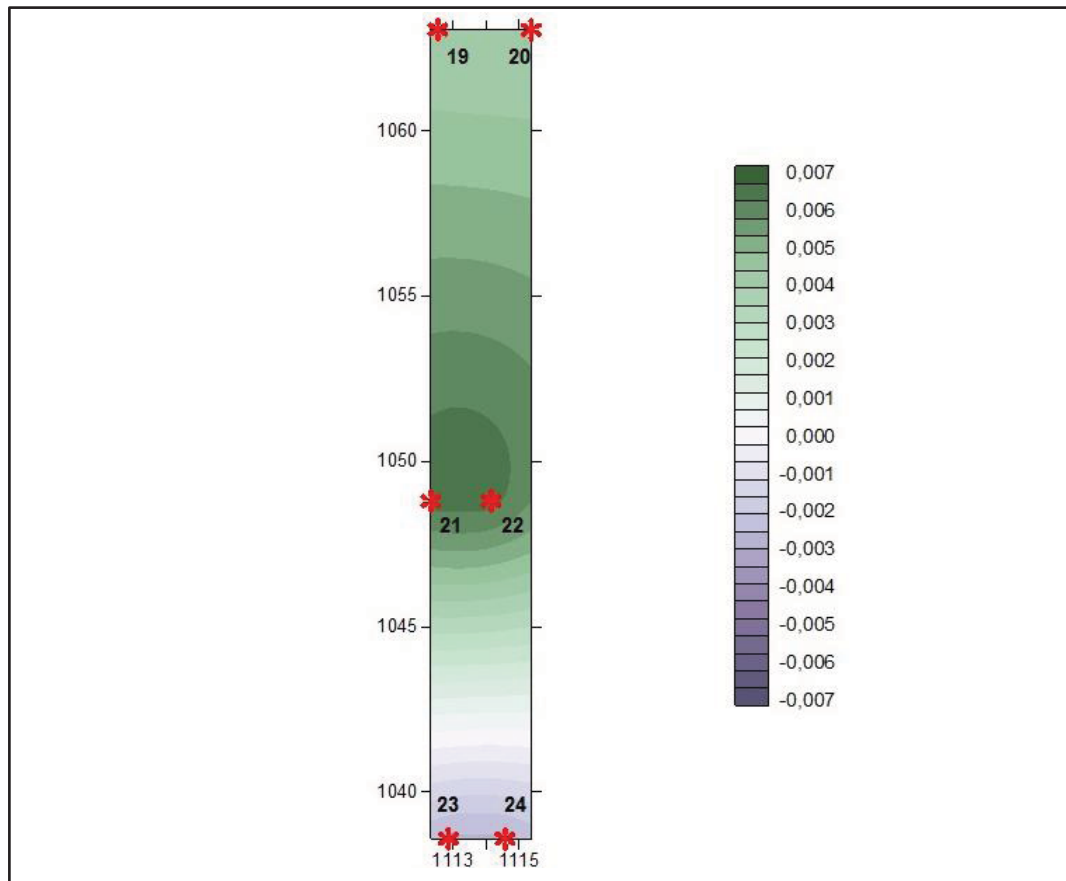
FONTE: A autora (2018).

Para os pontos monitorados localizados no mesmo plano horizontal, apresentados na tabela 13, não houve diferença entre a média das distâncias calculadas nas duas campanhas.

Para uma análise complementar, representa-se nas figuras 32 e 33 as diferenças das distâncias entre as campanhas de novembro e julho obtidas pela modelagem da distância Euclidiana, tabela 12, para os alvos engastados no mesmo plano horizontal.

Na figura 32 pode-se observar que a maior variação ocorre na distância entre os alvos 21-22, aproximadamente na altura média, considerando a região em que a barragem tem contato com o leito do rio e a crista da mesma, e a menor variação na região onde a barragem toca o leito do rio, alvos 23-24 e na crista da barragem, alvos 19-20.

