
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**

WELISSON JOSÉ DOS SANTOS

**SISTEMAS DE MEDIÇÃO GEODÉSICA E DETECÇÃO DE MOVIMENTOS 3D EM
TERRENOS INCLINADOS SUSCEPTÍVEIS A RECALQUES E DESLIZAMENTOS**



Recife

2020

WELISSON JOSÉ DOS SANTOS

**SISTEMAS DE MEDIÇÃO GEODÉSICA E DETECÇÃO DE MOVIMENTOS 3D EM
TERRENOS INCLINADOS SUSCEPTÍVEIS A RECALQUES E DESLIZAMENTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Área de Concentração: Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Andréa de Seixas.

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- S237s Santos, Welisson José dos.
Sistemas de medição geodésica e detecção de movimentos 3D em terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos / Welisson José dos Santos. - 2020.
215 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientadora: Profa. Dra. Andréa de Seixas.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2020.
Inclui Referências, Apêndices e Anexo.
1. Engenharia Cartográfica. 2. Sistemas de medição geodésica. 3. Rede geodésica. 4. Sistema geodésico local. 5. Levantamentos geodésicos. 6. Medição de recalques e deslizamentos. I. Seixas, Andréa de (Orientadora). II. Título
- UFPE
- 526.1 CDD (22. ed.) BCTG/2020-164

WELISSON JOSÉ DOS SANTOS

**SISTEMAS DE MEDIÇÃO GEODÉSICA E DETECÇÃO DE MOVIMENTOS 3D EM
TERRENOS INCLINADOS SUSCEPTÍVEIS A RECALQUES E DESLIZAMENTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, do departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Aprovada em: 18/02/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Andréa de Seixas (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Sylvana Melo dos Santos (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

A Deus

A meus pais Wanderley Santos (*in memoriam*) e Maria P. Santos

Ao meu irmão (Wandeson Santos).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar presente em todos os momentos da minha vida proporcionando saúde, conhecimento, sensatez e discernimento, para que eu pudesse tomar as decisões que me fizeram chegar até aqui. Tenho plena consciência de que devo a Deus tudo o que conquistei até aqui e tudo que ainda conquistarei.

Aos meus pais Wanderley José dos Santos (*in memoriam*) e Maria José Pereira dos Santos, pois a eles devo tudo o que sou. Obrigado pelos valores, ensinamentos e conhecimentos que vocês me passaram e que levarei comigo por toda minha vida e obrigado por vocês acreditarem que a educação é o melhor caminho a ser seguido.

Ao meu irmão Wandeson Santos, por seu apoio, conselhos, parceria e amizade.

A minha orientadora, Prof.^a Dr. Techn. Andréa de Seixas por sua amizade, confiança e presença em todas as etapas de desenvolvimento desta dissertação, contribuindo com orientações, sugestões, dedicação e ideias que enriqueceram esta pesquisa de mestrado.

Ao Prof. Dr. Silvio Jacks dos Anjos Garnés por suas orientações, sugestões e contribuições ao longo do desenvolvimento desta dissertação e pela disponibilização do software AstGeoTop, de sua autoria, utilizado na fase de processamento de dados desta dissertação.

À Prof.^a Dr. Sc Sylvana Melo dos Santos por suas orientações, contribuições e sugestões ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Aos projetos de Pesquisa: Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis – LITPEG/CTG/UFPE – PROPESQ/UFPE, processos número 23076.040512/2015-15 e número 23076.016133/2018-57; Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinação, processo número 23076.16133/2018-57; A Geodésia Aplicada à Discretização de Edificações Prediais e o Estabelecimento de Padrões de Referência Metrológica PROPESQ/UFPE, processo número 23076.011861/2017-91.

Ao Prof.º MSc. Michael Antão, professor do curso de Edificações do Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) *Campus* Caruaru, pela sua gentileza em nos disponibilizar uma estação total robótica pertencente ao *campus* Caruaru do IFPE, para a realização de experimentos em campo.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação e do Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco, que ao longo de minha vida acadêmica me proporcionaram a oportunidade de adquirir conhecimentos que levarei ao longo de minha vida profissional.

A Eólica Tecnologia Ltda., em especial ao MSc. Eduardo Moura e a Rednilton Melo por permitirem a realização dos experimentos de campo nas dependências da empresa e Parque Eólico e por não pouparem esforços para que tudo ocorresse conforme planejado, sempre que possível proporcionando suporte e apoio técnico.

Aos amigos Priscilla Heliênay, Luiz Canto, Leonardo Barbosa e Raphael Seixas, meu profundo agradecimento, pela disponibilidade e paciência que vocês tiveram para me apoiar durante a realização dos levantamentos de campo desta dissertação.

A Elizabeth Galdino da secretaria do Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação, por sua dedicação, atenção e disponibilidade sempre que precisei resolver problemas burocráticos relacionados ao a Pós-Graduação.

À CAPES e ao Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo apresentar uma metodologia para detectar e analisar a ocorrência de movimentos 3D em terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos, a partir da utilização de sistemas de medição geodésica. Os experimentos foram realizados no *Campus Recife* da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e nas dependências da Eólica Tecnologia Ltda., localizada no Município de Gravatá-PE. No *Campus Recife* aplicou-se testes no nível digital Leica DNA 03 através do método de Kukkamäki e do método completo da norma ISO 17123-2 (ISO, 2001). Nas imediações das torres eólicas Gravatá 1, 2 e 3 do parque eólico Gravatá, deu-se continuidade as pesquisas relacionadas ao monitoramento de estruturas geodésicas em torres eólicas, acrescentando-se ao estudo terrenos inclinados e rochosos localizados entre as torres eólicas Gravatá 1 e 2. A Rede Geodésica Altimétrica Local foi ampliada. A área de estudo contava com os pinos RN04, RN05 e RN06 (Gravatá 01) e RN01, RN02 e RN03 (Gravatá 02). Nesta dissertação os vértices LP7, LP8, PO08, PO01, PO02 e PO07 passaram a integrar a rede, estando estes quatro últimos PO fixados em afloramentos rochosos próximos a torre eólica Gravatá 1. O monitoramento da rede altimétrica ocorreu em quatro épocas distintas, aplicando-se o nivelamento geométrico de altíssima precisão, tendo as duas últimas ocorrido nesta dissertação. Ao todo o intervalo decorrido foi de 536 dias. As cotas altimétricas foram ajustadas via modelo paramétrico do MMQ, aplicando-se testes de qualidade da distribuição Qui-Quadrada. Além disso, a rede geodésica de referência planialtimétrica também foi ampliada, nesta dissertação, para o estudo de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos. A densificação desta ocorreu a partir da materialização dos marcos geodésicos LP7, LP8, LP9 e LP10 determinados a partir dos métodos da interseção a ré, triangulação e nivelamento trigonométrico com correções dos efeitos da curvatura terrestre e da refração atmosférica e reduções de distâncias inclinadas ao plano do equipamento nos respectivos vértices de observação. Tais vértices tiveram suas coordenadas planimétricas ajustadas via modelo paramétrico do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). O vértice LP9 determinado a partir da interseção a ré apresentou desvios padrão planimétricos de $\pm 0,015$ m. Os vértices LP7, LP8 e LP10 determinados a partir da triangulação apresentaram desvios

padrão mínimos em X de $\pm 0,007$ m para o vértice LP7 e máximos em Y de $\pm 0,03$ m para o vértice LP10. As máximas correções advindas da curvatura e da refração terrestre foram de + 0,069 m e - 0,009 m para a cota altimétrica de LP10. O terreno inclinado analisado está localizado nas imediações da torre Gravatá 01, sua caracterização foi realizada a partir da implantação de oito pontos-objeto, denominados sequencialmente PO01 a PO08 com coordenadas planimétricas e altimétricas determinadas a partir da interseção a vante e da irradiação 3D. Para as coordenadas planimétricas destes pontos, obteve-se a partir da interseção a vante, desvios padrão mínimos em X e Y, respectivamente, de $\pm 0,028$ m e $\pm 0,01$ m para o vértice PO02, e máximos em X e Y, respectivamente, de $\pm 0,028$ m e $\pm 0,013$ m para o vértice PO07.

Palavras-Chave: Sistemas de medição geodésica. Rede geodésica. Sistema geodésico local. Levantamentos geodésicos. Medição de recalques e deslizamentos.

ABSTRACT

This dissertation aims to present a methodology to detect and analyze the occurrence of 3D movements in inclined terrains susceptible to settlements and landslides, using geodetic measurement systems. The experiments were carried out at the Recife Campus of the Federal University of Pernambuco (UFPE) and at the facilities of Eólica Tecnologia Ltda., Located in the city of Gravatá-PE. At Campus Recife, tests were applied at the Leica DNA 03 digital level using the Kukkamäki method and the complete method of the ISO 17123-2 standard (ISO, 2001). In the vicinity of the Gravatá wind towers 1, 2 and 3 of the Gravatá wind farm, researches related to the monitoring of geodesic structures in wind towers was continued, adding to the study sloping and rocky terrains located between the Gravatá 1 and 2 wind towers. The Local Altimetric Geodetic Network has been expanded. The study area had the pins RN04, RN05 and RN06 (Gravatá 01) and RN01, RN02 and RN03 (Gravatá 02). In this dissertation, the vertices LP7, LP8, PO08, PO01, PO02 and PO07 became part of the network, and these last four, being fixed in rocky outcrops near the Gravatá 1 wind tower. The monitoring of altimetric network occurred in four different epochs applying the geometric leveling of very high precision, the last two having occurred in this dissertation. In all, the elapsed interval was 536 days. The altimetric dimensions were adjusted via the parametric model of the MMQ, applying quality tests of the Chi-Square distribution. In addition, the geodetic network of planialtimetric reference was expanded, in this dissertation, for the study of inclined lands susceptible to settlements and landslides. The densification occurred from the materialization of the geodesic landmarks LP7, LP8, LP9 and LP10 determined from the methods of resection, triangulation and trigonometric leveling with corrections of the effects of terrestrial curvature and atmospheric refraction and reductions of distances inclined to the plane equipment at the respective observation points. Such vertices had their planimetric coordinates adjusted using the Least Squares Method (LSM) parametric model. The LP9 vertex determined from the resection showed planimetric standard deviations of ± 0.015 m. The LP7, LP8 and LP10 vertices determined from the triangulation showed minimum X standard deviations of ± 0.007 m for the LP7 vertex and maximum Y deviations of ± 0.03 m for the LP10 vertex. The maximum corrections resulting from curvature and terrestrial refraction were +0.069

m and -0.009 m for the altimetric dimension of LP10. The slope terrain analyzed is located in the vicinity of the Gravatá 01 tower, its characterization was carried out from the implantation of eight object points, sequentially named PO01 to PO08 with planimetric and altimetric coordinates determined from the intersection and 3D irradiation. For the planimetric coordinates of these points obtained from the intersection, the minimum standard deviations in X and Y, were respectively, of ± 0.028 m and ± 0.01 m for the vertex PO02, and maximum of ± 0.028 m and ± 0.013 m, respectively in X and Y, for the PO07 vertex.

Keywords: Geodetic measurement systems. Geodesic network. Local geodetic network. Geodetic Surveys. Measurement of settlements and landslides.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Deslizamento rotacional idealizado.	34
Quadro 1 -	Tipos de movimentos de massa e suas características.....	35
Figura 2 -	Quedas.	35
Figura 3 -	Tombamento.....	35
Figura 4 -	Escorregamento Translacional.	35
Figura 5 -	Espalhamento Lateral.	35
Figura 6 -	Corrida/ Escoamento.	35
Quadro 2 -	Classificações dos Movimentos em Função da Velocidade Varnés (1978) /IUGS (1995).	36
Figura 7 -	Torres Eólicas do Tipo Onshore.	37
Figura 8 -	Sistema de Monitoramento de Encostas do Cemaden (2019).....	40
Figura 9 -	Sistema de Referência de Medição a Partir de Pontos de Referência	44
Figura 10 -	Objeto em Deformação Definido por um Campo de Pontos- Objeto.	45
Figura 11 -	Transformação de similaridade entre coordenadas.....	47
Figura 12 -	Transformação de similaridade de quatro parâmetros.	49
Figura 13 -	Interseção a vante.	50
Figura 14 -	Método da Triangulateração	52
Figura 15 -	Método da irradiação tridimensional.	53
Figura 16 -	Nivelamento geométrico simples.	54
Figura 17 -	Nivelamento geométrico.	55
Figura 18 -	Nivelamento Trigonométrico.	57
Figura 19 -	Efeito da curvatura e da refração no nivelamento trigonométrico... ..	60
Quadro 3 -	Classificação dos Níveis.....	62
Quadro 4 -	Classificação dos níveis conforme ISO 17123-2.	62
Figura 20 -	Método de Kukkämäki.	63
Quadro 5 -	Controle de Qualidade de Estruturas Geodésicas.....	70
Figura 21 -	Base de Verificação e Retificação de Níveis no <i>Campus</i> Recife da UFPE.	74

Figura 22 - Verificação de estações totais no hall jardim NIATE/CCEN/CTG.	74
Figura 23 - Visualização geral da área de estudo 2.....	76
Figura 24 - Estrutura geodésica de referência planialtimétrica.	78
Figura 25 - Acessórios de campo.	80
Figura 26 - Metodologia adotada durante a execução da dissertação.....	81
Figura 27 - Resultados módulo verificar e ajustar do nível digital Leica DNA- 03.....	84
Figura 28 - Resultados módulo verificar e ajustar do nível digital Leica DNA- 03.....	85
Figura 29 - Aplicação do método de Kukkamäki.....	85
Figura 30 - Verificação de limbos horizontais e verticais de estações totais.....	87
Figura 31 - Esboço das linhas de nivelamento/contranivelamento 1ª e 2ª campanhas de medições.....	89
Figura 32 - Esboço das linhas de nivelamento/contranivelamento 3ªcampanha de medições.	90
Figura 33 - Esboço das linhas de nivelamento/contranivelamento 4ªcampanha de medições	91
Figura 34 - Aplicação do método de nivelamento geométrico.	92
Figura 35 - Materialização de pontos de referência na área de estudo 2.	94
Figura 36 - Estrutura geodésica de referência implantada.....	95
Figura 37 - Campanha de reconhecimento de campo.	96
Figura 38 - Delimitação superfície rochosa área de estudo 2.....	97
Figura 39 - Procedimento de campo (método da triangulateração).	99
Figura 40 - Rede de triangulateração observada.....	100
Figura 41 - Implantação de pontos-objeto.	102
Figura 42 - Fixação de pontos-objeto na área de estudo 2.	102
Figura 43 - Aplicação do método de nivelamento geométrico de altíssima precisão.	103
Figura 44 - Bases de monitoramento implantadas na área de estudo 2.....	106
Figura 45 - Prismas posicionados sobre pontos-objeto durante aplicação do método da irradiação 3D.	107
Figura 46 - Aplicativo de processamento.....	109

Figura 47 - Tela inicial do aplicativo de processamento.....	109
Figura 48 - Resíduos em torno dos 20 primeiros desníveis observados.....	115
Figura 49 - Resíduos em torno dos 20 últimos desníveis observados.....	117
Figura 50 - Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 1ª e 2ª campanhas de levantamento.....	147
Figura 51 - Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 3ª e 4ª campanhas de levantamento considerando-se RN02 com cota fixa.....	149
Figura 52 - Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 3ª e 4ª campanhas de levantamento considerando-se LP8 com cota fixa.....	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correção da Curvatura Terrestre para Distâncias de 100 m – 10 km.....	58
Tabela 2 - Pontos de referência planimétrica pré-existentes na área de estudo 2.....	77
Tabela 3 - Coordenadas geodésicas em SIRGAS2000 do vértice L1, origem do SGL.	77
Tabela 4 - Circuitos e linhas de nivelamento/contranivelamento adotadas durante a execução das 4 séries de observações realizadas entre os pinos das torres Gravatá 01 e Gravatá 02.....	92
Tabela 5 - Rede de observações coletadas a partir dos vértices de referência.....	98
Tabela 6 - Método de Kukkamäki aplicado em 11/02/2019.....	111
Tabela 7 - Dados observados após 1ª retificação do nível digital Leica DNA 03 realizada em 11/02/2019.....	111
Tabela 8 - 2ª aplicação do método de Kukkamäki em 11/02/2019.....	111
Tabela 9 - Dados Observados Após 1ª Retificação do Nível Digital Leica DNA 03 Realizada em 11/02/2019.	112
Tabela 10 - Método de Kukkamäki aplicado em 08/10/2019.	113
Tabela 11 - Dados Observados Após 1ª Retificação do Nível Digital Leica DNA 03 realizada em 08/10/2019.....	113
Tabela 12 - 2ª Aplicação do método de Kukkamäki em 08/10/2019.....	113
Tabela 13 - Dados observados após 2ª retificação do nível digital Leica DNA 03 realizada em 08/10/2019.....	114
Tabela 14 - Teste completo ISO 17123-2 (ISO, 2001) das 20 primeiras leituras.....	114
Tabela 15 - Teste completo ISO 17123-2 (ISO, 2001) das 20 últimas leituras.....	116
Tabela 16 - Resultados obtidos com a aplicação da ISO 17123-2.....	118
Tabela 17 - Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito I.	120
Tabela 18 - Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento	120

	do circuito III.	
Tabela 19 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito V.	120
Tabela 20 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito I.	121
Tabela 21 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito III.	121
Tabela 22 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito V.	121
Tabela 23 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito I.	122
Tabela 24 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito III.	122
Tabela 25 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito V.	122
Tabela 26 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito I.	122
Tabela 27 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito III.	123
Tabela 28 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito V.	123
Tabela 29 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito I.	123
Tabela 30 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito II.	124
Tabela 31 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito III.	124
Tabela 32 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito IV.	124
Tabela 33 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito V.	124
Tabela 34 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito VI.	124

Tabela 35 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito I.	124
Tabela 36 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito II.	124
Tabela 37 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito III.	125
Tabela 38 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito IV.	125
Tabela 39 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito V.	125
Tabela 40 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito VI.	125
Tabela 41 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito I.	126
Tabela 42 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito II.	126
Tabela 43 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito III.	126
Tabela 44 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito IV.	126
Tabela 45 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito V.	126
Tabela 46 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito VI.	126
Tabela 47 -	Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito VII.	126
Tabela 48 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito I.	127
Tabela 49 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito II.	127
Tabela 50 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito III.	127
Tabela 51 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento	127

	geométrico de altíssima precisão no circuito IV.....	
Tabela 52 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito V.....	127
Tabela 53 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito VI.....	127
Tabela 54 -	Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, III e V (1ª campanha de medições).	130
Tabela 55 -	Cotas altimétricas ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 01.	131
Tabela 56 -	Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, III e V (2ª campanha de medições).	131
Tabela 57 -	Cotas altimétrica ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 02.	131
Tabela 58 -	Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, II, III, IV e V (3ª campanha de medições).	134
Tabela 59 -	Cotas altimétricas ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 03.	135
Tabela 60 -	Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, II, III, IV e V (4ª Campanha de Medições).....	136
Tabela 61 -	Cotas altimétricas ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 04.	136
Tabela 62 -	Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, II, III, IV, V e VI (3ª Campanha De Medições).	137
Tabela 63 -	Cotas altimétricas ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 03, tomando LP8 como ponto de referência superficial.....	138
Tabela 64 -	Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, II, III, IV, V e VI	139

	(4ª Campanha de Medições).....	
Tabela 65 -	Cotas altimétricas ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 04, tomando LP8 como ponto de referência superficial.....	139
Tabela 66 -	Circuitos e linhas de nivelamento/contranivelamento adotadas considerando-se PO08 como referência altimétrica.	141
Tabela 67 -	Desnível bruto obtido com o Nivelamento e Contranivelamento do Circuito VII.	141
Tabela 68 -	Desnível bruto obtido com o Nivelamento e Contranivelamento do Circuito VIII.	142
Tabela 69 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito VII.....	142
Tabela 70 -	Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito VIII.....	142
Tabela 71 -	Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, II, III, IV, V, VI, VII e VIII.....	144
Tabela 72 -	Desníveis ajustados e desvios padrão nivelamento/contranivelamento via AstGeoTop.	145
Tabela 73 -	Cotas altimétricas ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento.	145
Tabela 74 -	Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 1ª e 2ª campanhas de levantamento.....	146
Tabela 75 -	Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 3ª e 4ª campanhas de levantamento considerando-se RN02 com cota fixa.	148
Tabela 76 -	Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 3ª e 4ª campanhas de levantamento considerando-se LP8 com cota fixa.	150
Tabela 77 -	Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 1ª, 2ª, 3ª e 4ª campanha de levantamento considerando-se PO08 como referência absoluta.	151
Tabela 78 -	Resultados advindos da aplicação da irradiação 3D na área de	154

	estudo 2.....	
Tabela 79 -	Coordenadas planimétricas no SGL SIRGAS2000 do vértice LP9.....	155
Tabela 80 -	Valores observados, resíduos, observações ajustadas e desvio padrão das observações ajustadas, obtidas via ajustamento por MMQ de uma rede 2D de triangulateração.....	156
Tabela 81 -	coordenadas planimétricas e precisões posicionais dos vértices LP7, LP8 e LP10	157
Tabela 82 -	Resultados Nivelamento Trigonométrico Utilizando Estação Total Topcon GPT 3200-N.....	158
Tabela 83 -	Cotas altimétricas de referência obtidas via nivelamento geométrico.....	159
Tabela 84 -	Cotas altimétricas obtidas via nivelamento trigonométrico.	159
Tabela 85 -	Nivelamento geométrico de altíssima precisão (pontos-objeto posicionados sobre superfície rochosa).	160
Tabela 86 -	Cotas altimétricas dos pontos-objeto obtidas via nivelamento geométrico.....	160
Tabela 87 -	Coordenadas planimétricas obtidas via método da interseção a vante a partir da base LP9-LP10.	161
Tabela 88 -	Coordenadas planimétricas obtidas via método da interseção a vante a partir da base LP9-L3.	161
Tabela 89 -	Coordenadas planimétricas dos pontos-objeto posicionados sobre a superfície rochosa utilizando base LP9-LP10.....	162
Tabela 90 -	Coordenadas planimétricas dos pontos-objeto posicionados sobre a superfície rochosa utilizando base LP9-L3.	162
Tabela 91 -	Resultados Irradiação 3D a partir de L3.	163

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCEN	Centro de Ciências Exatas e da Natureza
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
ETR	Estação Total Robotizada
GNSS	Global Naviggate Satellite System
GPS	Global Positioning System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	International Organization for Standardization
IUGS	<i>International Union of Geological Sciences</i>
LAMEP	Laboratório de Metrologia e Posicionamento Espacial
<i>LiDAR</i>	<i>Light detection and ranging</i>
LITPEG	Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
NBR	Norma Brasileira de Regulamentação
NIATE	Núcleo Integrado de Atividades de Ensino
ONU	Organização das Nações Unidas
PD	Posição Direta
PI	Posição Inversa
PO	Ponto-Objeto
PROPESQ	Pró-Reitoria para Assuntos de Pesquisa e Pós-Graduação
RN	Referência de Nível
<i>RTK-NTRIP</i>	<i>Real Time Kinematic - Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SGL	Sistema Geodésico Local
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SRM	Sistema de Referência de Medição
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
USGS	<i>U.S. Geological Survey</i>
WP/WLI	<i>Working Party for Landslide Inventory</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

χ^2	Teste do Qui-Quadrado
σ_x	Desvio padrão em X
σ_y	Desvio padrão em Y
σ_{xy}	Desvio padrão posicional em X e Y
δR_0	Correção do efeito da curvatura
δK_0	Correção do efeito da refração
$\Delta H'$	Componente trigonométrica
ΔH	Desnível

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	29
1.1	OBJETIVOS.....	31
1.1.1	Objetivo Geral	31
1.1.2	Objetivos Específicos.....	31
1.2	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	31
2	TERRENOS INCLINADOS SUSCEPTÍVEIS A RECALQUES E DESLIZAMENTOS	33
2.1	MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA.....	33
2.1.1	Tipos de Movimento de Massa	34
2.2	RECALQUES DE FUNDAÇÕES.....	36
2.3	MONITORAMENTO DE TERRENOS INCLINADOS SUSCEPTÍVEIS A RECALQUES E DESLIZAMENTOS – ESTADO DA ARTE.....	38
3	ESTRUTURAS GEODÉSICAS E MÉTODOS GEODÉSICOS/TOPOGRÁFICOS DE DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS ALTIMÉTRICAS, PLANIMÉTRICAS, PLANIALTIMÉTRICAS E TRIDIMENSIONAIS	42
3.1	DEFORMAÇÕES ESTRUTURAIS.....	43
3.2	DEFINIÇÃO DE PONTOS DE REFERÊNCIA E PONTOS- OBJETO.....	43
3.3	MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS.....	46
3.3.1	Interseção a ré.....	46
3.3.1.1	Interseção a ré por meio de medições combinadas de direções e distâncias	47
3.3.2	Interseção a Vante	50
3.3.3	Triangulateração	51
3.3.4	Irradiação Tridimensional – 3D.....	52
3.3.5	Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão.....	53
3.3.6	Nivelamento Trigonométrico com Correções dos Efeitos da	57

	Curvatura Terrestre e da Refração Atmosférica	
3.3.7	Verificação e Ajuste de Equipamentos Topográficos.....	61
3.3.7.1	Verificação e Ajuste de Níveis de Luneta.....	62
3.3.7.2	ISO 17123 – 2: 2001	63
3.3.7.3	Método de Kukkamäki.....	63
4	AJUSTAMENTO DAS OBSERVAÇÕES E CONTROLE DE	
	QUALIDADE DAS ESTRUTURAS GEODÉSICAS	66
4.1	MMQ - MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS	66
4.1.2	MMQ – Modelo Paramétrico	66
4.1.2.1	Equações de Observação.....	67
4.1.2.2	Equações Normais.....	68
4.2	Controle de Qualidade de uma Estrutura Geodésica.....	69
4.2.1	Teste de Hipóteses Baseado na Distribuição Qui-Quadrada -	
	χ^2.....	71
5	EXPERIMENTOS E ANÁLISES METODOLÓGICAS	73
5.1	ÁREA DE ESTUDO	73
5.1.1	Área de Estudo 1 – <i>Campus Recife da Universidade Federal</i>	
	de Pernambuco	73
5.1.2	Área de estudo 2 - Parque Eólico Gravatá-PE Ltda	75
5.2	MATERIAIS.....	79
5.3	MÉTODOS.....	80
5.4	Verificação e AJUSTE de equipamentos geodésicos /	
	topográficos	83
5.4.1	Experimentos e Análises Metodológicas a partir do Uso de	
	Nível Digital	83
5.4.1.1	Método de Kukkamäki.....	84
5.4.1.2	Teste Completo da Norma ISO 17123-2 (ISO, 2001)	85
5.4.2	Experimentos e Análises Metodológicas a partir do Uso de	
	Estação Total.....	86
5.4.2.1	Verificação de Limbos Horizontais e Verticais Através do Método	
	da Reiteração.....	86
5.5	Levantamento da Rede Geodésica Altimétrica Local.....	87
5.5.1	Experimentos e Análises Metodológicas a partir do Uso de	87

	Nível Digital	
5.5.1.1	Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão	87
5.6	DENSIFICAÇÃO DA INFRAESTRUTURA GEODÉSICA DE REFERÊNCIA NA ÁREA DE ESTUDO 2	93
5.6.1	Materialização de Pontos de Referência na Área de Estudo 2 ..	93
5.6.2	Experimentos e Análises Metodológicas a Partir do Uso de Estações Totais.....	96
5.6.2.1	Irradiação 3D	96
5.6.2.2	Interseção a Ré.....	98
5.6.2.3	Triangulateração	98
5.6.2.4	Nivelamento Trigonométrico com Correções da Curvatura Terrestre e da Refração Atmosférica	101
5.7	IMPLANTAÇÃO E LEVANTAMENTO DE PONTOS-OBJETO NA ÁREA DE ESTUDO 2	101
5.7.1	Materialização de Pontos-objeto na Área de Estudo 2.....	101
5.7.2	Experimentos e Análises Metodológicas a Partir do Uso de Nível digital.....	103
5.7.2.1	Método do Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão	103
5.7.3	Experimentos e Análises Metodológicas a Partir do Uso de Estação Total.....	104
5.7.3.1	Método da Interseção a Vante	104
5.7.3.2	Método da Irradiação 3D.....	107
5.8	ELABORAÇÃO DE APLICATIVOS DE PROCESSAMENTO	108
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	110
6.1	VERIFICAÇÃO E AJUSTE DE EQUIPAMENTOS GEODÉSICOS / TOPOGRÁFICOS	110
6.1.1	Resultados e Discussões a Partir do Uso de Nível Digital	110
6.1.1.1	Método de Kukkamäki.....	110
6.1.1.1.1	<i>Campanha de medição realizada em 11/02/2019.....</i>	<i>111</i>
6.1.1.1.2	<i>Campanha de medição realizada em 08/10/2019.....</i>	<i>112</i>
6.1.1.2	Teste Completo da Norma ISO 17123-2 (ISO, 2001)	114
6.2	LEVANTAMENTO DA REDE GEODÉSICA ALTIMÉTRICA LOCAL	119

6.2.1	Resultados e Discussões a Partir da Utilização de Nível	
	Digital	119
6.2.1.1	Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão	119
6.2.1.1.1	<i>Campanhas de Medições pré-existentes L01 (20/04/2018).....</i>	<i>120</i>
6.2.1.1.2	<i>Campanha de Medições Pré-existentes L02 (01/09/2018).....</i>	<i>122</i>
6.2.1.1.3	<i>Campanha de Medição L03 (14/02/2019).....</i>	<i>123</i>
6.2.1.1.4	<i>Campanha de Medição L04 (09/10/2019).....</i>	<i>125</i>
6.2.1.2	Ajustamento MMQ – modelo paramétrico.....	128
6.2.1.2.1	<i>Análise do desnível entre RN02 e RN04 obtidos durante as 1ª e 2ª campanhas de levantamento realizadas</i>	<i>128</i>
6.2.1.2.2	<i>Estudo do desnível entre LP7 e LP8 obtido nas 3ª e 4ª campanhas de levantamentos considerando a RN02 com cota Fixa de 1000 metros</i>	<i>132</i>
6.2.1.2.3	<i>Estudo do desnível entre LP7 e LP8 obtido na 3ª e 4ª campanhas de levantamento considerando o vértice LP8 como ponto de referência superficial com cota Fixa de 1000 metros.</i>	<i>137</i>
6.2.1.2.4	<i>Estabelecimento de referencial altimétrico absoluto através de vértice PO08 fixado em rocha.....</i>	<i>140</i>
6.2.1.3	Análise das discrepâncias encontradas para os desníveis ajustados advindos da 1ª e 2ª campanhas de medições	146
6.2.1.4	Análise das discrepâncias encontradas para os desníveis ajustados advindos da 3ª e 4ª campanhas de medições	148
6.2.1.5	Análise das discrepâncias encontradas para os desníveis ajustados advindos da 1ª, 2ª, 3ª e 4ª campanhas de medições considerando PO08 como referência altimétrica absoluta.....	151
6.3	DENSIFICAÇÃO DA INFRAESTRUTURA GEODÉSICA DE REFERÊNCIA NA ÁREA DE ESTUDO 2	153
6.3.1	Medições, Processamentos e Análises dos Resultados obtidos usando Estação Total	153
6.3.1.1	Irradiação 3D	153
6.3.1.2	Interseção a Ré.....	155
6.3.1.3	Triangulateração	155
6.3.1.4	Nivelamento Trigonométrico com Correções dos Efeitos da	157

	Curvatura Terrestre e da Refração Atmosférica	
6.4	IMPLANTAÇÃO E LEVANTAMENTO DE PONTOS-OBJETO NA ÁREA DE ESTUDO 2	159
6.4.1	Medições, Processamentos e Análises de Resultados dos Pontos-Objeto usando Nível Digital	159
6.4.1.1	Método do Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão	160
6.4.2	Medições, Processamentos e Análises de Resultados dos Pontos-Objeto usando Estação Total	160
6.4.2.1	Método da Interseção a Vante	161
6.4.2.2	Método da Irradiação 3D.....	163
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	165
7.1	CONCLUSÕES.....	165
7.2	RECOMENDAÇÕES.....	170
	REFERÊNCIAS	171
	APÊNDICE A – TELAS E RELATÓRIOS DO APLICATIVO DE PROCESSAMENTO DESENVOLVIDO.....	177
	APÊNDICE B – AJUSTAMENTO MMQ PRIMEIRA CAMPANHA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTÍSSIMA PRECISÃO COM COTA FIXA DE 1000,00000 METROS PARA RN02.....	183
	APÊNDICE C – AJUSTAMENTO MMQ SEGUNDA CAMPANHA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTÍSSIMA PRECISÃO COM COTA FIXA DE 1000,00000 METROS PARA RN02.....	186
	APÊNDICE D – AJUSTAMENTO MMQ TERCEIRA CAMPANHA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTÍSSIMA PRECISÃO COM COTA FIXA DE 1000,00000 METROS PARA RN02.....	189
	APÊNDICE E – AJUSTAMENTO MMQ QUARTA CAMPANHA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTÍSSIMA PRECISÃO COM COTA FIXA DE 1000,00000 METROS PARA RN02.....	194
	APÊNDICE F – AJUSTAMENTO MMQ TERCEIRA CAMPANHA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTÍSSIMA PRECISÃO COM COTA FIXA DE 1000,00000 METROS PARA LP8.....	199
	APÊNDICE G – AJUSTAMENTO MMQ QUARTA CAMPANHA	204

NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTÍSSIMA PRECISÃO COM COTA FIXA DE 1000,00000 METROS PARA LP8.....	
APÊNDICE H – AJUSTAMENTO MMQ QUARTA CAMPANHA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTÍSSIMA PRECISÃO COM COTA FIXA DE 1000,00000 METROS PARA PO08	209
ANEXO A – RELATÓRIO DA 4ª CAMPANHA DE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO PROCESSADO VIA ASTGEOTOP (GARNÉS, 2019).....	214

1 INTRODUÇÃO

A ocupação de terrenos inclinados é de natureza bastante comum no Brasil, os habitantes destas localidades no geral estão expostos a fenômenos, que podem lhes causar efeitos prejudiciais, como o comprometimento de sua integridade física, perdas materiais e patrimoniais. Segundo Varnés (1984), a avaliação do risco nessas localidades deve levar em consideração critérios como a suscetibilidade da área ao tipo de desastre em foco, o perigo potencial, o grau de exposição e a vulnerabilidade dos sistemas encontrados no local estudado.

Nesta dissertação será apresentada e colocada em prática uma metodologia para o estudo e análise de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos. Os deslizamentos fazem parte de um conjunto de movimentos, denominados movimentos gravitacionais de massa, sendo caracterizados pela existência de um plano de ruptura curvo (deslizamento rotacional) ou plano (deslizamento translacional), ao passo que recalques são definidos pela NBR 6122 (ABNT, 2019), como movimentos verticais descendentes de um elemento estrutural.

O desenvolvimento de metodologias de monitoramento de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos visa definir graus de exposição ao risco e pôr em prática medidas que tenham como meta prevenir, mitigar ou até mesmo conter os riscos sob os quais os habitantes destas localidades estão sujeitos. Na prática a gestão de áreas de risco no Brasil exige um esforço gigantesco por parte de órgãos governamentais ou privados. Devido às dimensões continentais do nosso país e sua volumosa população nem sempre é possível realizar o monitoramento destas localidades com eficiência, visto o alto número de casos de fenômenos de movimentação gravitacional de massas, que ocorrem principalmente em épocas de pluviosidades volumosas.

Acidentes de proporções gigantescas podem ser evitados a partir da correta identificação e caracterização de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos. O sucesso destes estudos exige uma ampla interdisciplinaridade entre as Ciências Exatas e Humanas, sendo necessário destacar o papel vital exercido pela Engenharia, que por meio de ciências, como a Geodésia, a Topografia, a Geotecnia, a Fotogrametria e o Sensoriamento Remoto, proporcionam a aquisição de dados técnicos geoespaciais essenciais para a geração de produtos precisos e acurados acerca da localidade estudada.

É notável que a qualidade dos dados coletados por essas ciências atingiu padrões de excelência admiráveis nos últimos anos. Tal fato, deve-se principalmente ao amplo desenvolvimento da eletrônica, da informática e do setor espacial ocorrido a partir da segunda metade do século 20, fatores que impulsionaram o avanço da instrumentação e das metodologias usadas para a coleta de dados acerca da superfície terrestre. Tem-se presenciado nos últimos anos a consolidação de diversas Geotecnologias, como por exemplo, receptores *Global Navigate Satellite System (GNSS)*, estações totais robotizadas, níveis digitais, sistemas de sensores orbitais, sistemas *Light Detection And Ranging (LiDAR)*, veículos aéreos não tripulados (VANT), câmeras fotogramétricas digitais, dentre outras.

Dentro deste contexto, a dissertação apresentada pretende abordar através da aplicação de diferentes Métodos de Levantamentos Topográficos e Geodésicos, o desenvolvimento de metodologias de caráter de monitoramento, prevenção e contenção, que possam ser utilizadas em atividades, que envolvam o conhecimento acerca das características topográficas e geotécnicas em terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos, assim como a definição de um sistema geodésico de monitoramento para tais localidades. Os métodos de medição topográficos e geodésicos empregados envolvem em suma a materialização de estruturas geodésicas compostas por pontos de referência e pontos-objeto, submetidos a uma criteriosa análise de qualidade. Nesta dissertação dar-se continuidade as pesquisas realizadas em Parque Eólico no município de Gravatá-PE, densificando-se os campos de pontos de referência e campos de pontos-objeto situados em terrenos rochosos e inclinados, no âmbito dos projetos de pesquisa em desenvolvimento intitulados “Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinados”; “Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis – LITPEG/CTG/UFPE”; e “A Geodésia Aplicada à Discretização de Edificações Prediais e o Estabelecimento de Padrões de Referência Metrológica”.

Desenvolver metodologias que apliquem e até mesmo realizem a integração entre métodos de levantamentos topográficos e geodésicos é uma temática de ampla discussão entre os profissionais envolvidos no setor de monitoramento de áreas de risco. A minimização dos custos e a redução do tempo de coleta

geralmente são fatores desejados neste tipo de operação, no entanto, devem respeitar os parâmetros de qualidade posicional, que atendam a finalidade do projeto.

1.1 OBJETIVOS

O desenvolvimento das metodologias empregadas nesta dissertação está baseado nos objetivos apresentados a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo geral apresentar uma metodologia para detectar e analisar a ocorrência de movimentos 3D em terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos, a partir da utilização de sistemas de medição geodésica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Definir e densificar estruturas geodésicas através da materialização de pontos de referência para a determinação de pontos-objeto em terrenos inclinados;
- b) Analisar métodos de levantamentos topográficos e geodésicos para o estudo de terrenos inclinados;
- c) Propor a partir da realização de levantamentos topográficos e geodésicos em épocas distintas um sistema geodésico de monitoramento capaz de detectar movimentos 3D em terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos;
- d) Desenvolver aplicativo para o processamento e análise dos dados coletados em campo.

1.2 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi dividida em sete capítulos incluindo as conclusões e recomendações. No capítulo um foram introduzidas as problemáticas relacionadas a ocupação de terrenos inclinados no Brasil e no Mundo, apresentadas as ciências

responsáveis pelo desenvolvimento de metodologias capazes de mitigar tais problemas e os objetivos da dissertação. No capítulo dois são apresentados os principais conceitos envolvidos no estudo de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos, assim como um breve relato acerca do estado da arte das tecnologias envolvidas na concepção de sistemas de medição de recalques e deslizamentos em terrenos inclinados. No capítulo três são abordadas a definição de estruturas geodésicas e o emprego de métodos geodésicos/topográficos de determinação de coordenadas altimétricas, planimétricas, planialtimétricas e tridimensionais, levando-se em consideração a utilização de métodos de verificação e retificação de equipamentos geodésicos/topográficos. No capítulo quatro são expostos os conceitos de ajustamento das observações e de controle de qualidade de estruturas geodésicas. No capítulo cinco são apresentadas as áreas de estudo e as metodologias envolvidas na aquisição dos dados de campo desta dissertação. No capítulo seis são abordados os resultados alcançados seguidos das respectivas discussões. Por fim, no capítulo sete são apresentadas as conclusões e recomendações. Finalizando-se com as Referências Bibliográficas, apêndices e anexo.

2 TERRENOS INCLINADOS SUSCEPTÍVEIS A RECALQUES E DESLIZAMENTOS

A superfície da Terra vem sendo modelada ao longo de seus milhares de anos de existência por forças internas e externas, exercidas por agentes geológicos, climatológicos, biológicos e mais recentemente por ações realizadas pelos seres humanos (ESPARTEL, 1987; FARAH, 2003).

A formação do relevo terrestre em seu estado atual é decorrente de uma situação de equilíbrio temporário entre as forças endógenas e exógenas a superfície. Sendo assim, tem-se que um terreno inclinado em seu estado natural se encontra em uma situação de equilíbrio transitória que pode vir a ser alterada de acordo com essas forças e até mesmo por fatores antrópicos.

De tal modo, a avaliação da estabilidade de terrenos inclinados é uma operação de suma importância para o diagnóstico de riscos potenciais que determinada localidade pode sofrer. De acordo com Farah (2003), tal avaliação é condicionada concomitantemente a três fatores naturais, sendo eles:

- a) Fatores geométricos (inclinação, comprimento e amplitude);
- b) Fatores geológicos (tipos de solos e rochas que a compõem);
- c) Fatores fisiográficos (abrangendo clima, cobertura vegetal, drenagens naturais, dentre outras).

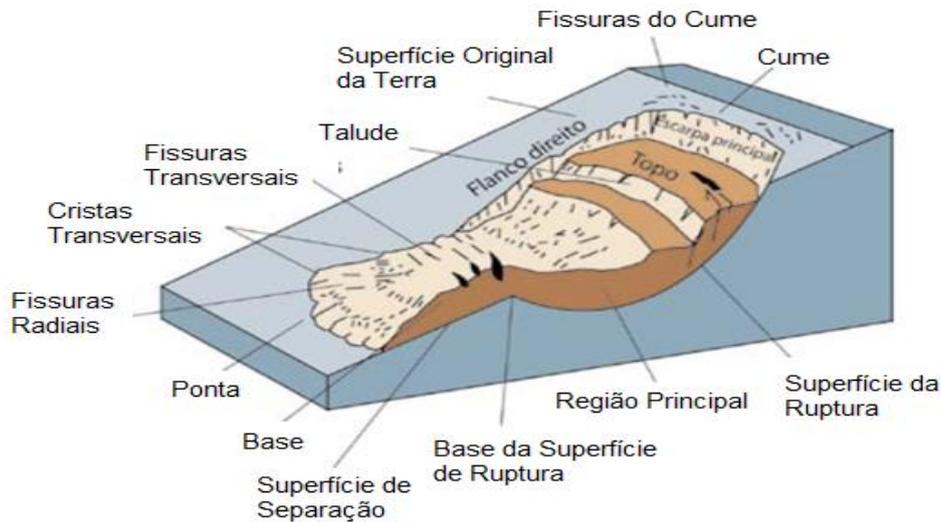
Com relação aos aspectos geométricos, a Lei Federal 6.766 (BRASIL, 1979) evidencia que as encostas com declives superiores a 30% constituem áreas impróprias à ocupação. A alteração do estado de equilíbrio destes terrenos através de fenômenos de movimentação de materiais rochosos e terrosos impulsionados pela ação da força gravitacional, expõe as pessoas que as habitam a situações de extrema vulnerabilidade econômica, material e social.