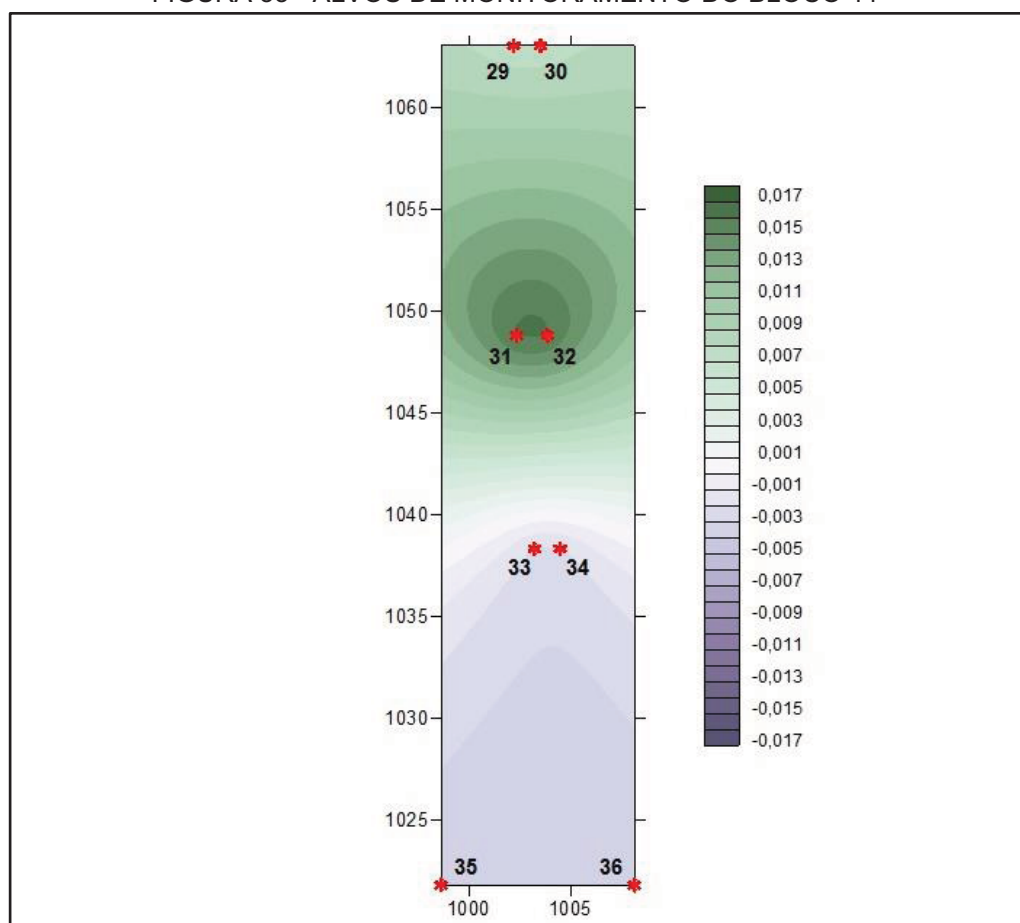
FIGURA 32 - ALVOS DE MONITORAMENTO DO BLOCO 8



FONTE: A autora (2018).

Assim como observado na figura 32, na figura 33, os pontos que apresentaram a maior variação da distância entre as campanhas, foram os alvos 31-32, que estão engastados aproximadamente no terço superior da barragem.

FIGURA 33 - ALVOS DE MONITORAMENTO DO BLOCO 11



FONTE: A autora (2018).

Observando a tabela 13 e nas figuras 32 e 33, verifica-se que as menores diferenças estão nas distâncias entre os pontos 21-22, do bloco 8 e entre os pontos 33 e 34 no bloco 11, sendo 1mm e - 2mm, respectivamente. A maior diferença é de 10mm na distância entre os alvos 29-30 do bloco 11.

Tendo em vista as diferentes épocas de coleta dos dados, as diferenças identificadas nas distâncias entre as campanhas de julho e novembro, podem ter sido ocasionadas pela sazonalidade em virtude da coleta de dados.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

Para ambos os modelos matemáticos e para as duas Estações Totais testadas, na determinação da distância entre os alvos da mira horizontal de ínvar no Centro Politécnico, as distâncias entre os alvos, são estatisticamente iguais ao Padrão de Referência utilizado, obtido através da calibração da distância entre os alvos da mira horizontal de ínvar, no Laboratório de Instrumentação Geodésica da UFPR.

Para os experimentos realizados no Centro Politécnico da UFPR, simulando alvos dispostos no mesmo plano horizontal, as distâncias obtidas com as modelagens da Lei dos Cossenos e distância Euclidiana, em geral, apresentaram diferenças, em relação ao valor de referência, de no máximo 4mm, para as duas Estações Totais. Ou seja, dentro da precisão nominal dos equipamentos testados.

Para o experimento simulando alvos em planos horizontais diferentes, tanto para a modelagem da distância Euclidiana quanto para a Lei dos Cossenos, não houveram diferenças significativas entre os valores obtidos para a distância entre os alvos da mira horizontal de ínvar. Cabe salientar que quando utiliza-se a Lei dos Cossenos obtém-se a distância projetado no plano horizontal, sendo necessário o cálculo da distância real utilizando a trigonometria plana. Mesmo sendo necessária esta transformação os resultados são satisfatórios.