2.1 MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSA

Movimentos gravitacionais de massa podem ser definidos como o movimento do solo, rocha e/ou vegetação ao longo de uma vertente sob ação direta da gravidade. A contribuição de outro meio, como água ou gelo se dá pela redução da resistência dos materiais da vertente e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos (TOMINAGA, SANTORO e AMARAL, 2009). Na Figura 1 percebe-se

a ilustração de um movimento de massa idealizado, do tipo deslizamento rotacional, onde se pode encontrar denominações comumente utilizadas para descrever partes específicas de um movimento de massa.

Figura 1 – Deslizamento rotacional idealizado.



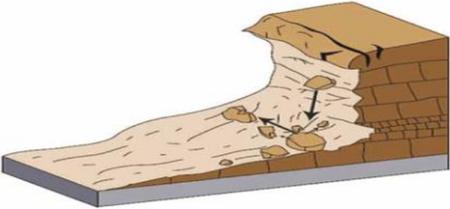
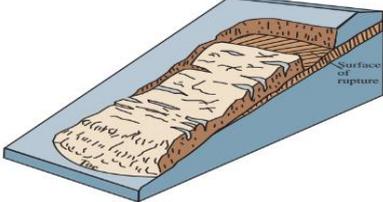
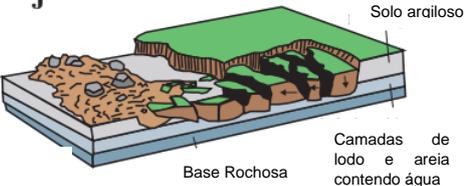
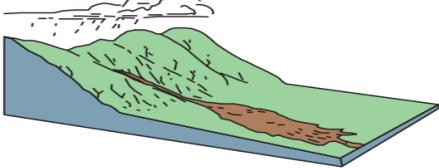
Fonte: USGS (2008).

2.1.1 Tipos de Movimento de Massa

De acordo com Bandeira (2003), diversos critérios são levados em consideração para classificar movimentos gravitacionais de massa, sendo estes frequentemente associados ao tipo de material, à velocidade, ao mecanismo do movimento, ao modo de deformação, à geometria da massa movimentada e à quantidade de água. Neste sentido uma das classificações de maior aceitação mundial foi proposta por Varnés (1978) e agrupa os movimentos gravitacionais de massa em classes de acordo com o tipo de movimento e o tipo de material transportado. Apesar desta classificação ter ampla aceitação mundial os movimentos gravitacionais de massa por muitas vezes apresentam características peculiares a cada localidade e por isso classificações de caráter regional podem ser encontradas nas literaturas (AUGUSTO FILHO, 1994). Um exemplo disso é a classificação com base no tipo de movimento, proposta por Augusto Filho (1994) baseada em Varnés (1978) e que está adequada à realidade dos movimentos observados no Brasil.

Os tipos de movimento baseados na classificação de Varnés (1978) são apresentados nas Figuras 1, 2, 3, 4, 5 e 6 contidas no Quadro 1.

Quadro 1 – Tipos de movimentos de massa e suas características.

Tipos de Movimentos	Características dos Movimentos	Ilustrações
Quedas	Os materiais, rocha ou solo, se desprendem das encostas pela ação da gravidade. O movimento é do tipo queda livre ou de rolamento, com velocidade muito rápida (m/s) e pode atingir grandes distâncias.	<p data-bbox="1038 383 1270 412">Figura 2 – Quedas.</p>  <p data-bbox="1027 645 1281 674">Fonte: USGS (2008).</p>
Tombamentos	Rotação de um bloco da encosta em torno de um eixo e está sujeito a existência de planos de fraqueza.	<p data-bbox="1007 707 1302 736">Figura 3 – Tombamento.</p>  <p data-bbox="1027 1016 1281 1046">Fonte: USGS (2008).</p>
Escorregamentos ou deslizamentos	Ocorre normalmente através da existência de uma superfície de ruptura, os primeiros sinais podem ser observados através da existência de fissuras na superfície do solo.	<p data-bbox="903 1066 1406 1095">Figura 4 – Escorregamento Translacional.</p>  <p data-bbox="1027 1330 1281 1359">Fonte: USGS (2008)</p>
Espalhamentos	Quando materiais mais rígidos estão acima de camadas menos resistentes, pode ocorrer a formação de fissuras e fraturas transversais ao movimento.	<p data-bbox="951 1379 1358 1408">Figura 5 – Espalhamento Lateral.</p>  <p data-bbox="1027 1682 1281 1711">Fonte: USGS (2008).</p>
Corridas/ Escoamentos	São formas rápidas de escoamento, de caráter essencialmente hidrodinâmico, provocado pela perda de resistência do material, devido ao excesso de água.	<p data-bbox="954 1738 1353 1767">Figura 6 – Corrida/ Escoamento.</p>  <p data-bbox="1027 1968 1281 1998">Fonte: USGS (2008).</p>

Fonte: Adaptado de Varnés (1978).

Varnés (1978) também propôs um sistema de classificação baseado na velocidade do movimento. Ao todo, o autor subdividiu os movimentos em sete classes que poderiam descrever desde um movimento extremamente rápido a um extremamente lento. Por sugestão da *International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides* (IUGS, 1995) no Trabalho *Working Party for Landslide Inventory – WP/WLI* promovido pela Unesco no ano de 1994, as classes de velocidades propostas em Varnés (1978) tiveram seus valores reajustados para que expressassem seus valores em múltiplos de 100. No Quadro 2 é possível visualizar ambas classificações.

Quadro 2 - Classificações dos Movimentos em Função da Velocidade Varnés (1978) /IUGS (1995).

Classes de Varnés (1978)		Classes da WP/WLI		Descrição da Velocidade	Tipo de Movimento
Velocidade	Velocidade em mm/s	Velocidade	Velocidade em mm/s		
>3 m/s	3×10^3	>5 m/s	5×10^3	Extremamente rápida	Desmoronamento
0.3 m/min	5	3 m/min	50	Muito rápida	Desmoronamento
1.5 m/dia	17×10^{-3}	1.8 m/hora	5×10^{-1}	Rápida	Desmoronamento e Escorregamento
1.5 m/mês	0.6×10^{-3}	13 m/mês	5×10^{-3}	Moderada	Escorregamento
1.5 m/ano	48×10^{-6}	1.6 m/ano	50×10^{-6}	Lenta	Escorregamento e escoamento
0.06 m/ano	1.9×10^{-6}	16 mm/ano	0.5×10^{-6}	Muito lenta	Escoamento
<0.06 m/ano	$<1.9 \times 10^{-6}$	<16 mm/ano	$<5 \times 10^{-6}$	Extremamente lenta	Escoamento

Fonte: IUGS (1995).

2.2 RECALQUES DE FUNDAÇÕES

De acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2019), entende-se como recalques os movimentos verticais descendentes de um elemento estrutural, em casos onde o movimento é ascendente, denomina-se levantamentos. Convencionalmente, o recalque é representado com sinal positivo.

Ainda sobre este aspecto, tem-se que de acordo com Seixas, Seixas e Seixas (2009), o controle de fundações pode ser realizado a partir das medições de recalques. Em estudos multidisciplinares buscando soluções apropriadas para a construção de edificações de grande porte e no que diz respeito às ciências geodésicas, o ramo da Geodésia Aplicada à Engenharia subsidia as medições de campo de pontos de referência e de campo de pontos-objeto, distribuídos na área de estudo por meio de uma instrumentação e métodos adequados de levantamento. A

partir da análise e das observações de campo em estruturas geodésicas, como referência ao posicionamento preciso de objetos, são estudados os deslocamentos verticais e soluções mais apropriadas para a estabilidade das construções.

A medição de recalques em fundações, sob as quais as cargas de maior impacto são verticais, constituem o principal meio para o acompanhamento do sistema estrutura-fundação. Essa medição pode ser realizada através da mensuração dos deslocamentos verticais de pinos implantados na estrutura, normalmente localizados em pilares, em relação a um ponto fixo denominado Referência de Nível (*benchmark*) que deve ser indeslocável. Dito isto, faz-se importante lembrar as definições de recalques totais e recalques parciais. Os primeiros indicam a variação ocorrida entre a primeira observação de recalque realizada e a última. Os segundos indicam a variação de recalque entre observações consecutivas.

Nesta dissertação o acompanhamento vertical do sistema estrutura-fundação foi realizado em duas torres eólicas (Gravatá 01 e Gravatá 02), do tipo *Onshore* localizadas no Parque Eólico Gravatá Ltda., conforme Figura 7 (A) e (B). Este tipo de estrutura tem ganhado cada vez mais destaque no cenário nacional e internacional, por conta da sua capacidade de gerar energia limpa e renovável.

Figura 7 – Torres Eólicas do Tipo Onshore.



(A) Parque Eólico Gravatá Ltda., em destaque torre Gravatá 02.



(B) Torre Gravatá 01.

Fonte: O Autor (2019).

De acordo com Pinto, Martins e Pereira (2017), o Brasil vem ampliando significativamente a participação da geração eólica na sua matriz elétrica como consequência de políticas específicas para o setor. Ainda de acordo com estes autores, a contribuição da energia eólica cresceu de participação inexpressiva para uma posição de destaque na matriz elétrica nacional ao longo da última década, por ser uma fonte com grande potencial em nosso território.

Em contraposição ao desenvolvimento da energia eólica no país, ainda não é tão comum encontrar pesquisas relacionadas ao monitoramento geodésico de recalques em fundações de torres eólicas, podendo-se citar a nível nacional Canto (2018), Canto e Seixas (2020) e a nível internacional Dragomir, Negrilă e Sărăcin (2014).

2.3 MONITORAMENTO DE TERRENOS INCLINADOS SUSCEPTÍVEIS A RECALQUES E DESLIZAMENTOS – ESTADO DA ARTE

O passar dos anos e os consequentes avanços das geotecnologias possibilitaram, sobretudo a partir dos anos 90, o desenvolvimento de uma série de metodologias voltadas ao monitoramento de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos. Diversas pesquisas foram desenvolvidas neste período e a aplicabilidade de tecnologias como o GNSS, estações totais robotizadas e o LiDAR será demonstrada por meio de diferentes autores. Cabe destacar que tais tecnologias foram escolhidas para ilustrar o estado da arte do monitoramento de terrenos inclinados, pois é possível encontrar na literatura disponível, diversos artigos e projetos versando sobre a aplicação dos mesmos no estudo e monitoramento de tais superfícies. Ressalta-se ainda que, no geral, a maior parte das literaturas consultadas utilizou sistemas de monitoramento híbridos, nos quais mais de uma tecnologia foi utilizada para o alcance dos resultados e nem sempre estas outras tecnologias envolveram a utilização de equipamentos geodésicos/topográficos.

No que diz respeito ao monitoramento empregando o GNSS, Bayrak *et al.* (2015) apresentaram um sistema de monitoramento onde se desenvolveu um modelo cinemático de deformação para deslizamentos, utilizando processos de filtragem Kalman e observações da rede GNSS *TUSAGA-Aktif* da Turquia, para determinar os campos de velocidade da área de estudo analisada. Seus resultados,

associados a Sistemas de Informações Geográficas (SIG), permitiram encontrar tendências dominantes dos movimentos de deslizamento de terra na área de estudo nas direções noroeste e nordeste, fato que também havia sido observado em pesquisas realizadas anteriormente na mesma área de estudo usando outras técnicas de monitoramento.

Ainda com relação ao posicionamento GNSS, Burity (2016) conseguiu obter o índice de vulnerabilidade física de uma área sujeita a riscos de deslizamentos no Recife, utilizando a técnica *RTK-NTRIP*, obtendo, de acordo com a autora, resultados de uma maneira rápida e precisa, o índice de vulnerabilidade encontrado para a localidade de estudo através da utilização desta técnica quando comparado a dados de órgão oficiais mostraram coerência.

Em Paese *et al.* (2014), os autores conseguiram implantar, monitorar e comparar as discrepâncias entre os valores altimétricos advindos da implantação de uma estrutura geodésica de monitoramento em uma área susceptível a escorregamentos. As comparações foram baseadas em um conjunto de observações obtidas com a aplicação do método do nivelamento geométrico e do método *GNSS stop-and-go*, encontrando discrepâncias máximas na ordem de 2,6 cm entre um método e outro.

Em Santos (2017), Santos *et al.* (2018) e Santos, Seixas e Santos (2019) é possível encontrar análises quantitativas e qualitativas a respeito da implantação de pontos de referência e pontos-objeto em terrenos inclinados utilizando o método *GNSS RTK*, as comparações são efetuadas em relação a métodos clássicos de levantamentos como a interseção a ré, interseção a vante e o nivelamento geométrico. Tendo o método *GNSS RTK* obtido como principal vantagem em relação aos demais a sua praticidade de aplicação em campo, que pode minimizar fatores como o tempo de coleta e à quantidade de pessoas na equipe de levantamento. No entanto, no que diz respeito a qualidade posicional o método restringe a detecção de movimentos na superfície a valores entre 2 e 5 cm.

Uma outra tecnologia que embora não tão recente vem tendo uma maior utilização no Brasil, no que tange ao monitoramento de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos, são as Estações Totais Robotizadas (ETRs), como exemplo, pode-se citar os trabalhos desenvolvidos pelo Centro

Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), que monitora terrenos inclinados em 10 municípios brasileiros, sendo um deles o município de Recife-PE. Cada cidade monitorada dispõe de uma ETR e de um conjunto de 100 prismas posicionados ao longo da encosta monitorada. O sistema, de acordo com CEMADEN (2019), é capaz de identificar deslocamentos na ordem de 1,0 mm e a correta interpretação dos dados coletados permitirá compreender melhor a dinâmica de movimentação das encostas (mecanismos de ruptura), aprimorando os seus limiares críticos e, conseqüentemente, permitindo a emissão de alertas antecipados de deslizamentos com maior precisão. Uma ilustração do sistema pode ser visualizada na Figura 8, onde percebe-se o conjunto de prismas espalhados em diferentes localizações de um terreno inclinado assim a ETR posicionada em uma localização estratégica.

Figura 8 – Sistema de Monitoramento de Encostas do Cemaden (2019).



Fonte: Cemaden, (2019).

Por fim, uma geotecnologia que está em evidência nos últimos anos para diversas finalidades, entre elas o monitoramento de áreas de risco é o *Light Detection And Ranging (LiDAR)*, é possível encontrar diversas literaturas disponíveis nacionalmente e internacionalmente versando sobre diferentes metodologias aplicadas com esta técnica, expondo no geral vantagens como o alto número de pontos coletados, tornando possível a geração de Modelos Digitais de Elevação de

alta densidade que proporcionam novos caminhos para a interpretação dos mecanismos propulsores de movimentos gravitacionais de massa no geral.

3 ESTRUTURAS GEODÉSICAS E MÉTODOS GEODÉSICOS/TOPOGRÁFICOS DE DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS ALTIMÉTRICAS, PLANIMÉTRICAS, PLANIALTIMÉTRICAS E TRIDIMENSIONAIS

Estruturas Geodésicas Tridimensionais podem ser definidas como campos de pontos planialtimétricos precisos e materializados, representando referências para o estabelecimento dos posicionamentos de alcance global, regional e local (TORGE, 2001). Ressalta-se, nesse caso, que Torge (2001), na verdade, utiliza o termo Redes Geodésicas, porém, nessa dissertação, redes geodésicas e estruturas geodésicas serão tratados como termos equivalentes.

Ainda de acordo com Torge (2001), entende-se como estruturas geodésicas globais àquelas em que é possível realizar sistemas de referências definidos em convenções internacionais. Por outro lado, o autor afirma que estruturas geodésicas regionais formam as bases para a realização de levantamentos geodésicos e gravimétricos a nível nacional e continental, servindo de base para sistemas de Geoinformação e mapas em série. Por fim, Torge (2001) define estruturas geodésicas locais como sendo aquelas tipicamente estabelecidas para projetos de engenharia e investigações geodinâmicas.

A maneira como as estruturas geodésicas foram implantadas ao longo dos anos dependeu muito do tipo de tecnologia disponível a época de sua materialização, por exemplo, o Sistema Geodésico Brasileiro – SGB teve suas redes de controle horizontal e vertical estabelecidas separadamente por métodos clássicos da Geodésia. No entanto, o avançar da tecnologia possibilitou o estabelecimento de redes geodésicas tridimensionais com sistemas de referência geocêntricos, que sistematicamente substituíram essas redes de referências clássicas.

Nessa dissertação foram implantadas estruturas geodésicas tridimensionais formadas por um campo de pontos de referência e um campo de pontos-objeto utilizando métodos de posicionamentos clássicos da Geodésia com o objetivo de monitorar um terreno inclinado em estado natural e dar continuidade aos estudos de deformações estruturais em fundações de torres eólicas *Onshore*, levando-se em consideração critérios como a acurácia, confiabilidade e a sensibilidade a detecção de movimentos.

3.1 DEFORMAÇÕES ESTRUTURAIS

Conforme exposto em Santos (1999), a conceituação básica de mecânica dos materiais afirma que corpos ou peças, sob a ação de forças externas estão sujeitos a deformações de diversas naturezas, a depender de sua extensão, deformações podem ser caracterizadas como de escalas globais, regionais ou locais, podendo-se citar, respectivamente, como exemplos de tais deformações o movimento relativo entre placas tectônicas, o choque entre placas tectônicas, e os movimentos observados em estruturas no geral feitas pelo Homem como o enchimento de barragens.

De acordo com Kahmen e Faig (1988), é possível detectar deformações em uma estrutura utilizando métodos geotécnicos e geodésicos, sendo o primeiro utilizado principalmente para a detecção de movimentos relativos, ao passo que o segundo tem a sua maior aplicabilidade na detecção de movimentos absolutos. Ainda de acordo com o autor um movimento relativo será detectado pela análise da variação de um ponto-objeto em respeito a outro ponto-objeto, enquanto um movimento absoluto pode ser detectado através da variação de um ponto-objeto com respeito a um ponto de referência.

Do ponto de vista geodésico, dois propósitos podem ser considerados como os principais. Inicialmente, a própria detecção, análise e monitoramento de deformações, quer seja em aspectos locais, regionais ou globais. Um segundo propósito diz respeito ao estabelecimento de redes geodésicas, incluindo-se aí aquelas com o propósito de controle de deformações, nesses casos os deslocamentos dos vértices podem ser diretamente correlacionados a deslocamentos do corpo sob investigação. No caso, no qual o interesse reside no conhecimento da estabilidade da estrutura em si, busca-se saber o quanto os erros sistemáticos que afetam as observações, estão influenciando na forma da rede geodésica (SANTOS, 1999).

3.2 DEFINIÇÃO DE PONTOS DE REFERÊNCIA E PONTOS-OBJETO

Um campo de pontos de referência é um conjunto de pontos materializados no terreno com coordenadas conhecidas, determinadas de acordo com as especificações do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE, (2017) ou segundo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas utilizadas para

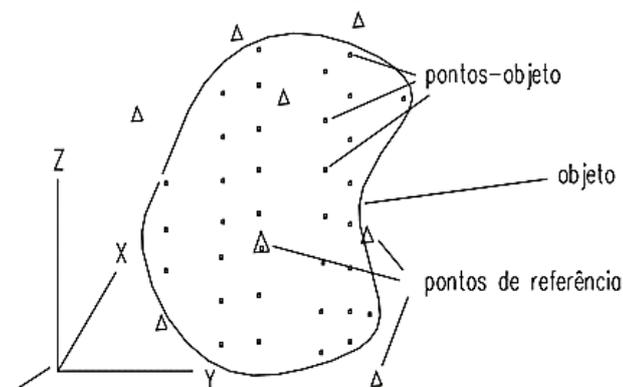
apoio em trabalhos geodésicos e topográficos, ficando evidenciado pela materialização de ao menos dois vértices fora dos limites do imóvel objeto de estudo, em locais que ofereçam segurança (BOTELHO, 2003).

Silva, Seixas e Romão (2004) alertam para a importância de se escolher a melhor configuração geométrica para a materialização dos pontos de referência, uma vez que isso possibilita uma melhor propagação dos erros de observações simuladas, um melhor rendimento na observação de pontos-objeto e uma estabilidade para a realização de um sistema de referência de medição ao longo do tempo. Ainda de acordo com os autores, os pontos de referência podem ser materializados através de:

- a) Consoles com centragem fixa e/ou forçada para o instrumento de medição;
- b) Pilares com proteção térmica implantados em diferentes profundidades;
- c) Tripés rígidos com centragem fixa e/ou forçada;
- d) *Benchmarks* simples, de boa qualidade geotecnológica, para referenciar réguas e miras;
- e) *Benchmarks* com centragem fixa e/ou forçada, de boa qualidade geotecnológica, para referenciar goniômetros e similares.

A análise do caso em específico permitirá aos responsáveis pelo levantamento a escolha do tipo de materialização adequada de modo a evitar danificação, obstrução ou até mesmo a destruição de um ponto de referência. A Figura 9 ilustra um Sistema de Referência de Medição (SRM) tridimensional, composto por um campo de pontos de referência e um campo de pontos-objeto.

Figura 9– Sistema de Referência de Medição a Partir de Pontos de Referência



Fonte: Silva, Seixas e Romão (2004).

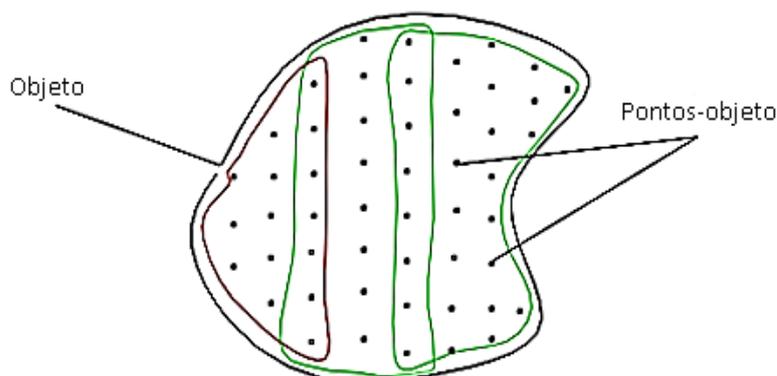
Por outro lado, pontos-objeto podem ser definidos, conforme Botelho (2003), como um conjunto de pontos levantados em um terreno e utilizados para representação de todos os detalhes necessários a serem representados. Os objetos levantados, tais como prédios, postes e árvores têm suas coordenadas referenciadas ao sistema definido pelo campo de pontos de referência.