Dados brutos do monitoramento da UHE Salto Caxias também foram processados utilizando as duas metodologias. O teste estatístico aplicado aos resultados do monitoramento, quando comparados os modelos matemáticos na campanha de novembro, todas as distâncias são estatisticamente iguais. Na campanha de julho comparando-se os resultados pelos modelos matemáticos, dos dezesseis pontos, sete estão no mesmo plano horizontal e todos são estatisticamente iguais.

Quando comparadas as campanhas de monitoramento da barragem de novembro com a campanha de julho, nos resultados obtidos pela modelagem da distância Euclidiana e Lei dos Cossenos, em todos os pontos testados são iguais estatisticamente.

De uma forma geral, nos experimentos realizados no Centro Politécnico, os resultados obtidos mostraram igualdade estatística para o cálculo da distância pela Lei dos Cossenos e distância Euclidiana, independentemente do equipamento utilizado e das posições dos alvos. Estes resultados mostraram que as duas modelagens podem ser aplicadas na determinação de distâncias entre alvos de monitoramento.

Alisando as duas campanhas, a maior média da diferença entre as distâncias calculadas pelos dois métodos abordados nesta pesquisa foi de 2mm. Desta forma, pode-se concluir que, assim como nos experimentos realizados no centro politécnico, os resultados obtidos com os dados da barragem também mostram que a Lei dos Cossenos pode ser usada para monitoramento de grandes estruturas assim como a distância Euclidiana, já amplamente utilizada.

Para todos os experimentos realizados no Centro Politécnico, com pontos no mesmo plano horizontal, o teste estatístico *t Student* confirmou a igualdade das distâncias calculadas. Para planos horizontais diferentes, apenas os valores de distância recuperadas tiveram a igualdade estatística.

Os valores de distâncias mais próximos do valor de referência foram obtidos com o uso da Estação Total TS15, para ambas as modelagens, mas foram melhores para a Lei dos Cossenos.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Para estudos futuros recomenda-se a aplicação dos modelos matemáticos estudados com uma quantidade maior de observações visando melhorar a precisão das distâncias através abundância de dados, considerando que neste trabalho já foi possível verificar uma melhoria significativa nas precisões de acordo com o aumento do número de observações.

Recomenda-se também que sejam analisados dados de campanhas realizadas na mesma época do ano, buscando as mesmas condições climáticas, minimizando assim a influência desta variável.

E por último, que sejam utilizados dados de mais de duas campanhas de monitoramento da barragem e/ou de monitoramento de outras estruturas buscando uma confiabilidade maior dos modelos.

REFERÊNCIAS

ALENCAR FILHO, E. **Curso de Trigonometria Plana**. São Paulo. 9ª Ed. Nobel S.A, 1969.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13133: Execução de levantamento topográfico**. Rio de Janeiro, 1994. 35p.

ANDRIANOVA, S. D. **High-accuracy geodetic monitoring during construction and occupancy of modern buildings**. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Volume 45. Number 2, p. 66-70. Springer New York, 2008.

ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. S.L do Sul-RS. Editora UNISINOS. 2003.

ARAÚJO, A.I.P; **Geodésia aplicada aos estudos de verticalização de edifício predial de grande porte**; V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE, 12- 14 de Nov de 2014.

BREED, C. B.; HOSMER, G, L.; BONE A, J. **The Principles And Practice Of Surveying**. 614 p., 2012.

CONSTANTINO, D. ANGELINI, M. **Geodetic monitoring applied to a mine arean**. *Applied Geomatics*. Volume 3. Number 2, p. 61-74. Springer Berlin / Heidelberg. 2011.

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

COPEL - Companhia Paranaense de Energia. **Geração**. 2016. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F044b34faa7cc1143032570bd0059aa29%2F9bdc37f6b8c44b810325741200587db7>. Acesso em: 30 Ago. 2017.

DA CRUZ, W. **Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas: estudo de caso: UHE Mauá**. Tese de Doutorado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2015.

DALMOLIN, Q. **Ajustamento por Mínimos Quadrados**. CPGCG - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR. Curitiba: Editora UFPR, 2004.

DEPARTMENT OF THE ARMY – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS.

Manual 1110-1-1004 Deformation Monitoring and Control Surveying.
Washington, DC, 2002.

DOUBECK, A. **Topografia.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1989.

ESPARTEL, L. **Curso de Topografia.** 9 ed. Rio de Janeiro, Globo, 1987.

ESTEIO. **Produtos acadêmicos.**
<<http://www.esteio.com.br/download/produtos-academicos/>> Acesso em: 15 abr 2018.

FAGGION, L, P.; VEIGA, A, K.; SILVA, L, F.; HENRIQUE, T.; SILVIO, D, A. **Estudo da aplicação de estações totais para a determinação de deslocamentos relativos em laboratório.** Boletim de Ciências Geodésicas. ISSN: 1982-2170, sec. Artigos, Curitiba, v. 19, n° 1, 2013.

FAZAN, J. A. **Aplicação do teste de congruência global e análise geométrica para detecção de deslocamentos em redes geodésicas: estudo de caso na UHE de Itaipu.** Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2010.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas.** Curitiba: Ed. UFPR, 2004.

GEMAEL, C; MACHADO, L, M, A; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas.** Curitiba: Editora da UFPR, 2015.

GEMIN, S. A. R. **Desenvolvimento de um sistema de calibração horizontal para sistemas de nivelamento digitais.** Tese de Doutorado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2017.

GHILANI, C.D.; WOLF.P.R. **Elementary surveying: an introduction to geomatics.** 13^a ed., 2012.

GOOGLE. **Google Earth.** 2017. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/download/ge/agree.html>>. Acesso em: 28 mai. 2018.

GOMES, J. P. **Determinação de desníveis de precisão utilizando Estação Total.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2006.

GRANEMANN, D. **Estabelecimento de uma Rede Geodésica para o Monitoramento de estruturas: estudo de caso na Usina Hidrelétrica Salto Caxias.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

GRAÇA, N.L.S.S. **Validação da determinação de deslocamentos relativos em obras de engenharia obtidos com técnica geodésica e medidores**

triorragonais de junta. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2014.

HAMILTON, W. C. **Statistics in Physical Science.** Ronald Press, New York, 1964.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Resolução - PR nº 22.** 1983. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/bservico1602.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2018.

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

KAHMEN, H., FAIG, W. S. **Surveying.** Berlim; New York: Walter de Gruyter, 1994.

KUANG, S. **Geodetic network analysis and optimal design: concepts and applications.** Michigan: Ann Arbor Press, Inc, 1996.

LEICA. **Leica TSPS1200+ User Manual.** Version 9.1.0. Leica Geosystems AG. Heerbrugg, Switzerland. 2017.

LEICA. **Leica TS15 User Manual.** Version 6.0. Leica Geosystems AG. Heerbrugg, Switzerland. 2015.

LENARTOVICZ, I, R. **Avaliação da potencialidade do laser scanner terrestre no monitoramento de estruturas** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2016.

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 de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

MEZINE, W. A. **Avaliação de métodos de redução de sondagens batimétricas ao nível d'água instantâneo para monitoramento de assoreamento: estudo de caso do reservatório da usina hidrelétrica Mauá.** Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2015.

MELO, W. D. A.; SOUZA, A. N. e DA SILVA, D. C. 2012. **Utilização do programa adjust em ajustamento de triangulações e trilaterações.** Anais: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife – PE.

MIKHAIL, E.; ACKERMAN, F. **Observations and Least Squares**. University Press of America, 1976.497 p.

MONICO, J. F. G. **Ajustamento e análise estatística de observações aplicados na detecção de deformações**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1988.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento Por Ponto de Alta Precisão Utilizando o GPS: Uma Solução Para a Geodinâmica**. BrazilianJournalofGeophysics, vol. 18(1), 2000.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Unesp, 473p., 2008.

MUGUIO, M. R. **Avaliação da variação da densidade do concreto compactado com rolo (CCR) com base nas anomalias da gravidade: estudo de caso: Barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá**. Tese de Doutorado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2018.

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

NADAL, M. A. D. **Controle E Operação De Estações Totais Robotizadas Voltado À Auscultação Geodésica**. Tese (Mestrado em Ciências Geodésicas). Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2008.

NEVES, R. V. **Processamento e análise de Levantamentos Geodésicos aplicado ao monitoramento de estruturas civis**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

OGUNDARE, J. O., **Precision Surveying: The Principles and Geomatics Practice**. 1 Ed. Wiley. 604 p. Hoboken, New Jersey. 2015.

PEREIRA, A. R. A.; SILVA, T. F.; **Monitoramento geodésico de uma encosta em processo de deslizamento de terra**; IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE, 06 - 09 de Maio de 2012 p. 001 – 009

RIBEIRO, F. C. D. **Proposta de metodologia para verificação da estabilidade dos pilares de redes para o monitoramento geodésico de barragens: estudo de caso**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 2008

REZENDE, Q. F. **Geometria Euclidiana Plana e Construções Geométricas**. 2ª.ed., Campinas-SP: Editora: UNICAMPI, 2008.