A discretização do contínuo que compõe os objetos, como sua superfície, por exemplo, deverá acontecer de modo que se busque uma superfície correspondente à original capaz de permitir a interpolação das deformações identificadas e quantificadas em seus pontos-objeto sem perda de informação relevante ao estudo multidisciplinar. Em outras palavras, o tipo dos fenômenos causadores de deformações deve ser previamente estudado para a escolha do campo de pontos - objeto, de modo que se possa interpolar precisamente os resultados entre subespaços do mesmo, resultantes da análise estocástica (SILVA, SEIXAS e ROMÃO, 2004). Ainda de acordo com os autores a materialização de pontos-objeto pode ocorrer de diversas maneiras, entre as mais comuns estão:

- a) Pinos ligados simplesmente à superfície;
- b) Pinos cravados a diferentes profundidades da superfície;
- c) Marcas luminosas;
- d) Marcas fosforescentes;
- e) Pinos com ranhuras e/ou furos associados a diferentes formas de alvos;
- f) Marcas ou alvos materializados em centragem forçada e fixa, ligadas a consoles de diferentes formatos.

A Figura 10 ilustra a discretização de um objeto em deformação por meio da materialização de um campo de pontos-objeto.

Figura 10– Objeto em Deformação Definido por um Campo de Pontos-Objeto.



Fonte: Silva, Seixas e Romão (2004).

3.3 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE COORDENADAS PLANIMÉTRICAS E ALTIMÉTRICAS

Os Métodos Terrestres de Determinação de Coordenadas Planimétricas e Altimétricas foram empregados nesta dissertação através da utilização de estações totais e níveis digitais. Com o auxílio destes instrumentos foi possível realizar observações angulares e lineares, que associadas aos conceitos matemáticos adequados a cada método permitiram a determinação das coordenadas altimétricas e/ou planialtimétricas dos vértices integrantes do campo de pontos de referência e do campo de pontos-objeto.

Os métodos empregados nesta dissertação foram: interseção a ré, interseção a vante, triangulateração, irradiação 3D, nivelamento trigonométrico com correções dos efeitos da curvatura terrestre e da refração atmosférica e o nivelamento geométrico de altíssima precisão.

3.3.1 Interseção a ré

Interseção a ré é um método usado para determinar as coordenadas planimétricas desconhecidas de um ponto ocupado por uma estação total ou teodolito através da observação de dois ângulos horizontais para no mínimo, três pontos com coordenadas planimétricas conhecidas (GHILANI, 2010).

O método de interseção a ré subdivide-se em três categorias que se diferenciam pelo tipo de observação que é coletada para a determinação em campo do vértice desconhecido, sendo elas: interseção por meio da medição de direções, interseção por meio da medição de distâncias e interseção através de medições combinadas de direção e distância (KAHMEN e FAIG, 1988). Nesta dissertação utilizou-se apenas o método de interseção a ré através de medições combinadas de ângulos e distâncias e, por esse motivo, as outras situações não são explanadas, no entanto, detalhes adicionais sobre elas e suas respectivas soluções matemáticas podem ser encontrados em Kahmen e Faig (1988), Erba *et al.* (2005), Silva e Segantine (2015) e Ghilani (2013).

3.3.1.1 Interseção a ré por meio de medições combinadas de direções e distâncias

O método da interseção a ré por meio de medições combinadas de direções e distâncias é preferencialmente utilizado quando medidores eletrônicos de distância são usados em conjunto com teodolitos ópticos ou eletrônicos. Em tal combinação a configuração geométrica adotada tem pouca importância o que providencia sempre soluções aceitáveis. As observações coletadas através deste método podem ser ajustadas via Método dos Mínimos Quadrados – MMQ quando um número maior do que dois ângulos e duas distâncias são coletados (KAHMEN e FAIG, 1988).

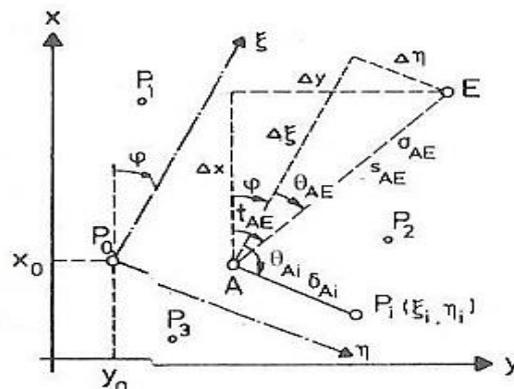
A obtenção das coordenadas de um vértice através do método da interseção a ré por meio de medições combinadas de direções e distâncias também pode ser realizada através do método da transformação de similaridade, conforme descrito em Kahmen e Faig (1988).

a) Método da Transformação de Similaridade 2D

A transformação de similaridade expressa a relação entre dois sistemas de coordenadas, tal relação é representada por meio de duas translações (X_0 , Y_0), uma rotação (φ) e um fator de escala (q), que relacionam um sistema local arbitrado em campo e o sistema da máquina: estação total, neste caso (KAHMEN e FAIG, 1988). Segundo os mesmos autores, a transformação de similaridade 2D requer ao menos dois pontos comuns em ambos os sistemas.

A Figura 11 ilustra os elementos geométricos integrantes da transformação de similaridade, ao passo que as Equações 1 a 7 representam a formulação matemática do método desenvolvida em Kahmen e Faig (1988).

Figura 11– Transformação de similaridade entre coordenadas.



Fonte: Kahmen e Faig (1988).

$$x = X_A - q \cdot s_A \sin(r_A + \varphi) = X_E - q \cdot s_E \sin(r_E + \varphi) \quad (1)$$

$$y = Y_A - q \cdot s_A \cos(r_A + \varphi) = Y_E - q \cdot s_E \cos(r_E + \varphi) \quad (2)$$

$$\xi_A = s_A \sin r_A \quad (3)$$

$$\eta_A = s_A \cos r_A \quad (4)$$

$$\xi_E = s_E \sin r_E \quad (5)$$

$$\eta_E = s_E \cos r_E \quad (6)$$

$$t_{AE} = \varphi + \theta_{AE} \quad (7)$$

Em que:

x, y = coordenadas retangulares em um sistema de referência adotado;

$\xi_A, \eta_A, \xi_E, \eta_E$ = Coordenadas dos vértices A e E, pertencentes a um sistema local arbitrado;

q = fator de escala;

φ = ângulo de rotação;

s_A = distância do vértice P_0 ao vértice A;

s_E = distância do vértice P_0 ao vértice E;

R_A = ângulo horário de uma direção zero ao vértice A;

R_E = ângulo horário de uma direção zero ao vértice E;

t_{AE} = ângulo horário do vértice A ao vértice E.

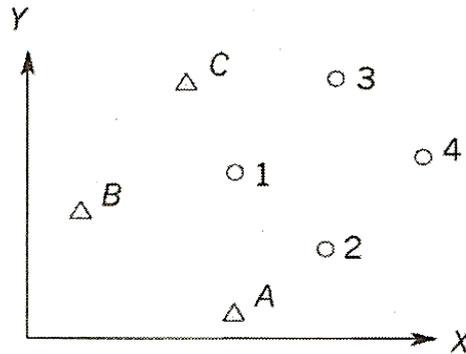
Quando existe mais de dois pontos com coordenadas conhecidas em dois sistemas, esta transformação 2D passa a se chamar transformação de Helmert, sendo possível obter as coordenadas de um ponto desconhecido através do ajustamento por MMQ. Em Wolf e Ghilani (1996), a transformação de similaridade é desenvolvida como um processo que envolve três etapas:

- a) Dimensionamento – envolve a criação de iguais dimensões em dois sistemas de coordenadas;
- b) Rotação – torna os eixos de referência dos dois sistemas paralelos;
- c) Translação – cria uma origem comum para os dois sistemas de coordenadas.

A Figura 12 ilustra a transformação de similaridade de quatro parâmetros, assim como as Equações 8 a 14 expõem a formulação matemática necessária para a obtenção de coordenadas de um ponto desconhecido, utilizando a transformação.

As equações de observação seguidas da respectiva matriz 'A', vetor das observações e vetor dos resíduos podem ser encontrados com maior nível de detalhamento em Wolf e Ghilani (1996).

Figura 12 – Transformação de similaridade de quatro parâmetros.



Fonte: Wolf e Ghilani (1996).

$$X+V_x=ax'-by'+c \quad (8)$$

$$Y+V_y=bx'+ay'+d \quad (9)$$

$$T_y=d \quad (10)$$

$$T_x=c \quad (11)$$

$$S=\frac{a}{\cos\theta} \quad (12)$$

$$S=\frac{b}{\sin\theta} \quad (13)$$

$$\theta=\text{atan}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (14)$$

Em que:

X, Y = coordenadas retangulares em um sistema de referência adotado;

x', y' = coordenadas pertencentes a um sistema local arbitrado;

V_x = resíduo em relação a coordenada X ;

V_y = resíduo em relação a coordenada Y ;

S = fator de escala;

θ = ângulo de rotação;

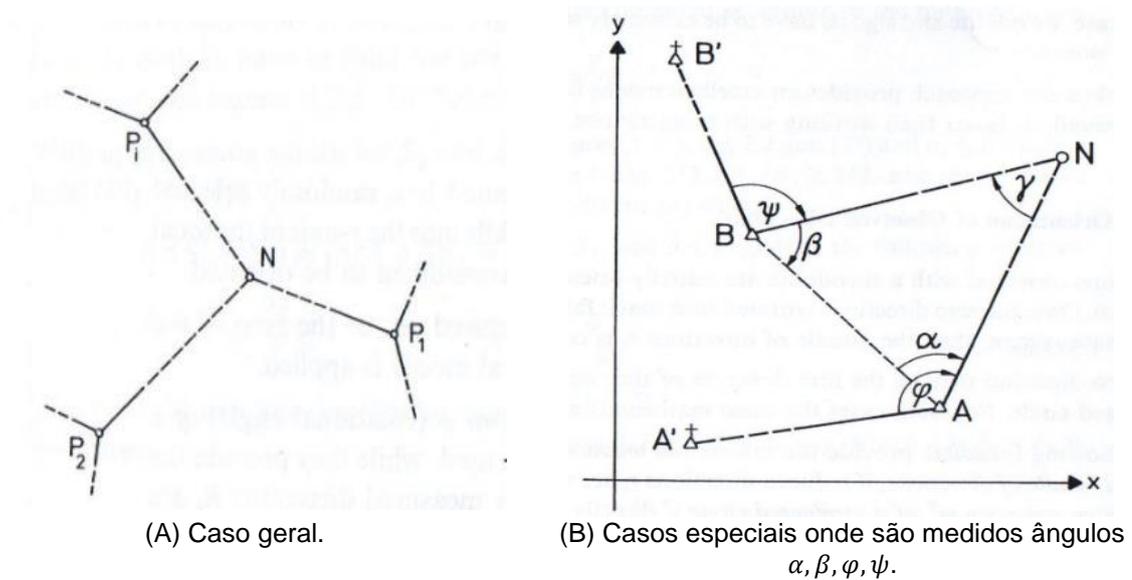
T_y = translação em relação a Y ;

T_x = translação em relação a X .

3.3.2 Interseção a Vante

O método da interseção a vante permite determinar as coordenadas planimétricas de um ponto desconhecido, a partir de dois outros pontos com coordenadas conhecidas, a Figura 13 ilustra o procedimento realizado em campo.

Figura 13 – Interseção a vante.



Fonte: Kahmen e Faig (1988).

Os casos abordados de interseção a vante nesta dissertação envolvem primeiramente a determinação dos ângulos internos α, β (Figura 13(B)), nesta situação os pontos com coordenadas conhecidas são intervisíveis entre si. O procedimento em campo consistirá em posicionar o teodolito ou estação total sobre os vértices com coordenadas conhecidas e a partir deles realizar a medição dos ângulos horizontais em relação ao vértice de coordenadas desconhecidas.

Considerando a Figura 13 (A), a solução matemática adotada para a situação onde existe intervisibilidade entre os pontos com coordenadas conhecidas é dada pelas Equações 15, 16 e 17 (KAHMEN e FAIG, 1988).

$$Y_P = \frac{[X_A - Y_A \cdot \tan(AZ_{AN})] - [X_B - Y_B \cdot \tan(AZ_{BN})]}{\tan(AZ_{BN}) - \tan(AZ_{AN})} \quad (15)$$

$$X_N = X_A + (Y_N - Y_A) \cdot \tan(AZ_{AN}) \quad (16)$$

$$X_N = X_B + (Y_N - Y_B) \cdot \tan(AZ_{BN}) \quad (17)$$

Sendo que:

A, B = vértices de coordenadas conhecidas;

N = vértice de coordenadas desconhecidas;

AZ_{AN} = azimute do vértice A para o ponto N;

AZ_{BN} = azimute do vértice B para o ponto N;

α = ângulo interno entre \overline{AB} e \overline{AN} ;

β = ângulo interno entre \overline{BA} e \overline{BN} ;

X_A = coordenada X do vértice A;

Y_A = coordenada Y do vértice A;

X_B = coordenada X do vértice B;

Y_B = coordenada Y do vértice B.

O método da interseção a vante também permite a determinação das coordenadas do vértice N, nos casos onde não há intervisibilidade entre os vértices com coordenadas conhecidas, Figura 13 (B). Para isso é necessário que haja no entorno destes, outros vértices com coordenadas conhecidas, A' e B' conforme Figura 13 (B). A solução encontrada neste caso é dada pela aplicação das leis da trigonometria e pode ser vista em mais detalhes em Kahmen e Faig (1988).

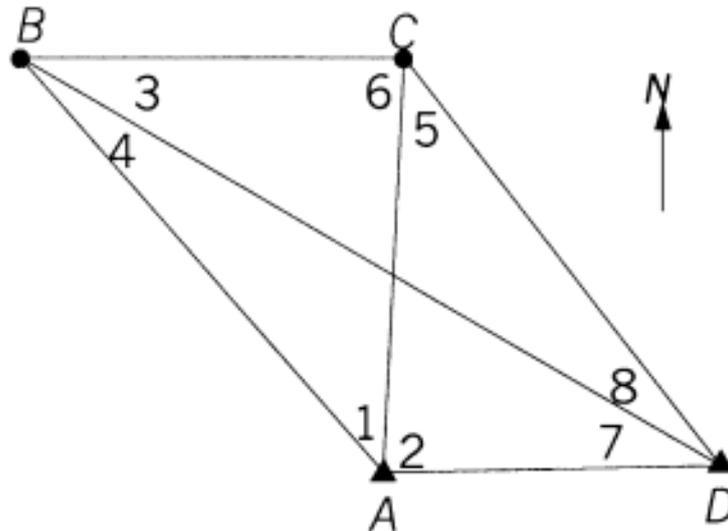
Caso sejam realizadas observações de ângulos e distâncias direcionadas ao ponto N a partir de 2 pontos com coordenadas conhecidas será possível realizar o ajustamento pelo MMQ, conforme equações matemáticas descritas em (GEMAEL, 1994).

3.3.3 Triangulateração

O método da Triangulateração abrange os cálculos utilizados para os processamentos dos métodos da Trilateração e Triangulação, sendo esse um método combinado. Sua solução é possível através da observação de ângulos e distâncias a partir de vértices intervisíveis. De acordo com Wolf e Ghilani (1996), o procedimento de ajuste das coordenadas planimétricas desconhecidas consiste em observar um número mínimo de ângulos para a solução dos triângulos e então estimar valores iniciais para as coordenadas desconhecidas, o ajuste pode ser realizado através do modelo paramétrico do MMQ em um processo iterativo até o alcance de um critério de convergência pré-estabelecido. O método é ilustrado na Figura 14, onde a partir da linha de base formada pelos vértices A e D, que possuem

coordenadas planimétricas conhecidas, é possível determinar as coordenadas planimétricas dos vértices B e C.

Figura 14 – Método da Triangulação



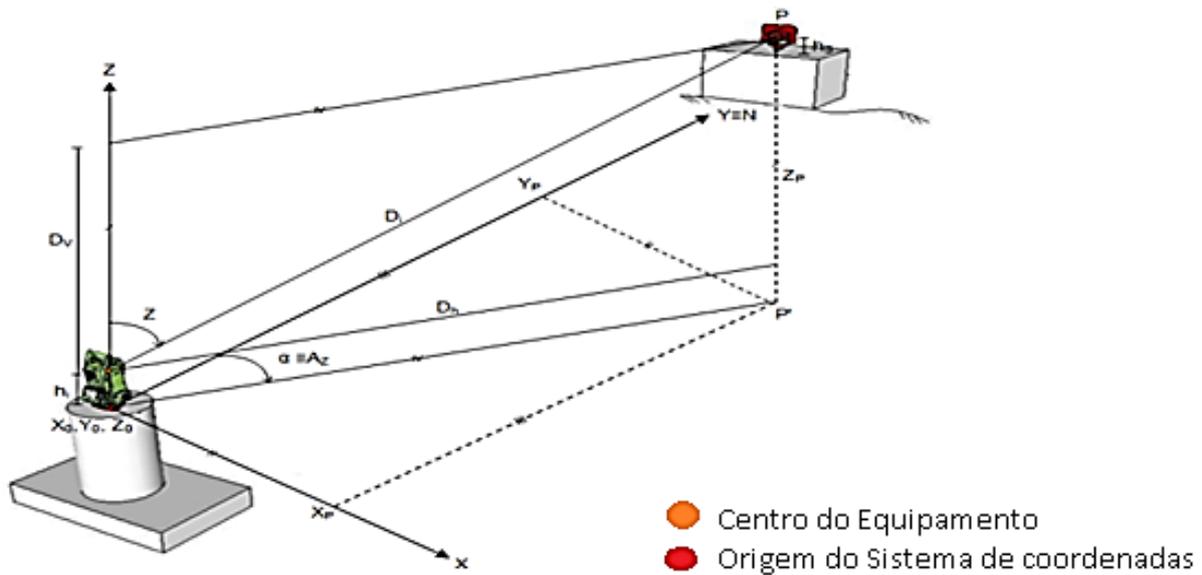
Fonte: Wolf e Ghilani (1996).

O quadrilátero exposto na Figura 14 apresenta uma situação comum na aplicação do método da Triangulação, na qual todos os vértices estão conectados através da observação de ângulos e distâncias, possibilitando a existência de observações redundantes que facilitam o processo de ajustamento das observações que está apresentado no capítulo 4.

3.3.4 Irradiação Tridimensional – 3D

De acordo com Siguel *et al.* (2013), o método da Irradiação 3D, baseia-se na observação de ângulos horizontais, zenitais e distâncias inclinadas em relação a pontos de interesse a partir de uma direção conhecida, tomada como referência. Uma ilustração acerca da aplicação do método pode ser visualizada na Figura 15 e a sua formulação matemática é exposta nas Equações 18, 19 e 20.

Figura 15– Método da irradiação tridimensional.



Fonte: Siguel *et al* (2013).

$$X_P = X_0 + D_i \sin Z \sin A_Z \quad (18)$$

$$Y_P = Y_0 + D_i \sin Z \cos A_Z \quad (19)$$

$$Z_P = Z_0 + (H_i - H_s) + (c_1 - c_2) + D_i \cos Z \quad (20)$$

Em que:

X_P, Y_P, Z_P = coordenadas do ponto P no referencial local;

X, Y, Z = coordenadas da origem;

H_i = altura do instrumento;

H_s = altura do prisma;

c_1 = correção devido ao efeito da curvatura terrestre;

c_2 = correção devido ao efeito da refração atmosférica.

As correções c_1 e c_2 serão discutidas no subitem 3.3.6 desta dissertação.

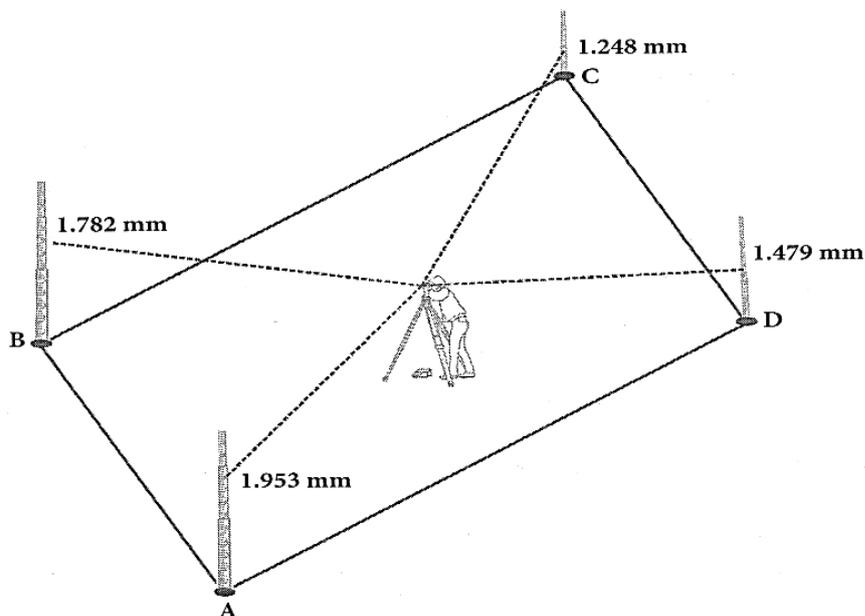
3.3.5 Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão

Dá-se o nome de nivelamento geométrico ao método de determinação das diferenças de altitudes ou de cotas entre pontos a partir da medição da distância vertical entre cada um deles e um plano horizontal de referência, gerado por intermédio de um instrumento topográfico denominado de nível (SILVA e SEGANTINE, 2015). Ainda neste sentido, de acordo com a NBR 13133 (ABNT,

1994), entende-se por nivelamento geométrico, o método que determina a diferença de nível entre pontos do terreno através de visadas horizontais, obtidas com um nível, em miras colocadas verticalmente nos referidos pontos. Devido à sua alta acurácia, é o método de nivelamento mais empregado na engenharia.

O nivelamento geométrico tradicionalmente é subdividido como nivelamento geométrico simples e nivelamento geométrico composto. Para o primeiro caso, faz-se necessária apenas uma instalação do nível sobre o terreno e a partir desta estação são realizadas visadas aos demais pontos de interesse. Na prática as aplicações do nivelamento geométrico simples são bem específicas e limitadas a pequenas distâncias e pequenos desníveis, os desníveis nesse caso são determinados pela diferença entre os valores lidos nas miras instaladas sobre os pontos de interesse. A Figura 16 ilustra a aplicação do método.

Figura 16– Nivelamento geométrico simples.

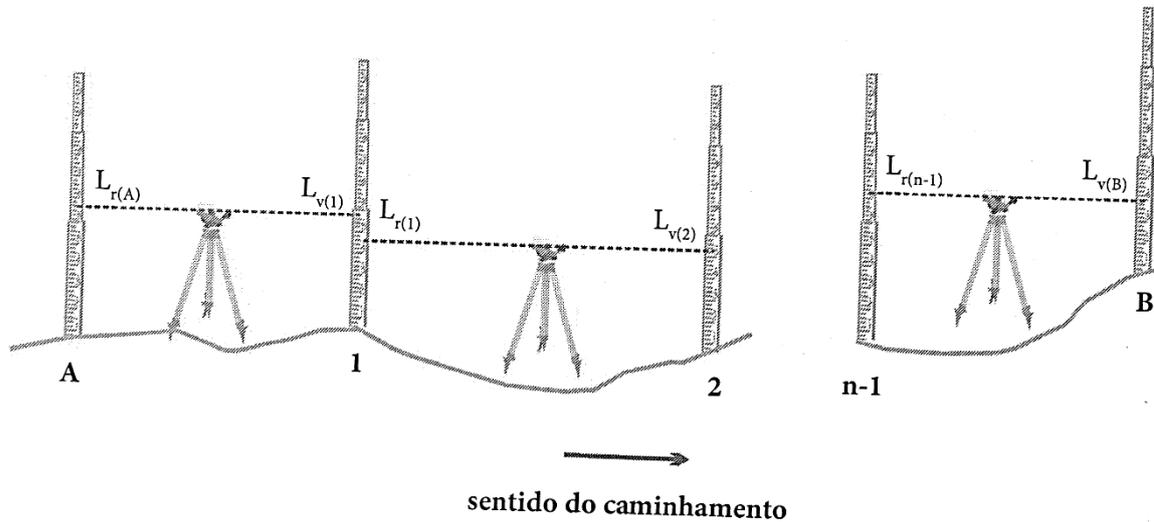


Fonte: Silva e Segantine (2015).

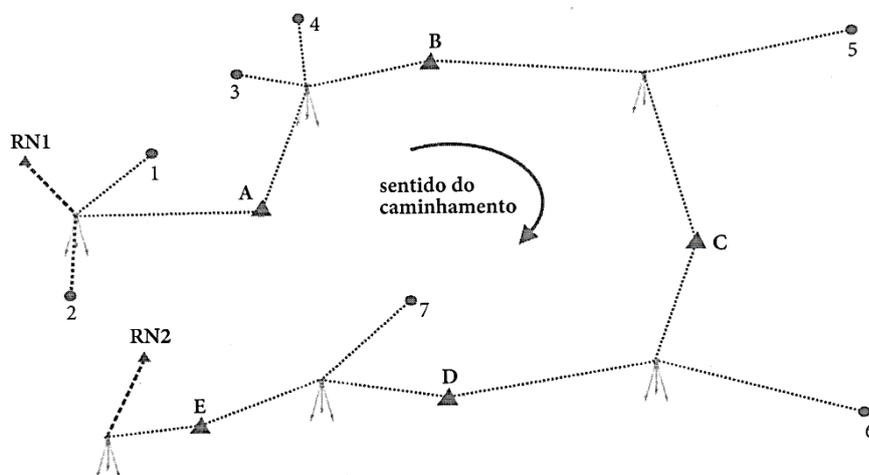
Por outro lado, o nivelamento geométrico composto é bem mais utilizado, nesse tipo de levantamento são necessárias várias instalações do nível no terreno ao longo do trecho a ser nivelado. De acordo com Silva e Segantine (2015), aplica-se este tipo de nivelamento nos casos onde os desníveis no terreno são acentuados ou os pontos extremos do terreno estão distantes entre si. Ainda segundo os autores neste tipo de nivelamento o operador do instrumento pode se deslocar seguindo um caminhamento simples, onde são visados apenas um ponto de ré e

outro de vante para cada instalação do nível, ou optar por um deslocamento em caminhamento misto, no qual realiza-se mais de uma visada a vante para mesma estação ocupada. A Figura 17 (A) e 17 (B) ilustra o nivelamento geométrico, aplicado de acordo com seus respectivos caminhamentos.

Figura 17– Nivelamento geométrico.



(A) Nivelamento geométrico composto por caminhamento simples.



(B) Nivelamento geométrico composto.

Fonte: Silva e Segantine (2015).

Na Figura 17 (B) têm-se que os pontos de vante fora do sentido do caminhamento apresentados são denominados de pontos irradiados, enquanto os pontos pertencentes ao caminhamento são chamados de pontos de mudança. O cálculo da altitude de um ponto irradiado é realizado, levando-se em consideração a

leitura da estação ré correspondente e não podem ser compensados, uma vez que não é possível controlar seus erros (SILVA e SEGANTINE, 2015).

O cálculo do desnível através do nivelamento geométrico é realizado de acordo com a Equação 21.

$$\Delta H_{AB} = \Sigma L_r - \Sigma L_v \quad (21)$$

Em que:

ΔH_{AB} = desnível entre pontos A e B;

ΣL_r = somatório das leituras à ré;

ΣL_v = somatório das leituras à vante.

No que tange à qualidade dos dados advindos de um nivelamento geométrico a NBR 13133 (ABNT, 1994), afirma que o fechamento de circuito ou linhas, formados por duplo nivelamento, conectando estações de altitudes conhecidas expressa a exatidão do apoio topográfico altimétrico. O ajustamento de redes de nivelamento geométrico, onde os circuitos ou linhas se cruzam, formando nós, considera como o valor mais provável de altitude a média ponderada dos valores calculados através das linhas ou circuitos que nele convergem, tendo atenção ao comprimento. Ainda segundo a NBR 13133 (ABNT, 1994), em redes de nivelamento mais complexas é recomendado o emprego do MMQ. A tolerância altimétrica e a precisão alcançada em um nivelamento geométrico são definidas pelas Equações 22 IBGE (2017) e 23 Silva e Segantine (2015).

$$\text{Tolerância Altimétrica} = 3 \times p \sqrt{k} \quad (22)$$

$$s = \sqrt{\frac{e_n^2}{2d}} \quad (23)$$

Em que:

s = precisão do nivelamento dado em mm/km;

e^n = erro de fechamento do nivelamento em mm;

d = comprimento do trecho nivelado, em km;

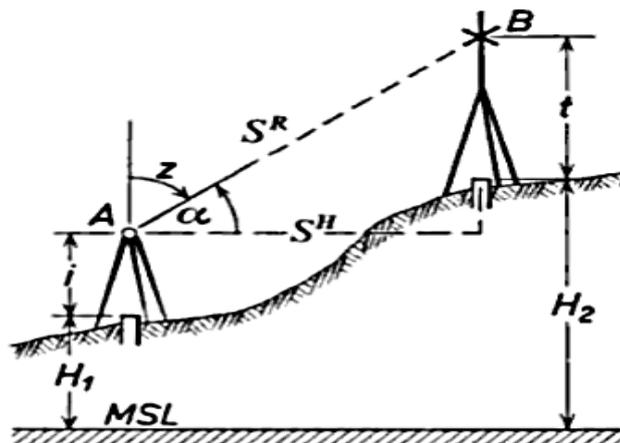
p = precisão nominal do equipamento, em mm;

K = perímetro em quilômetros percorrido durante trajeto de nivelamento e contranivelamento.

3.3.6 Nivelamento Trigonométrico com Correções dos Efeitos da Curvatura Terrestre e da Refração Atmosférica

O nivelamento trigonométrico é um procedimento que consiste em realizar a medida da diferença de nível entre pontos topográficos por intermédio de leituras correspondentes a visadas inclinadas, realizadas com taqueômetros ou estação total, por meio de medidas de distâncias e ângulos verticais, conforme Figura 17 (ERBA *et al.*, 2005). Para distâncias curtas, o desnível entre os pontos A e B da Figura 18 pode ser calculado através da Equação 24.

Figura 18– Nivelamento Trigonométrico.



Fonte: Kahmen e Faig (1988).

$$\Delta H_{AB} = D' \cdot \cos Z + (h_i - h_s) \quad (24)$$

Em que:

S^R = distância inclinada;

i = altura do equipamento;

t = altura do prisma refletor;

z = ângulo zenital;

S^H = distância horizontal;

M.S.L = Nível médio dos mares;

H_1 = altitude de A;

H_2 = altitude de B;

α = ângulo vertical de altura.

O grau de acurácia obtido através deste método depende essencialmente dos ângulos e distância medidos, das alturas do instrumento e do alvo, assim como dos efeitos da refração atmosférica e curvatura terrestre. Os erros nas coletas das alturas instrumentais são independentes da distância e podem apresentar em distâncias curtas, importantes correções. Por outro lado, a influência dos erros angulares e da refração atmosférica aumentam de uma maneira inversamente proporcional à distância (RESNIK e BILL, 2003 *apud* SOUZA, 2012).

É importante frisar que, na prática, a Equação 23 é aplicável somente em casos onde as distâncias entre os pontos extremos do nivelamento são pequenas o suficiente para que se possa desprezar os efeitos da curvatura terrestre e da refração atmosférica. Na Tabela 1 apresenta-se os efeitos da curvatura terrestre para distâncias de 100 m – 10 km, conforme disposto em Kahmen e Faig (1988), levando-se em consideração a Equação 25.

$$c_1 = \frac{S^2}{2R} \quad (25)$$

Em que:

c_1 = correção devido a curvatura terrestre;

S = distância Horizontal;

R = raio médio da terra.

Tabela 1 – Correção da Curvatura Terrestre para Distâncias de 100 m – 10 km.

Distância (m)	Correção da Curvatura (m)
100	0,0008
200	0,0032
500	0,0200
1000	0,0790
5000	1,9600
10000	7,9000

Fonte: Kahmen e Faig (1988).

Através da análise da Tabela 1 é possível enxergar que em nivelamento com distâncias de até 500 metros e com precisão exigida de até 2 cm, pode-se desprezar os efeitos da curvatura terrestre, no entanto, para garantir precisões na ordem de 1 mm não se deve ter distâncias superiores a 100 m.

O efeito da refração atmosférica c_2 , por outro lado, é calculado pela Equação 26, onde o valor de k comumente adotado é de 0,13, determinado empiricamente por Gauss em Hannover (Alemanha). No entanto, de acordo com Kahmen e Faig (1988), este valor irá depender da densidade do ar, que por sua vez é calculada em função da temperatura, pressão e umidade, sendo deste modo o valor de k influenciado pelo grau de proximidade com diferentes formatos de terreno, vegetações, dentre outras variáveis complexas.

$$c_2 = k \frac{S^2}{2R} \quad (26)$$

Em que:

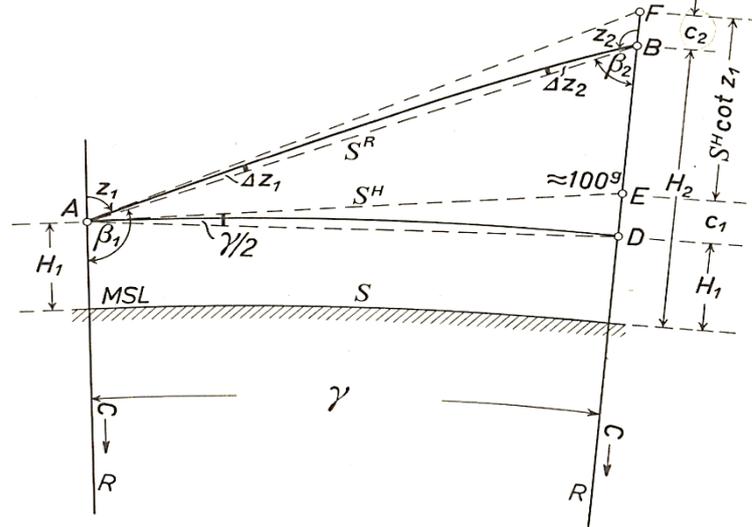
k = coeficiente de refração.

Nota-se na Equação 26 que, como o valor da correção da refração tende a crescer com o quadrado da distância, variações sensíveis neste valor de k podem representar correções consideráveis à precisão do projeto. Em Garnés (2018), é realizada uma discussão ampla a respeito do conceito e da dedução das equações de distâncias horizontais e diferenças de nível utilizadas de maneira automática em estações totais disponíveis no mercado.

Ainda em Garnés (2018), é realizada a dedução e a comparação das equações do ângulo de refração, da curvatura da terra, da distância horizontal, da geodésica, da corda e da diferença de nível em relação as formulações disponíveis em estações totais, chegando o autor a conclusão de que uma diferença de 1000 metros no raio da esfera representativa da forma da Terra, não traz implicações de perda de precisão nos cálculos da distância horizontal e diferença de nível. Todavia foi verificado que a partir de 10 km na medida da distância já se deve ter cautela no uso dos elementos calculados pelas aproximações nas fórmulas disponíveis em estações totais (GARNÉS, 2018).

Na Equação 27 apresenta-se a formulação do nivelamento trigonométrico considerando as correções da curvatura terrestre e da refração, considerando a Figura 19.

Figura 19 – Efeito da curvatura e da refração no nivelamento trigonométrico.



Fonte: Kahmen e Faig (1988).

$$\Delta H_{AB} = S^H \cot Z_1 + \left(\frac{S}{2R} - k \frac{S^2}{2R} \right) \quad (27)$$

Em que:

Z_1 = ângulo zenital do alinhamento AB;

Z_2 = ângulo zenital do alinhamento BA;

β_1 = ângulo vertical do alinhamento AB;

β_2 = ângulo vertical do alinhamento BA;

ΔZ_1 = redução ângulo zenital Z_1 ;

ΔZ_2 = redução ângulo zenital Z_2 ;

c_2 = correção devido a refração atmosférica;

H_1 = altitude do ponto A;

H_2 = altitude do ponto B;

R = raio médio da terra;

γ = ângulo no centro da terra;

MSL = Nível médio dos mares.

Uma das estratégias adotadas para minimização dos efeitos da curvatura terrestre e da refração atmosférica é a aplicação do nivelamento trigonométrico com visadas recíprocas, neste tipo de nivelamento são instalados prismas adicionais ao lado de cada instrumento de modo que possam ser realizadas leituras recíprocas e simultâneas entre os pontos, detalhes adicionais sobre este método podem ser encontrados em Silva e Segantine (2015).

3.3.7 Verificação e Ajuste de Equipamentos Topográficos

Fundamentalmente os equipamentos topográficos/geodésicos que foram utilizados nesta dissertação são: as estações totais e o nível digital. É de suma importância garantir que estes equipamentos forneçam dados precisos e acurados acerca das observações que são realizadas, pois isso é fundamental para o sucesso de qualquer projeto, nos quais eles serão utilizados.

De acordo com Faggion (2011), em qualquer trabalho de coleta de dados no campo, em especial para trabalhos que buscam resultados com precisão, é essencial que os instrumentos de medição estejam verificados, se necessário retificados, classificados e calibrados, para que se possa alcançar a precisão exigida. Nesse sentido, os principais erros instrumentais que afetam a precisão e acurácia dos dados coletados são:

- a) Verticalidade do eixo principal;
- b) Erro de colimação ou linha de visada;
- c) Erro de inclinação do eixo secundário;
- d) Erro de zênite;
- e) Excentricidade do limbo;
- f) Erro de desvio do compensador;
- g) Erro de desvio da vertical;
- h) Erro de zero;
- i) Fator de Escala;
- j) Prumo Óptico.

Tais erros podem ser corrigidos ou compensados através de modelagens matemáticas ou de retificações e calibrações. Mais detalhes acerca destes tipos de

erros podem ser consultados em (ESPARTEL, 1987; FAGGION, 2011; SILVA e SEGANTINE, 2015).

3.3.7.1 Verificação e Ajuste de Níveis de Luneta

Os níveis são os equipamentos utilizados para determinar o desnível entre diferentes pontos. A utilização deste equipamento em obras de Engenharia exige que os mesmos propiciem o nível de acurácia e precisão indicados por seus fabricantes. De acordo com a NBR 13133 (ABNT, 1994), os níveis são classificados segundo desvio padrão de 1 km de duplo nivelamento, conforme Quadro 3.

Quadro 3 – Classificação dos Níveis.

Classes de Níveis	Desvio Padrão
1 – Precisão Baixa	$>\pm 10\text{mm/km}$
2 – Precisão Média	$\leq\pm 10\text{mm/km}$
3 – Precisão Alta	$\leq\pm 03\text{mm/km}$
4 – Precisão Muito Alta	$\leq\pm 1\text{mm/km}$

Fonte: NBR 13133 (ABNT, 1994).

Além das classes apresentadas no Quadro 3, a ISO 17123-2 (ISO, 2001) apresenta uma classificação de níveis mais adequada ao contexto internacional, conforme exposto no Quadro 4.

Quadro 4 – Classificação dos níveis conforme ISO 17123-2.

Classes de Níveis	Desvio Padrão
1 – Baixa precisão	$>\pm 10\text{mm/km}$
2 – Média precisão	$\leq\pm 10\text{mm/km}$
3 – Alta precisão	$\leq\pm 03\text{mm/km}$
4 – Muito alta precisão	$\leq\pm 1\text{mm/km}$
5 – Altíssima precisão	$\leq\pm 0,5\text{ mm/km}$

Fonte: ISO (2001).

Os critérios de qualidade exigidos para os levantamentos, tanto legalmente, através de normas e especificações técnicas, quanto do ponto de vista da qualidade dos resultados obtidos, tornam necessárias à realização de operações de verificação e retificação nos níveis (BRUM, 2005).

Nesta dissertação foi utilizado um nível de altíssima precisão durante as operações de campo, que envolveram a determinação de referenciais altimétricos. Antes do início destas etapas foram realizadas verificações e retificações neste

instrumento, através das recomendações da norma 17123-2 (ISO, 2001) apresentadas no subitem 3.3.7.2 e da aplicação do método de Kukkamäki, conforme subitem 3.3.7.3.

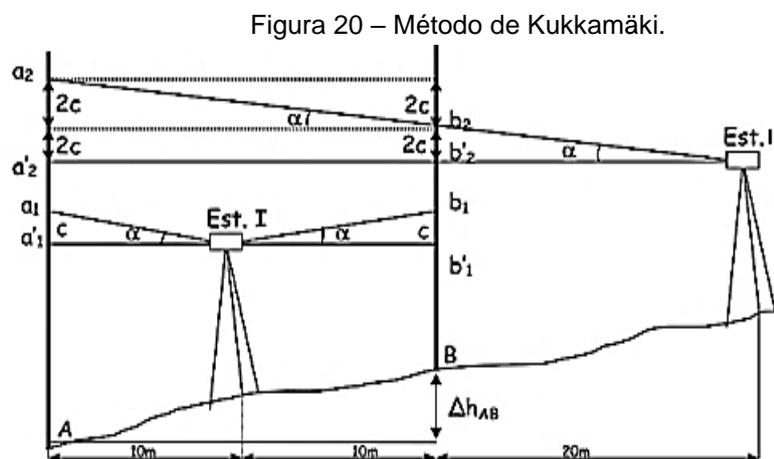
3.3.7.2 ISO 17123 – 2: 2001

A *International Organization for Standardization* (ISO) é um órgão de abrangência mundial que estabelece normas de certificação para diversas atividades. A norma 17123-2 (ISO, 2001) especifica os procedimentos de campo a serem adotados para a avaliação e determinação da precisão de níveis e seus equipamentos auxiliares empregados em levantamentos topográficos e geodésicos. A norma descreve um procedimento simplificado e outro completo para que o equipamento tenha a sua precisão aferida.

Neste trabalho, seguiram-se as especificações da norma ISO 17123-2 (ISO, 2001), que tratavam sobre o teste completo. Utilizou-se o nível digital Leica DNA-03 com uma precisão de 0,3 mm/km, especificada pelo fabricante. Detalhes acerca da aplicação do método completo em campo podem ser vistos em ISO 17123-2 (ISO, 2001), Brum (2005), Silva (2017), Santos (2017) e Santos *et al.* (2018).

3.3.7.3 Método de Kukkamäki

O método de Kukkamäki é um procedimento que visa a correção do erro de colimação, tal erro ocorre quando a linha de colimação do nível não está exatamente na horizontal, com base na Figura 20 os procedimentos descritos em Kahmen e Faig (1988) e Faggion (2011) são indicados a seguir.



Fonte: Kahmen e Faig (1988).

O nível é instalado entre dois pontos A e B, com distância de 10 m para ré e vante e procede-se com as respectivas leituras. Estas leituras conterão o erro de colimação vertical do nível iguais, por estarem a distâncias iguais, representado por c;

No passo seguinte, instala-se o nível a 20 m de B e 40 m de A, e procede-se a leitura. As leituras obtidas conterão erros proporcionais à distância da mira;

Percebe-se pela Figura 20 que o erro embutido na leitura a_2 será equivalente a $4c$, enquanto que na leitura b_2 terá um erro embutido de $2c$ e com base nessas informações é possível determinar o valor do erro c , conforme Equações 28 a 32.

$$a_2 = \Delta h_{AB} + b_2 + 2c \quad (28)$$

$$a_1 = \Delta h_{AB} + b_1 \quad (29)$$

$$\Delta h_{AB} = a_1 - b_1 \quad (30)$$

O resultado da combinação das Equações 28 e 29 em termos da Equação 30, resulta na Equação 31. O valor do erro de colimação é dado pela Equação 32.

$$a_2 = a_1 - b_1 + b_2 + 2c \quad (31)$$

$$2c = (a_2 - b_2) - (a_1 - b_1) \quad (32)$$

Em que:

c = erro de colimação vertical;

Δh_{AB} = desnível entre os pontos A e B;

a_1 = leitura efetuada na mira posicionada no ponto A, no momento em que o nível estava estacionado entre A e B;

a_2 = leitura efetuada na mira posicionada no ponto A, no momento em que o nível estava estacionado a 40 metros de distância da mira posicionada em A;

b_1 = leitura efetuada na mira posicionada no ponto B, no momento em que o nível estava estacionado entre A e B;

b_2 = leitura efetuada na mira posicionada no ponto B, no momento em que o nível estava estacionado a 40 metros de distância da mira posicionada em A.