SÁ, N, C, de. **Elementos de geodésia**. Departamento de Geofísica Instituto de astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas Universidade de São Paulo. 1994. Disponível em: <http://www.georeferencial.com.br/old/material_didatico/Apostila_Geodesia_Nel_si_Sa_USP.pdf>. Acesso em: 11 nov 2016.

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

SANTOS, M. C. **Emprego do GPS no monitoramento de deformações estruturais**. Revista MundoGEO online: Coluna. São Paulo. 2000. Disponível em: <http://mundogeo.com/blog/2000/12/01/emprego-do-gps-no-monitoramento-de-deformacoes-estruturais/>. Acesso em: 01 Nov 2017.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. 2nd.ed., Berlin, New-York: Walter de Gruyter, 2003.

SEGANTINE, P. C. **GPS: sistema de posicionamento global**. São Carlos: EESC/USP, 2005.

SILVA, I. DA; SEGANTINE, P. C. L. **Topografia Para Engenharia: Teoria e Prática de Geomática**. 1. ed. Elsevier, 2015.

SILVA. M.L; SANTOS. W; XAVAIER. A; SEIXAS.A; **Uma abordagem metodológica para o monitoramento de estruturas de construção civil com emprego de estação total**; V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE, 12- 14 de Nov de 2014.

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

SILVA, R. N. F. **Avaliação da técnica de Nivelamento Trigonométrico, técnica Leap-Frog, na determinação de recalque em grandes estruturas: estudo de caso para a UHE Mauá**. Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012.

SHIBAYAMA, E. M.; VEIGA, L. A. K. **Automação do processo de coleta e verificação de dados obtidos com estações totais**; Bol. Ciênc. Geod., sec. Resumos, Curitiba, v. 14, no 3, p.441-442, jul-set, 2008.

SOARES, A. S.; FERREIRA, E. S.; DAHER, C. R.; REIS, M.M. **Análise das vazões de Infiltrações nas fissuras da barragem de CCR da UHE Governador José Richa – GJR**. In: II Simpósio Internacional de Barragens de Enrocamento. 2011. Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS, 2011.

SUCI, F. M.; FAGGION, P. L. **Análise da estabilidade da rede geodésica de monitoramento da UHE Salto Caxias a partir de dados gps**. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 18, no 4, 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 de Doutorado – Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

TRIOLA, M,F. **Estadística**. Mexico, Pearson Educación, 904 p. Décima edición. 2009.

VANÍČEK, P.; KRAKIWSKY, E. J. **Geodesy: The Concepts**. 2 ed. North HollandPublishing, 1986.

VEIGA, L. A. K.; ZANETTI, M. A. Z.; FAGGION, P. L. **Fundamentos de topografia**. UFPR, Curitiba – PR (apostila), 2012. Disponível em: <http://www.cartografica.ufpr.br/docs/topo2/apos_topo.pdf.> Acesso em: 28 out 2017.

VEIGA, L. A. K. **Desenho Técnico**. Curitiba – PR, 2018.

WOLF, P. R. **Adjustment computations: pratical least squares for surveyors**. 2.ed. Wisconsin: PBL, 1980.

WOLF, P.R; GHILANI, C. D. **Adjustmente computations: statistics and least squares in surveying and GIS**. 3ed. New York: John Wiley&Sons .1997.

YIGIT, C. O; ALCAY, S; CEYLAN, A .**Displacement response of a concrete arch dam to seasonal temperature fluctuations and reservoir level rise during the first filling period: evidence from geodetic data**. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016 Vol. 7, No. 4, 1489_1505, <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2015.1047902>

ZANETTI, M. A. Z. **Implicações Atuais no Relacionamento entre Sistemas Terrestres de Referência de Origem Local e Geocêntrica**. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba 2006.

ZOCOLOTTI FILHO, C. A. **Utilização de técnicas de poligonação de precisão para o monitoramento de pontos localizados em galerias de inspeção: estudo de caso da U. H. de Salto Caxias**. Dissertação de Mestrado – Curso de

Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2005.

ZUMBERGE, J. F.; HEFLIN, M. B.; JEFFERSON, D. C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. **Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks**. *Journal of Geophysical Research*, v.102 (B3), doi:10.1029/96JB03860, p.5005–5017. 1997.

REFERÊNCIAS CONSULTADAS

UFPR. **Normas para apresentação de documentos científicos**.2. Ed. Editora UFPR: Curitiba, 2007.