Os fios do retículo devem ser deslocados de modo que as leituras estejam conforme Equações 33 e 34.

$$a'_1 = a_2 - 4c \quad (33)$$

$$b'_2 = b_2 - 2c \quad (34)$$

Em que:

a'_1 = leitura que teoricamente teria de ser observada no ponto A, sem a influência do erro de colimação do nível, no momento em que a régua está estacionada entre A e B;

b'_2 = leitura que teoricamente teria de ser observada no ponto B, sem a influência do erro de colimação do nível, no momento em que a régua está estacionada entre A e B;

Após checagem final, os valores obtidos devem estar conforme Equação 35.

$$a_1 - b_1 = a'_2 - b'_2 = \Delta h_{AB} \quad (35)$$

4. AJUSTAMENTO DAS OBSERVAÇÕES E CONTROLE DE QUALIDADE DAS ESTRUTURAS GEODÉSICAS

Neste capítulo serão apresentados os principais fundamentos envolvidos no ajustamento das observações pelo modelo paramétrico do MMQ, os testes de hipóteses empregados para a identificação de erros nas observações, a estimativa das precisões dos parâmetros ajustados através da lei de propagação de covariâncias e alguns dos procedimentos adotados em campo para o controle da qualidade dos dados advindos da aplicação dos métodos de levantamentos expostos no Capítulo 3.

4.1 MMQ - MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS

De acordo com Gemael (1994), na aplicação do Método dos Mínimos Quadrados - MMQ utilizando o modelo paramétrico, deve-se tomar como melhor estimativa para um valor x , o valor que torna mínima a soma dos quadrados dos resíduos. Caso as observações não forneçam o mesmo grau de confiança devem ser homogeneizadas pelos seus respectivos pesos, conforme Equações 36 e 37.

$$\sum_{i=1}^n (v_i^2) = \min \quad (36)$$

$$\sum_{i=1}^n (p_i v_i^2) = \min \quad (37)$$

Em que:

v_i = resíduo entre o valor definido como correto e o valor observado;

p_i = peso atribuído a cada observação.

4.1.2 MMQ – Modelo Paramétrico

No ajustamento das observações as grandezas que não são obtidas diretamente recebem o nome de parâmetros e os seus cálculos envolvem a obtenção de grandezas geométricas como ângulos e distâncias (GHILANI, 2010).

Segundo Gemael (1994), quando os valores observados ajustados podem ser expressos explicitamente como uma função dos parâmetros ajustados, isto é,

quando se verifica um modelo matemático, conforme Equação 38, o ajustamento se processa pelo modelo paramétrico.

$$L_a = F(X_a) \quad (38)$$

Em que:

L_a = vetor dos valores observados ajustados;

X_a = vetor dos parâmetros ajustados.

4.1.2.1 Equações de Observação

Equações que relacionam os valores observados aos resíduos observacionais são chamadas de equações de observação. Uma equação deve ser escrita para cada observação e para um único conjunto de incógnitas. Quando há mais observações, (portanto, mais equações) do que incógnitas, é possível obter o valor mais provável para cada incógnita utilizando o MMQ (GHILANI, 2010).

As equações de observação para o modelo paramétrico podem ser encontradas em Gemael (1994) e Ghilani (2010), sendo apresentadas nesta dissertação pelas Equações 39 a 48. O modelo paramétrico é dado pela Equação 38.

Em que:

$$L_a = L_b + V \quad (39)$$

$$X_a = X_0 + X \quad (40)$$

Em que:

L_a = vetor das observações ajustadas;

X_a = vetor dos parâmetros ajustados;

V = vetor dos resíduos.

Substituindo as Equações 39 e 40 na Equação 38 e linearizando com série de Taylor, obtém-se a Equação 41:

$$L_b + V = F(X_0 + X) = F(X_0) + \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_a = X_0} X \quad (41)$$

Em que:

L_b = vetor dos valores observados;

L_0 = vetor das observações iniciais em função dos parâmetros iniciais;

X = vetor correção;

X_0 = vetor dos parâmetros iniciais.

Designando a função dos parâmetros aproximados por L_0 e a matriz das derivadas parciais por A , conforme Equações 42 e 43.

$$L_0 = F(X_0) \quad (42)$$

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_a = X_0} \quad (43)$$

Substituindo as Equações 42 e 43 na Equação 41, obtém-se a Equação 44:

$$L_b + V = L_0 + AX \quad (44)$$

Reorganizando os termos e adotando a relação expressa pela Equação 43, o modelo matemático linearizado do modelo paramétrico é expresso pela Equação 45. O vetor dos resíduos é apresentado nas Equações 46 e 47.

$$L = L_0 - L_b \quad (45)$$

$$V = AX + L_0 - L_b \quad (46)$$

$$V = AX + L \quad (47)$$

4.1.2.2 Equações Normais

Ao minimizar-se a forma quadrática fundamental, conforme Gemael (1994), obtém-se a Equação 48.

$$\phi = V^T P V = (AX + L)^T P (AX + L) = \min \quad (48)$$

Igualando a zero a derivada primeira em relação à X na Equação 48, obtêm-se a Equação 49.

$$X = -(A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (49)$$

Assume-se que o vetor X (Equações 49 e 52) pode ser expresso em função dos vetores N e U, representados nas Equações 50 e 51.

$$N = A^T P A \quad (50)$$

$$U = A^T P L \quad (51)$$

$$X = -N^{-1} U \quad (52)$$

Os parâmetros e as observações ajustadas são vistos, respectivamente, nas Equações 53 e 54.

$$X_a = X_0 + X \quad (53)$$

$$L_a = L_b + V \quad (54)$$

No ajustamento de dados advindos de levantamentos geodésicos/topográficos a precisão posicional dos pontos é adquirida através da Matriz Variância Covariância – MVC dos parâmetros ajustados Σ_{X_a} , enquanto a precisão adquirida com o ajuste dos valores observados ajustados é dada pela MVC dos valores observados ajustados Σ_{L_a} , conforme Equações 55 e 56, respectivamente.

$$\Sigma_{X_a} = \Sigma_X = \sigma_0^2 N^{-1} \quad (55)$$

$$\Sigma_{L_a} = \sigma_0^2 A N^{-1} A^T \quad (56)$$

O desenvolvimento completo das equações apresentadas nesta seção pode ser visto em Gemael (1994).

4.2 CONTROLE DE QUALIDADE DE UMA ESTRUTURA GEODÉSICA

Diversas são as aplicações nas quais as estruturas geodésicas são utilizadas, como por exemplo no monitoramento de estruturas da construção civil (SILVA, 2015 e SILVA *et al.*, 2015), nos levantamentos cadastrais urbanos (GAMA, 2008 e GAMA,

SEIXAS e SOUZA 2012), no estabelecimento de padrões de referência metrológica (SILVA, 2017; SILVA e SEIXAS, 2017; SILVA e SEIXAS, 2019), no monitoramento de encostas (RHADAMEK, 2008; RHADAMEK e SILVA, 2012), dentre outras.

Diante da importância dos dados fornecidos pela observação de redes geodésicas é fundamental que se tenha confiança no que diz respeito a qualidade dos resultados encontrados. De acordo com Klein *et al.* (2012), ao se projetar e levantar uma rede geodésica, deseja-se que as coordenadas estimadas para os pontos atinjam um critério de precisão pré-estabelecido de acordo com os objetivos do projeto, e, além disso, que se possa ter uma medida da dimensão da influência de possíveis erros não detectados nas observações sobre os valores estimados para as coordenadas dos pontos.

Antes mesmo da realização das observações necessárias para a materialização de redes geodésicas é possível determinar especificações ótimas, necessárias e suficientes, para o levantamento de modo a produzir parâmetros com a qualidade mínima desejada e pré-estabelecida (DALMOLIN, 2002). Esta etapa é conhecida como pré-análise ou otimização de um levantamento.

Alguns dos procedimentos adotados em campo nesta dissertação e estabelecidos e aplicados também em pesquisas anteriores, visando garantir a qualidade das estruturas geodésicas são expostas no Quadro 5.

Quadro 5 – Controle de Qualidade de Estruturas Geodésicas.

Rede Geodésica Altimétrica	Rede Geodésica Planialtimétrica
a) Verificação e retificação de níveis digitais adotando-se normas internacionais;	a) Verificação e retificação de estações totais.
b) Estabelecimento de um limite para a amplitude do conjunto das observações coletadas em campo (0,06 mm), valores superiores a este limite foram desconsiderados;	b) Correção dos efeitos da curvatura terrestre e da refração atmosférica.
c) Cálculos de erros de fechamento dos circuitos de nivelamento geométrico aplicados;	c) Utilização do método das direções com a aplicação de no mínimo duas séries de leituras conjugadas.
d) Utilização de visadas equidistantes;	d) Emprego de centragem forçada.
e) Adoção de duas séries de leituras compostas por cinco observações.	

Fonte: O Autor (2020).

4.2.1 Teste de Hipóteses Baseado na Distribuição Qui-Quadrada - χ^2

De acordo com Gemael (1994), pode-se valer de um teste de hipóteses baseado na distribuição χ^2 para estimar se a discrepância entre σ_0^2 (variância da unidade de peso a *priori*) e $\widehat{\sigma_0^2}$ (variância da unidade de peso a *posteriori*) é significativa a certo nível de confiança. Os testes de hipóteses são caracterizados pela formulação de uma hipótese nula H_0 e uma hipótese alternativa H_1 , tal que $H_1 \neq H_0$. Com base em uma amostra aleatória extraída da população é possível testar a hipótese nula a fim de concluir sobre sua aceitação ou não. Acatar o resultado da aplicação pode ou não incorrer em erro, sendo possível a ocorrência de quatro possibilidades de acordo com Gemael (1994), sendo elas:

- a) Aceitação de uma hipótese realmente verdadeira;
- b) Rejeição de uma hipótese realmente verdadeira (I);
- c) Rejeição de uma hipótese realmente falsa;
- d) Aceitação de uma hipótese realmente falsa (II).

O erro caracterizado I é denominado de TIPO I (ou erro alfa) e é representado pela Equação 57. A probabilidade máxima admitida para correr o risco de um erro do tipo I é denominada nível de significância α (GEMAEL, 1994). O nível de significância deve ser fixado a *priori* e nesta dissertação, considerou-se o valor de 5%.

$$\alpha = P(\text{rejeitar } H_0 | H_0 \text{ verdadeira}) \quad (57)$$

O erro do TIPO II ou erro β tem sua relação expressa através da Equação 58:

$$\beta = P(\text{aceitar } H_0 | H_0 \text{ falsa}) \quad (58)$$

A probabilidade de se tomar a decisão correta através da aplicação de um teste de hipóteses é denominada poder ou potência do teste (GEMAEL, 1994). As hipóteses mais empregadas nas literaturas são apresentadas nas Equações 59 e 60:

Hipótese básica

$$H_0: \sigma^2 = \sigma_e^2 \quad (59)$$

Hipótese alternativa (Teste bilateral).

$$H_0: \sigma^2 \neq \sigma_e^2 \quad (60)$$

O valor do Qui-quadrado (χ^2) pode ser calculado através da Equação 61.

$$\chi_c^2 = \frac{u\widehat{\sigma^2}}{\sigma_e^2} \quad (61)$$

Em que:

$\widehat{\sigma^2}$ – Variância amostral a posteriori;

σ_e^2 – Variância da população a priori;

u – Número de graus de liberdade.

Através da utilização da tabela do Qui-quadrado são extraídos os valores teóricos $\chi_{v, \frac{\alpha}{2}}^2$ e $\chi_{v, 1 - \frac{\alpha}{2}}^2$, a hipótese nula é rejeitada ao nível de significância α se $\chi_c^2 \leq$

$$\chi_{v, \frac{\alpha}{2}}^2 \text{ ou } \chi_c^2 \geq \chi_{v, 1 - \frac{\alpha}{2}}^2.$$

5 EXPERIMENTOS E ANÁLISES METODOLÓGICAS

Neste capítulo será abordada a metodologia, a aplicação dos métodos de levantamentos em campo e os procedimentos utilizados, acerca dos experimentos de campo realizados em duas áreas de estudo distintas, descritas no item 5.1. Antes dos levantamentos de campo foram aplicados os métodos de verificação e retificação de nível digital e estação total para a realização dos Métodos Terrestres de Medição - MTM e definição de um Sistema Geodésico de Monitoramento (SGM).

Dentre os métodos de verificação e retificação utilizados destacam-se o Método de Kukkamäki conforme item 3.3.7.3, a aplicação do método completo da norma ISO 17123-2 conforme item 3.3.7.2, e as verificações dos limbos horizontais e verticais de estações totais conforme item 3.3.7. Ao passo que dentre os Métodos Terrestres de Medição utilizados destacam-se o nivelamento geométrico de altíssima precisão, nivelamento trigonométrico com a correção dos efeitos da curvatura terrestre e da refração atmosférica, interseção a ré, interseção a vante, triangulateração, irradiação 3D simples, dupla e tripla. Os métodos que envolvem a utilização de estações totais foram realizados através de centragem forçada.

5.1 ÁREA DE ESTUDO

Nesta seção são apresentadas as características, motivos e peculiaridades das duas áreas de estudo utilizadas na realização de experimentos e aquisição de dados.

5.1.1 Área de Estudo 1 – *Campus Recife da Universidade Federal de Pernambuco*

No *Campus Recife* da UFPE foram realizadas operações de verificação e retificação dos equipamentos, especificamente no que diz respeito ao nível digital e às estações totais.

O *Campus Recife* da UFPE conta com a existência de uma base de verificação e retificação de níveis com extensão de 60 metros, implantada no projeto de pesquisa intitulado Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis - LITPEG CTG/UFPE, sob coordenação da Professora Dr^a. Techn. Andréa de Seixas. A base foi implantada na calçada do canteiro central da Av. da

Arquitetura, em frente ao prédio escolar do CTG e ao prédio do LITPEG. O procedimento de materialização da base foi realizado de acordo com orientações da norma ISO 17123-parte 2 (ISO, 2001). Uma ilustração da base pode ser visualizada na Figura 21.

Figura 21– Base de Verificação e Retificação de Níveis no *Campus Recife* da UFPE.



(A) vista em Perspectiva da área de estudo 1.

(B) vista aproximada da área de estudo 1.

Fonte: O Autor (2019).

Além da existência de uma base de verificação e retificação de níveis, o *Campus Recife* da UFPE também conta com a existência de um campo de pontos para a verificação de estações totais, localizado nos pilares do *hall* jardim do Núcleo Integrado de Atividades de Ensino pertencente ao Centro de Ciências Exatas e da Natureza e ao Centro de Tecnologia e Geociências NIATE/CCEN/CTG. Assim como a base de calibração de níveis o campo de pontos para a verificação de estações totais foi implantado durante o projeto de pesquisa Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis – LITPEG/CTG/UFPE. O procedimento de verificação e retificação de estações totais é ilustrado através da Figura 22 (A) e 22 (B).

Figura 22 – Verificação de estações totais no *hall* jardim NIATE/CCEN/CTG.



(A) instalação das estações totais em pontos fixos materializados no solo.

(B) Alvos adesivos e chapas metálicas fixadas nas pilastras do NIATE/CCEN/CTG.

Fonte: Canto (2018).

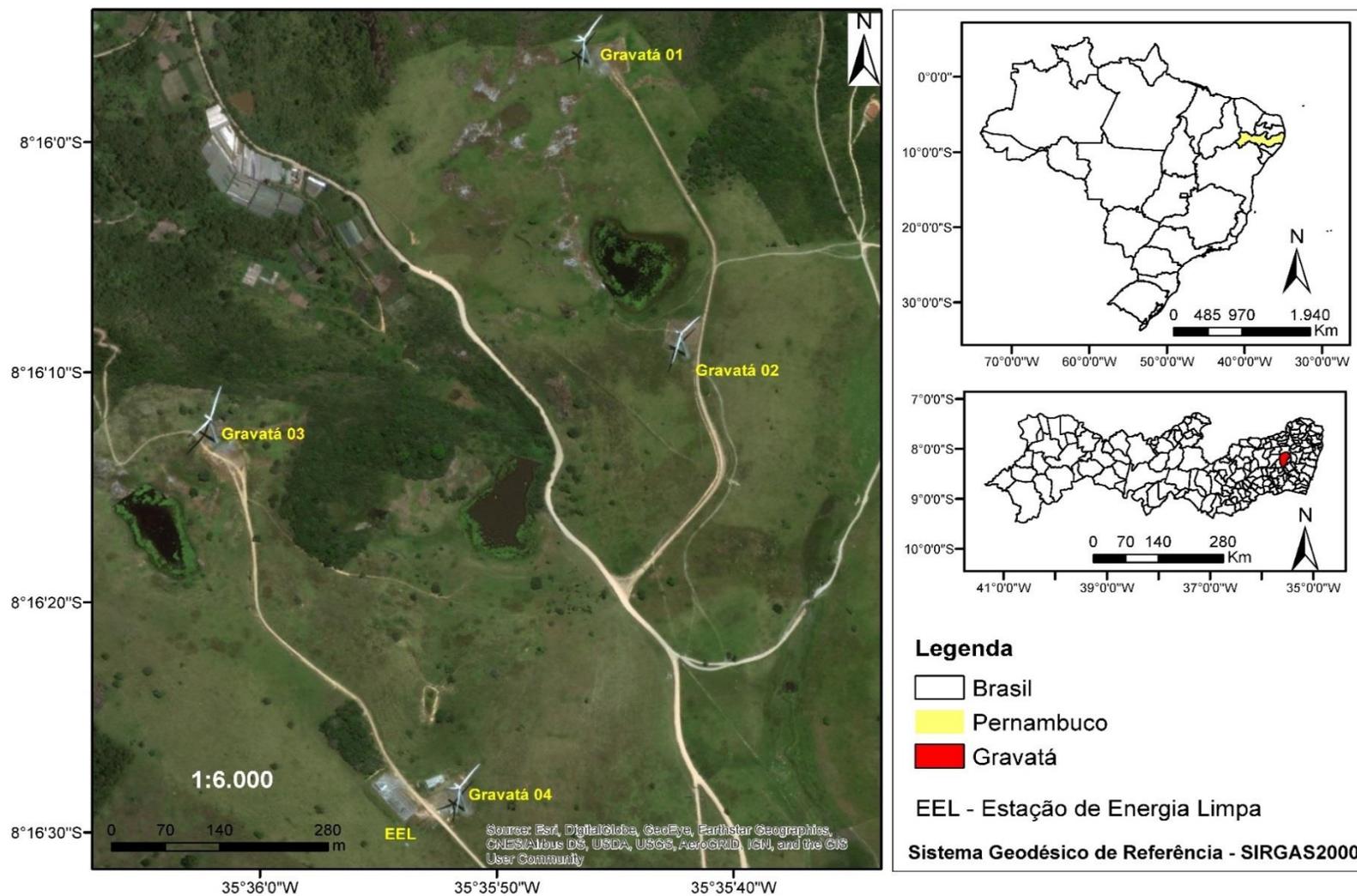
A base de verificação e retificação de níveis e o campo de pontos para verificação de estações totais foram implantados em projeto de pesquisa desenvolvido por Seixas e Seixas (2015) e apresentados em Silva (2017), Santos (2017) e Silva e Seixas (2017).

5.1.2 Área de estudo 2 - Parque Eólico Gravatá-PE Ltda.

No que diz respeito especificamente à área de estudo 2, o terreno sobre o qual está localizado o parque eólico da cidade de Gravatá – PE apresenta sob o ponto de vista do relevo, características interessantes para a aplicação de estudos voltados ao monitoramento de terrenos inclinados. No local é possível encontrar um solo com afloramentos rochosos, no qual, pôde-se materializar um campo de pontos de referência fixo com geometria adequada para a observação de pontos-objeto materializados em terreno inclinado em estado natural observado.

A área de estudo 2 contempla o parque eólico da cidade de Gravatá-PE, e está situado no entorno das torres eólicas denominadas pela empresa gestora do parque como, Gravatá 01, 02 e 03. Sendo assim, será possível dar continuidade às pesquisas de monitoramento de estruturas geodésicas em torres eólicas abordadas em Canto (2018), Canto *et al.* (2018), Canto e Seixas (2020) e as pesquisas desenvolvidas e apresentadas em Santos (2017), Santos, Seixas e Santos (2019) e Santos *et al.* (2018), através do aumento da escala temporal da rede altimétrica de monitoramento implantada, ampliando-se assim, nessa dissertação, a estrutura geodésica da área e direcionando a discussão para o monitoramento de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos. As pesquisas citadas integram os projetos de pesquisa: Monitoramento Geodésico de Estruturas: Edificações Prediais, Torres Eólicas e Solos Rochosos e Inclinados, Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis – LITPEG/CTG/UFPE – PROPESQ/UFPE e A Geodésia Aplicada à Discretização de Edificações Prediais e o Estabelecimento de Padrões de Referência Metrológica PROPESQ/UFPE. Nesta dissertação a área de estudo foi ampliada para envolver os terrenos rochosos e inclinados localizados entre as Torres Gravatá 01 e Gravatá 02, assim como a Torre Gravatá 03 localizada nas imediações da estação de geração de energia limpa. Uma visualização geral da área de estudo 2 é apresentada na Figura 23.

Figura 23 – Visualização geral da área de estudo 2



Fonte: O Autor (2020). *Elaborado a partir do software Arcgis Pro Free Trial.

Além das condições favoráveis de relevo encontradas no local, esta área de estudo também dispõe de uma rede geodésica constituída por pontos de referência implantados com receptores GNSS (L1 e LP3) e estações totais (LP3) no entorno da torre eólica Gravatá 02 e pontos-objeto implantados nos arredores das bases das torres eólicas Gravatá 01 e Gravatá 02 com nível digital de altíssima precisão, assim como pontos-objeto distribuídos na torre eólica Gravatá 02 para fins de monitoramento da torre Gravatá 02. Os pontos utilizados como referências planimétricas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Pontos de referência planimétrica pré-existentes na área de estudo 2.

Estação	X (m)	Y (m)	$\sigma_x(m)$	$\sigma_y(m)$	Sistema de Referência	Método
L1	150000,0000	250000,0000	$\pm 0,0060$	$\pm 0,0070$	SGL	GNSS Estático Método
L3	149881,5150	250130,9080	$\pm 0,0060$	$\pm 0,0070$	SGL	GNSS Estático Método
LP3	149938,5760	250112,5290	$\pm 0,0098$	$\pm 0,0114$	SGL	GNSS Estático Método

Fonte: Adaptado de Canto (2018).

As coordenadas apresentadas na Tabela 2 foram determinadas através de levantamentos GNSS a partir da aplicação do método relativo estático. Os vértices L3 e LP3 foram utilizados como alinhamento azimutal para a determinação de pontos de referência pelo método de poligonação, como pode ser observado em Canto (2018). Adotou-se como origem do Sistema Geodésico Local - SGL o vértice L1, conforme descrito em Canto (2018) e apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 –Coordenadas geodésicas em SIRGAS2000 do vértice L1, origem do SGL.

Estação	Latitude	Longitude	Altitude Elipsoidal	$\sigma_x(m)$	$\sigma_y(m)$	$\sigma_h(m)$
L1	8°16'12,80682"S	35°35'40,87108"W	775,428	$\pm 0,006$	$\pm 0,007$	$\pm 0,009$

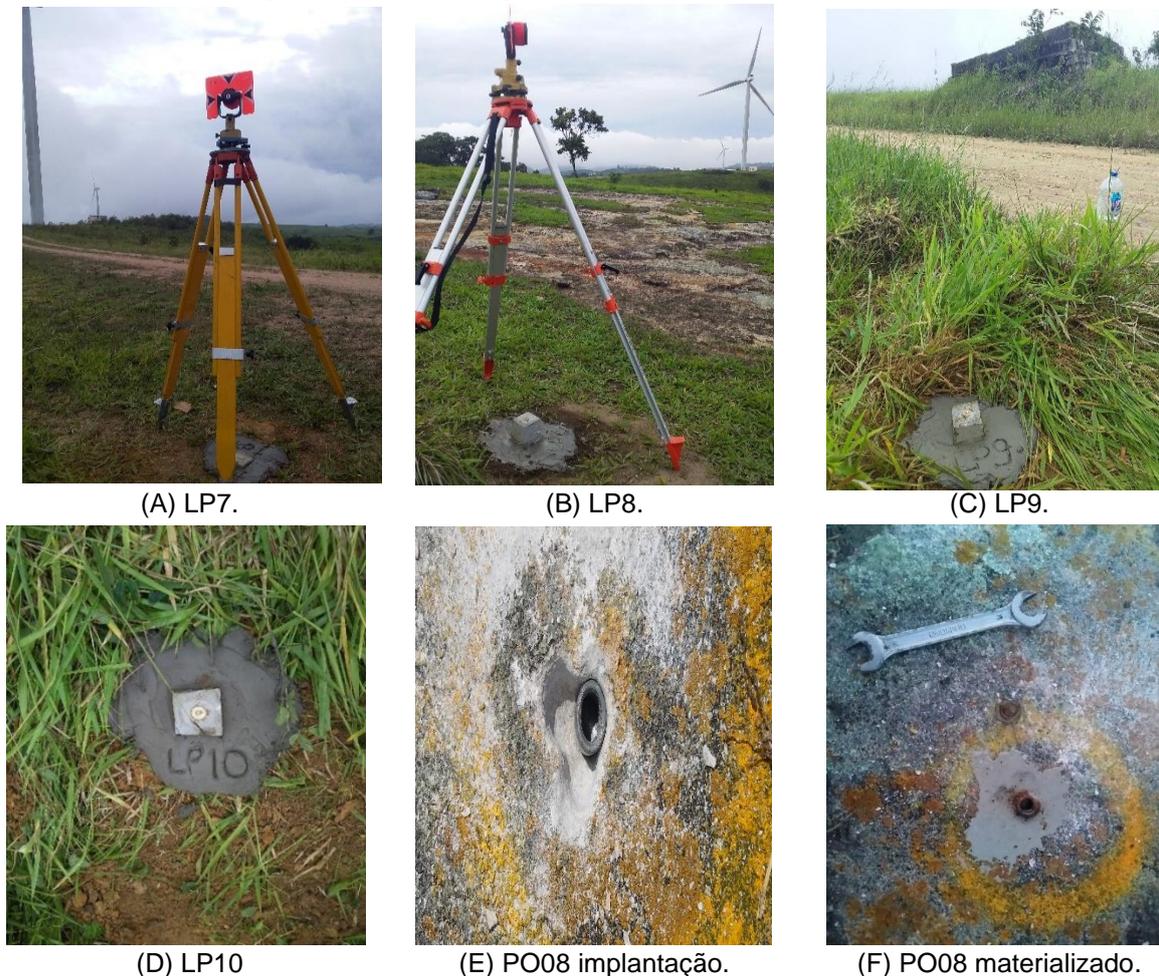
Fonte: Canto (2018).

No que diz respeito à rede de referência altimétrica da localidade, ressalta-se que não existem nas proximidades Referências de Nível como recomendadas em Seixas, Seixas e Seixas (2012) e Seixas, Seixas e Seixas (2009), nem mesmo hastes profundas com características de indeloscabilidade para servirem de referência altimétrica para o estudo de recalques. Sendo assim, nesta dissertação, adotou-se como referência altimétrica a cota do ponto PO08, com valor arbitrado em 1000 metros, implantado nesta dissertação em uma superfície rochosa localizada

nas imediações da torre eólica Gravatá 01. Além deste, foram implantados marcos geodésicos superficiais ao longo do percurso entre as duas torres, denominados LP7 e LP8, procurando-se assim, atestar com uma referência absoluta a variação nos desníveis entre as RRNN ao longo das observações executadas.

Essa pré-existência de uma rede geodésica facilitou a execução de alguns métodos de levantamentos topográficos/geodésicos. Sendo assim, a estrutura geodésica de referência planimétrica foi densificada através da adição de quatro novos vértices denominados nesta dissertação de LP7, LP8, LP9 e LP10 e da Referência de Nível PO08 implantada e fixada em afloramento rochoso próxima à torre Gravatá 01, conforme Figura 24 (A), (B), (C), (D) (E) e (F).

Figura 24 – Estrutura geodésica de referência planialtimétrica.



Fonte: O Autor (2019).

Tais vértices foram confeccionados conforme orientações para padronização de marcos geodésicos IBGE (2008) em um traço 1X3X3 (cimento, areia e brita) e

apresentam formato de tronco piramidal com 10 cm de aresta na face superior, 12 cm de aresta na face inferior e altura de 60 cm, no centro do topo destes marcos de concreto foram fixados pinos de latão com superfície semiesférica, respeitando-se a padronização da materialização dos marcos pré-existentes. Com relação a materialização de ponto em afloramento rochoso foram fixados parafusos com colas de concreto e fabricado peça de inox de adaptação de parafuso e mira vertical, conforme trabalhos de monitoramento de recalques executados em edifícios prediais (SEIXAS e SEIXAS, 2019).

5.2 MATERIAIS

Para a realização desta dissertação foram utilizados os seguintes equipamentos, acessórios e *softwares*:

- a) Estações totais *Topcon GPT-3200N*: precisão angular de $\pm 5''$ e precisão linear de $\pm (5\text{mm} + 5\text{ppm}\cdot D)$, classificada de precisão média de acordo com a NBR 13133 (ABNT, 1994);
- b) Nível digital *Leica DNA-03*, conforme Figura 25 (B): precisão de $\pm 0,3$ mm por duplo quilômetro nivelado, classificado de altíssima precisão de acordo com a ISO 17123-parte 2 (ISO, 2001);
- c) Mira de invar de código de barras (modelo Leica) de 2 m;
- d) Acessórios para o levantamento de campo, tais como: prismas circulares, folhas refletivas, bastões, tripés, suportes bastão – tripé, trenas, sapatas, fitas adesivas e apoio logístico, pinos de superfícies semiesféricas, pino de adaptação parafuso e mira, parafusos de roscas para adaptação dos prismas na rocha, cola de concreto, corpos piramidais de concreto, hastes metálicas, lanternas e chaves fixas, conforme Figura 25 (A), (B), (C) e (D).

Figura 25 – Acessórios de campo.



(A) Prisma óptico.



(B) Nível digital Leica DNA-03 e mira em código de barras.



(D) Conector prisma óptico e parafusos macho e fêmea.



(C) Haste metálica.

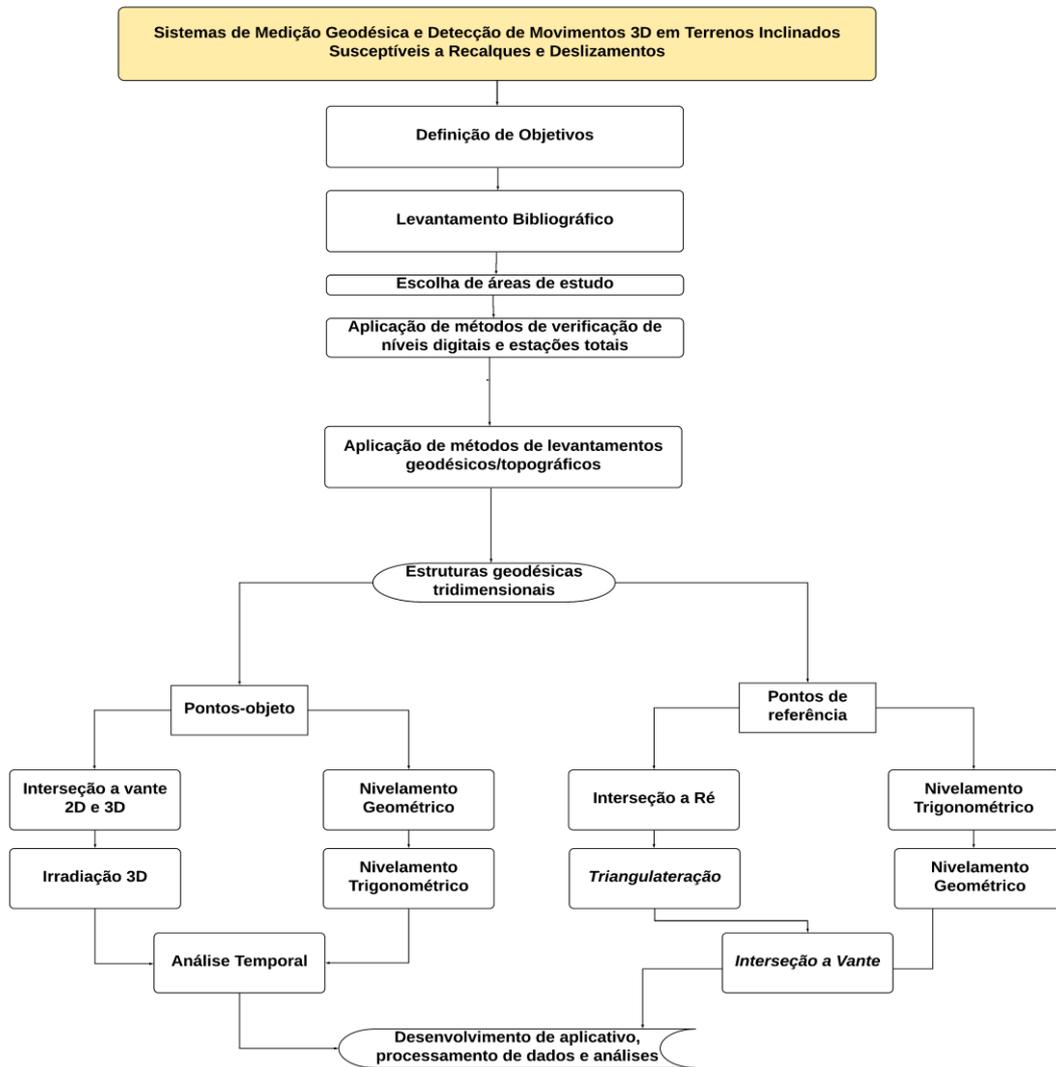
Fonte: O Autor (2019).

- e) Softwares: *AstGeoTop 2019* (GARNÉS, 2019), *Adjust* (WOLF e GHILANI, 1996), *Microsoft Excel 2013*, *Matlab trial version 2018a*, *ArcGIS Pro trial version*, *Autocad 2017 student version*.
- f) Dados pré-existent: leituras de nivelamento geométrico de altíssima precisão realizados em fevereiro e setembro de 2018, coordenadas planimétricas dos vértices L1, L3 e LP3 (CANTO, 2018).

5.3 MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 26 descreve os procedimentos metodológicos realizados durante a execução desta dissertação.

Figura 26 – Metodologia adotada durante a execução da dissertação.



Fonte: O Autor (2019).

As etapas anteriores ao início das atividades envolveram a definição dos objetivos, a determinação das áreas de estudo e um levantamento prévio acerca de bibliografias, que pudessem embasar cientificamente o tema proposto. No que diz respeito as atividades de campo realizadas, tem-se que em suma foram executados métodos de verificação e ajuste de equipamentos geodésicos/topográficos e a materialização de estruturas geodésicas, utilizando métodos de levantamentos topográficos e geodésicos baseados nos Métodos Terrestres de Medição abordados no capítulo 3, tais atividades ocorreram no *Campus Recife* da UFPE e nas propriedades da Eólica Tecnologia Ltda., conforme os itens 5.1.1 e 5.1.2, a partir deste ponto tais localidades são mencionadas, respectivamente, como área de estudo 1 e área de estudo 2.

Como um dos objetivos desta dissertação é a abordagem de uma metodologia para a detecção de movimentos 3D em terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos, a qualidade atingida com a implantação das estruturas geodésicas de referência é fundamental para que as operações de monitoramento sejam viabilizadas. Sendo assim, nesta dissertação, o nível digital Leica DNA-03 foi verificado e ajustado através da aplicação do método de Kukkamäki, tendo sido realizadas quatro campanhas de medição, ocorridas, respectivamente, em 07/02/2018 e 13/09/2018 descritas em Canto (2018), assim como em 12/02/2019 e 08/10/2019, estas duas últimas realizadas nesta dissertação. Finalizadas as etapas na área de estudo 1 as operações de campo foram voltadas para à definição do campo de pontos de referência na área de estudo 2. Essa etapa teve seu desenvolvimento iniciado em dezembro de 2018, onde através de operações de reconhecimento de campo, verificou-se a existência de pontos de referência implantados em Canto (2018), conforme Tabela 02 visualizada no item 5.1.2, a partir de tais pontos utilizou-se o método da irradiação 3D para delimitar possíveis localidades para fixação de novos vértices de referência e de pontos-objeto.

Finalizada a operação de reconhecimento de campo deu-se continuidade às implantações de pontos de referência, interligando-os aos pré-existentes, foram adicionados à estrutura geodésica de referência quatro novos vértices, conforme item 5.1.2, os pontos foram obtidos através da utilização dos seguintes métodos: interseção a ré, triangulateração, interseção a vante, nivelamento trigonométrico e nivelamento geométrico, todas as operações levaram em consideração os efeitos da curvatura terrestre e da refração atmosférica, tais levantamentos ocorreram em 13/02/2019.

Com o fim da etapa de implantação física e coleta planialtimétrica dos novos vértices integrantes da estrutura geodésica de referência, os esforços foram direcionados à realização do nivelamento geométrico entre os pinos de superfície semiesféricas posicionados sobre as bases das torres eólicas Gravatá 01 e Gravatá 02, tais estruturas estão sendo monitoradas quanto à ocorrência de recalques em um intervalo temporal até o momento de 536 dias, dos quais foram realizadas quatro campanhas de medição.

A implantação e a definição planialtimétrica do campo de pontos-objeto ocorreu entre outubro e novembro de 2019, ficando estabelecido durante as

operações de reconhecimento de campo, ainda em dezembro de 2018, que os afloramentos rochosos presentes em um terreno inclinado nas proximidades da torre eólica Gravatá 01, permitiam a implantação estável de vértices em sua superfície e representavam um meio viável para a aplicação de métodos de levantamentos topográficos e geodésicos voltados para o acompanhamento de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos. Os métodos de levantamentos aqui empregados foram: nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico, interseção a vante 2D e 3D, todos levando-se em consideração os efeitos da curvatura terrestre e da refração atmosférica.

Por fim, após a finalização das etapas de campo, deu-se início às operações de processamento e ajustamento dos dados coletados. Nesta fase da dissertação as atenções estiveram voltadas para o desenvolvimento de aplicativo de processamento com algoritmos desenvolvidos em linguagem *Matlab*. Ao todo o aplicativo conta com sete módulos de processamento sendo eles capazes de realizar o processamento e ajustamento de dados advindos dos seguintes métodos: nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico, interseção a ré por transformação de *Helmert* 2D, método de Kukkamäki e o método completo da norma ISO 17123-2 (ISO, 2001).

5.4 VERIFICAÇÃO E AJUSTE DE EQUIPAMENTOS GEODÉSICOS / TOPOGRÁFICOS

Nesta seção são discutidas as metodologias de verificação e ajustes de níveis e estações totais empregados nesta dissertação.

5.4.1 Experimentos e Análises Metodológicas a partir do Uso de Nível Digital

Ao longo deste item são discutidos os métodos e as metodologias utilizadas para verificar e retificar o nível digital Leica DNA-03 utilizado nesta dissertação. As atividades de campo foram realizadas na área de estudo 1, especificamente na base de calibração de níveis e envolveram a aplicação do método de Kukkamäki e o teste completo da Norma ISO 17123-2 (ISO, 2001).

5.4.1.1 Método de Kukkamäki

A aplicação do método de Kukkamäki na área de estudo 1 foi o primeiro dos métodos de verificação e retificação de níveis aplicado nesta dissertação. O equipamento utilizado foi o nível digital *Leica DNA 03*. O nível digital *Leica DNA 03* permite, de acordo com *Leica Geosystems (2006)*, que as leituras eletrônicas realizadas nas miras sejam corrigidas, relativamente ao erro de colimação armazenado no instrumento. O fabricante descreve várias recomendações e métodos indicados para a aplicação deste procedimento, entre eles o método de Kukkamäki.

Conforme indicado no item 3.3.7.3, o equipamento foi instalado entre dois pontos A e B, com distância de 10 metros entre a ré e a vante, neste momento, teve-se acesso ao menu do equipamento e foi escolhida a opção verificar e ajustar. Neste módulo, deram-se início as medições nos pontos A e B. Ressalta-se que neste caso, adota-se o ponto A como estação ré e conseqüentemente o ponto B como estação vante. Na Figura 27 é possível visualizar uma ilustração da tela do equipamento no momento em que as observações foram coletadas.

Figura 27 – Resultados módulo verificar e ajustar do nível digital Leica DNA-03.

VERIF & AJUSTAR		A	x	B
Estação 1				
A1	:	1,39050 m	EC	
Dist:		9,97 m		
B1	:	1,40630 m		
Dist:		9,96 m		
<FIM>		<CONT>		

Fonte: Adaptado de Leica Geosystems (2006).

Finalizadas as coletas destas duas observações iniciais foi selecionada a opção continuar e o nível foi instalado em um novo ponto localizado a 20 metros do ponto B e a 40 metros do ponto A. Neste caso, novamente, realizaram-se as leituras nas miras posicionadas em ré e vante, e na tela do instrumento foram exibidos os valores dos erros de colimação antigo e novo, conforme Figura 28.

Figura 28 – Resultados módulo verificar e ajustar do nível digital Leica DNA-03.

VERIF & AJUSTAR	
Ant. Erro Colim:	4.0 "
Novo Erro Colim:	-3.0 "
Diferença :	-7.0 "
Reticulo:	1.41616 m
<FIM>	<OK>

Fonte: Adaptado de Leica Geosystems (2006).

Para aceitar e armazenar o novo valor para o erro de colimação, deve-se pressionar o botão <ok>, conforme indicado na Figura 28. Após a aceitação dos dados repetiu-se o procedimento para verificar se o equipamento realmente foi ajustado. As campanhas de medição, onde foi utilizado o método de Kukkamäki ocorreram em 11/02/2019 e 08/10/2019 sempre antes da aplicação do método de nivelamento geométrico na área de estudo 2. A aplicação do método na base de verificação e ajuste pode ser visualizada na Figura 29.

Figura 29 – Aplicação do método de Kukkamäki.



Fonte: O Autor (2019).

5.4.1.2 Teste Completo da Norma ISO 17123-2 (ISO, 2001)

A aplicação da norma 17123-2 (ISO, 2001) na área de estudo 1 ocorreu em 15 de maio de 2018. Utilizou-se o nível digital Leica DNA 03 para a execução dos testes descritos na norma, optou-se neste caso pelo procedimento denominado pela norma como teste completo, conforme indicado neste procedimento o nível foi instalado no ponto médio da base de verificação e ajuste e a partir daí, realizou-se a medição dos desníveis (leituras de ré e vante) entre os pontos extremos da base.

Conforme especificado pela norma, este procedimento de obtenção dos desníveis foi realizado 40 vezes, realizando-se alterações na altura do instrumento ao final de cada par de leituras ré e vante, ao final de cada 10 pares de leitura, inverte-se a posição da mira, ou seja, o ponto que antes era tido como ré passa a ser vante e vice-versa.

A alteração na altura do instrumento ao final de cada par de leituras foi realizada através de um tripé modificado desenvolvido para facilitar a movimentação do equipamento sem a necessidade de que haja uma nova operação de nivelamento do mesmo. Este tripé permite que, ao girar um parafuso, a superfície horizontal, no qual o instrumento permanece fixado se movimenta verticalmente, mesmo com a utilização deste artifício a condição de nivelamento do nível digital foi verificada ao final de cada modificação em sua altura. O levantamento teve duração de 3 horas e foi aplicado no período vespertino. Ressalta-se que o tripé modificado foi desenvolvido no projeto de pesquisa intitulado Reconstrução tridimensional de edificações por meio de métodos técnicos ópticos de medição geodésica para diagnóstico de movimentos verticais, Seixas (2008).

5.4.2 Experimentos e Análises Metodológicas a partir do Uso de Estação Total

Neste item serão apresentadas as metodologias aplicadas na verificação dos limbos horizontais e verticais das estações totais utilizadas nesta dissertação.

5.4.2.1 Verificação de Limbos Horizontais e Verticais Através do Método das Direções

As estações totais Topcon GPT 3200-N utilizadas nesta dissertação tiveram seus limbos horizontais e verticais verificados através da medição de 10 alvos fixados no *hall* jardim do NIATE/CCEN/CTG. As observações foram realizadas através do método das direções, no qual são coletados ângulos, mudando-se a origem do equipamento de tal modo que as leituras angulares sejam efetuadas ao longo da extensão dos limbos, conforme Espartel (1987). Os dez alvos fixos foram medidos a partir de 3 reiterações. O procedimento de campo foi realizado em Canto (2018) e Silva e Seixas (2017), sendo aproveitado nesta dissertação. Uma ilustração a respeito da aplicação do método é visualizada na Figura 30 (A) e (B).

Figura 30 – Verificação de limbos horizontais e verticais de estações totais.



(A) instalação de equipamentos.

(B) Alvo fixo.

Fonte: Canto (2018).

5.5 LEVANTAMENTO DA REDE GEODÉSICA ALTIMÉTRICA LOCAL

Nesta seção será apresentada a metodologia utilizada durante a implementação da Rede Geodésica Altimétrica Local na área de estudo 2. Tal rede teve sua implementação em Canto (2018), tendo sido ampliada nesta dissertação. A Rede Geodésica Altimétrica Local é constituída por seis pinos de superfícies semiesféricas situados nas bases das torres eólicas Gravatá 01 e Gravatá 02. A metodologia adotada em ambas as dissertações foi a mesma e está apresentada no item 5.5.1.

5.5.1 Experimentos e Análises Metodológicas a partir do Uso de Nível Digital

Neste item são detalhados os experimentos e a metodologia empregada para definir e materializar a Rede Geodésica Altimétrica Local a partir do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão, utilizando um nível digital.

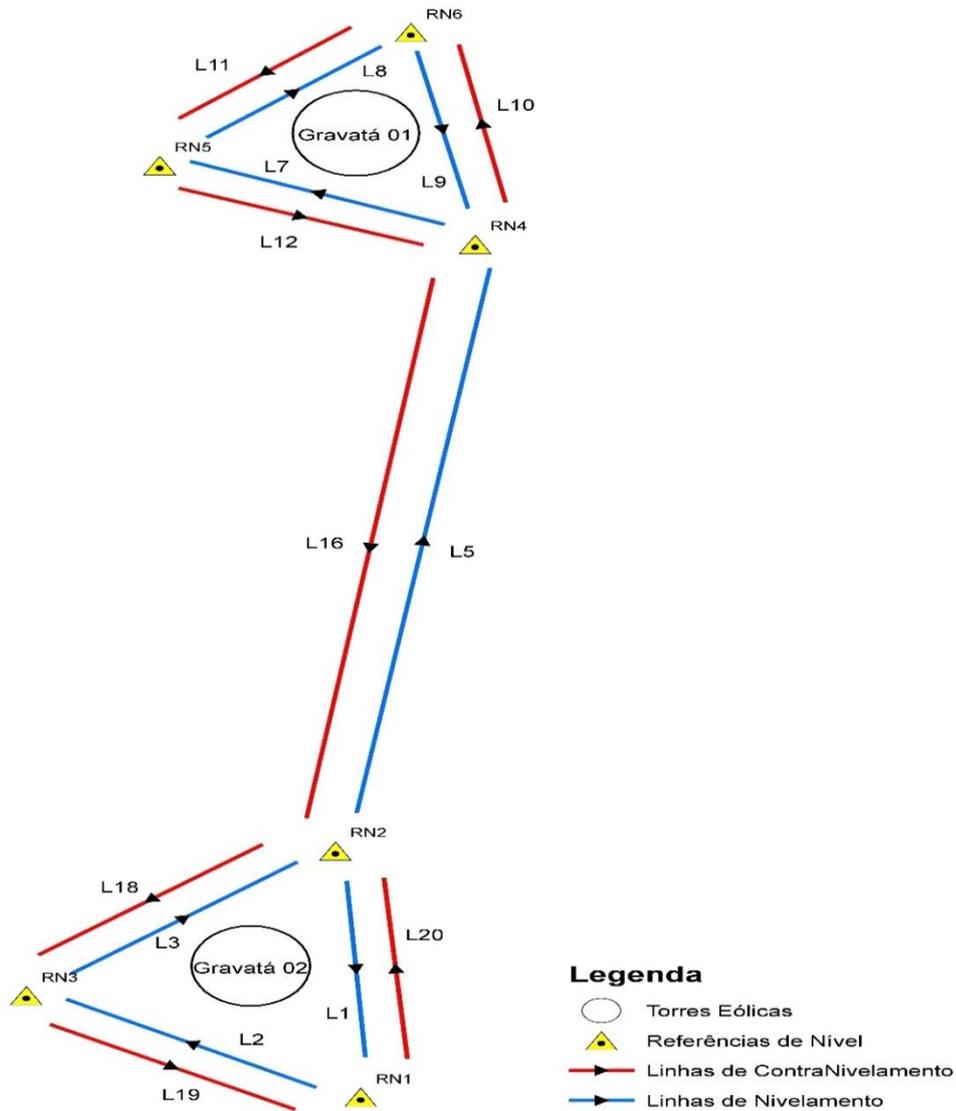
5.5.1.1 Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão

Na área de estudo 2 foram realizadas quatro campanhas de observações aplicando-se o método do nivelamento geométrico de altíssima precisão. As duas primeiras campanhas foram realizadas em Canto (2018), ocorrendo em 20/04/2018 e 01/09/2018. Nestas campanhas, realizou-se o nivelamento e contranivelamento entre os pinos RN01, RN02, RN03 presentes na torre eólica Gravatá 02, RN04,

RN05, RN06 presentes na torre Gravatá 01 e entre RN02 e RN04 presentes nas torres Gravatá 01 e Gravatá 02.

O procedimento de campo adotado na coleta da primeira campanha de observações foi o de tomar linhas de nivelamento e contranivelamento em sentidos opostos utilizando visadas iguais. Neste levantamento foram utilizadas apenas duas sapatas, um nível digital Leica DNA-03, uma mira de código de barras modelo Leica e acessórios de campo. A segunda campanha de observações realizadas adotou um procedimento metodológico relativamente diferente com o objetivo de minimizar o intervalo de tempo levado para finalizar os circuitos de nivelamento e contranivelamento entre as torres. Neste caso, adotou-se como estratégia a realização de nivelamento geométrico por caminhamento duplo, tendo sido este o procedimento adotado durante as demais campanhas de observações realizadas. Nesta metodologia nivelamento e contranivelamento são realizados de maneira simultânea, para isso foi necessário a adição de mais duas sapatas. Os circuitos de nivelamento e contranivelamento adotados em Canto (2018) são ilustrados na Figura 31.

Figura 31 – Esboço das linhas de nivelamento/contranivelamento 1ª e 2ª campanhas de medições.

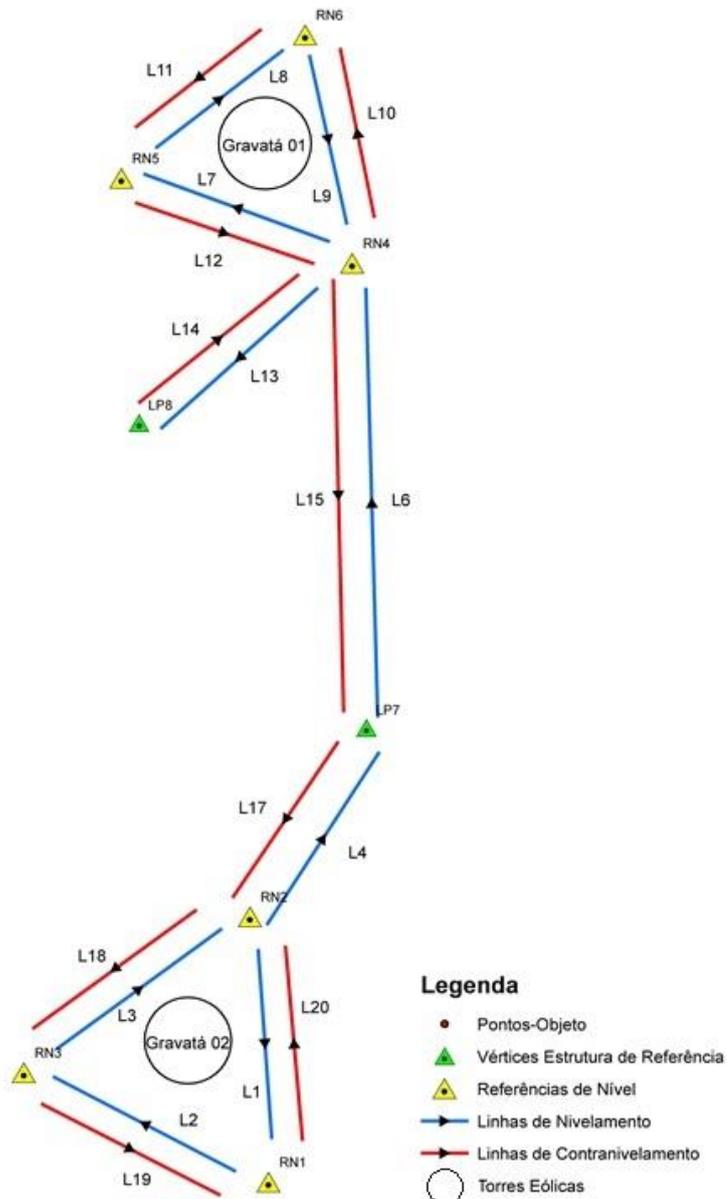


Fonte: Adaptado de Canto (2018).

O procedimento de campo adotado durante a coleta da terceira e quarta campanhas de observações, empregando o método de nivelamento geométrico foi muito similar ao realizado na coleta da segunda campanha de observações, sendo a adição de novos pontos ao longo dos trajetos de nivelamento e contranivelamento a modificação mais significativa. A terceira campanha de observações realizada ocorreu em 14/02/2019. Neste levantamento foram adicionados ao circuito existente entre as torres, os vértices LP7 e LP8. Tais vértices compõem a estrutura geodésica de referência planialtimétrica implementada descrita no item 5.6. No entanto, no caso do levantamento da Rede Geodésica Altimétrica Local o único vértice a ser

adotado como referência é o ponto PO08, implantado na 4ª campanha de medições, durante as campanhas anteriores a RN02 e o vértice LP8 tiveram suas cotas fixadas em alguns momentos, para a realização do ajustamento das observações. O circuito adotado na 3ª campanha de medições é ilustrado na Figura 32.

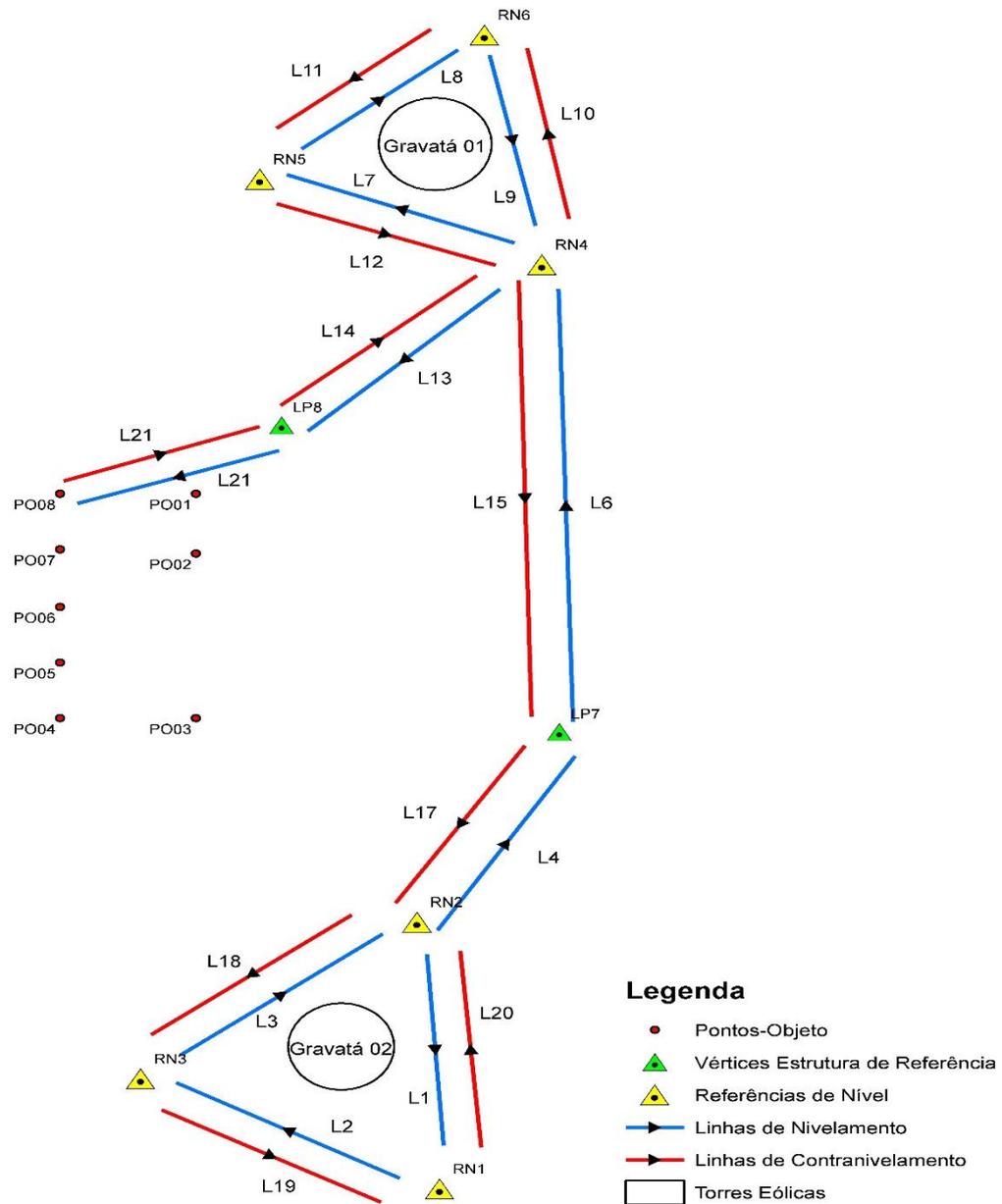
Figura 32 – Esboço das linhas de nivelamento/contranivelamento 3ª campanha de medições.



Fonte: O Autor (2019).

A quarta campanha de observações realizada, ocorreu em 09/10/2019, os vértices PO01, PO02, PO07, PO08 fixados sobre afloramentos rochosos presentes nas proximidades da torre eólica Gravatá 01 foram adicionados ao circuito de nivelamento/contranivelamento ilustrado na Figura 33.

Figura 33 – Esboço das linhas de nivelamento/contranivelamento 4ª campanha de medições



Fonte: O Autor (2019).

Ao longo das 4 séries de observações foram realizadas adições de circuitos de nivelamento/contranivelamento realizados em campo. Sendo assim, a Tabela 16 elucida as respectivas linhas de cada circuito considerado nesta dissertação.

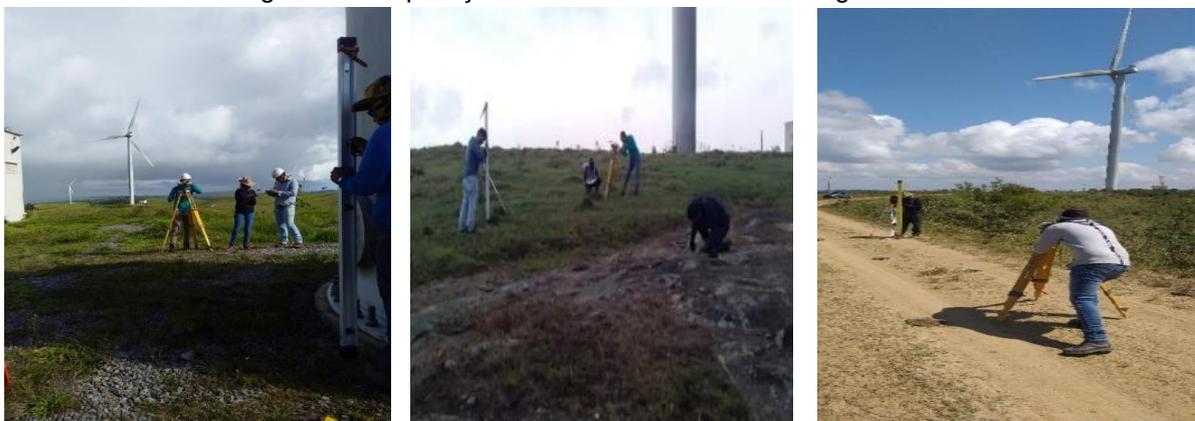
Tabela 4 – Circuitos e linhas de nivelamento/contranivelamento adotadas durante a execução das 4 séries de observações realizadas entre os pinos das torres Gravatá 01 e Gravatá 02.

Circuito	Linha	Saída	Chegada
I	L1	RN02	RN01
I	L2	RN01	RN03
I	L3	RN03	RN02
I	L18	RN02	RN03
I	L19	RN03	RN01
I	L20	RN01	RN02
II	L4	RN02	LP7
II	L17	LP7	RN02
III	L5	RN02	RN04
III	L16	RN04	RN02
IV	L6	LP7	RN04
IV	L15	RN04	LP7
V	L7	RN04	RN05
V	L8	RN05	RN06
V	L9	RN06	RN04
V	L10	RN04	RN06
V	L11	RN06	RN05
V	L12	RN05	RN04
VI	L13	RN04	LP8
VI	L14	LP8	RN04
VII	L21	PO08	LP8
VIII	L22	PO08	RN04

Fonte: O Autor (2020).

Durante os levantamentos realizados as medições com o nível digital basearam-se na coleta de duas séries de 4 observações cada. Após as 4 observações era apresentado no *display* do equipamento o valor médio da série observada. Na caderneta de campo foi anotado o valor médio das observações quando estas não apresentavam um valor de amplitude superior a 0,06mm entre elas. Na Figura 34 (A), (B) e (C) é possível visualizar em detalhes a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão na área de estudo 2.

Figura 34 – Aplicação do método de nivelamento geométrico



(A) visada direcionada a RN04.

(B) visada direcionada ao vértice LP8.

(C) visada direcionada a vértice auxiliar.

Fonte: O Autor (2019).

5.6 DENSIFICAÇÃO DA INFRAESTRUTURA GEODÉSICA DE REFERÊNCIA NA ÁREA DE ESTUDO 2

Neste item serão descritos os procedimentos envolvidos na materialização de pontos de referência na área de estudo 2.

5.6.1 Materialização de Pontos de Referência na Área de Estudo 2

A definição do melhor posicionamento espacial para materialização dos vértices LP7, LP8, LP9 e LP10 foi realizada através de uma campanha de reconhecimento de campo ocorrida no dia 21/12/2018. Os vértices LP7, LP8, LP9 e LP10 foram distribuídos espacialmente em locais nos quais pudessem servir de bases para a realização de observações. Foram definidas duas configurações para instalações das bases, a primeira uma base curta (com distâncias na ordem de 350 metros em relação aos futuros pontos-objeto) aproximadamente perpendicular aos pontos-objeto materializados sobre a superfície do terreno inclinado analisado, tal base é formada pelos vértices L3 e LP7. A segunda configuração de bases abordou a implantação de uma base longa locada na superfície, de modo aproximadamente paralelo aos pontos-objeto posicionados sobre a superfície rochosa, esta base é composta pelos vértices LP9 e LP10 e apresenta distâncias na ordem de 900 metros em relação aos pontos-objeto posicionados sobre a superfície rochosa. O vértice LP8 foi posicionado a aproximadamente 5 metros de distância dos pontos-objeto de maneira que pudesse facilitar a realização de levantamentos próximos a torre eólica Gravatá 01, uma vez que não existiam pontos de referência localizados próximos a esta torre.

Nesta campanha de reconhecimento as possíveis localidades para a implantação de novos pontos de referência ou pontos-objeto foram demarcadas no solo com auxílio de sprays de tinta ou piquetes de madeira, as suas efetivas materializações somente ocorreram nas campanhas de medições realizadas em 13/02/2019 para o caso dos pontos de referência (LP7, LP8, LP9 e LP10) e em 03/10/2019 para o caso dos pontos-objeto posicionados em uma grade quadrangular sobre o terreno inclinado e afloramento rochoso. Detalhes acerca do procedimento de materialização dos pontos de referência podem ser visualizados na Figura 35 (A), (B) e (C).

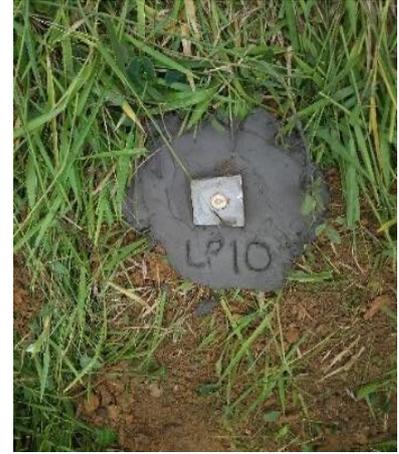
Figura 35 – Materialização de pontos de referência na área de estudo 2.



(A) preparação para materialização de marco geodésico.



(B) marco geodésico no formato de tronco piramidal.

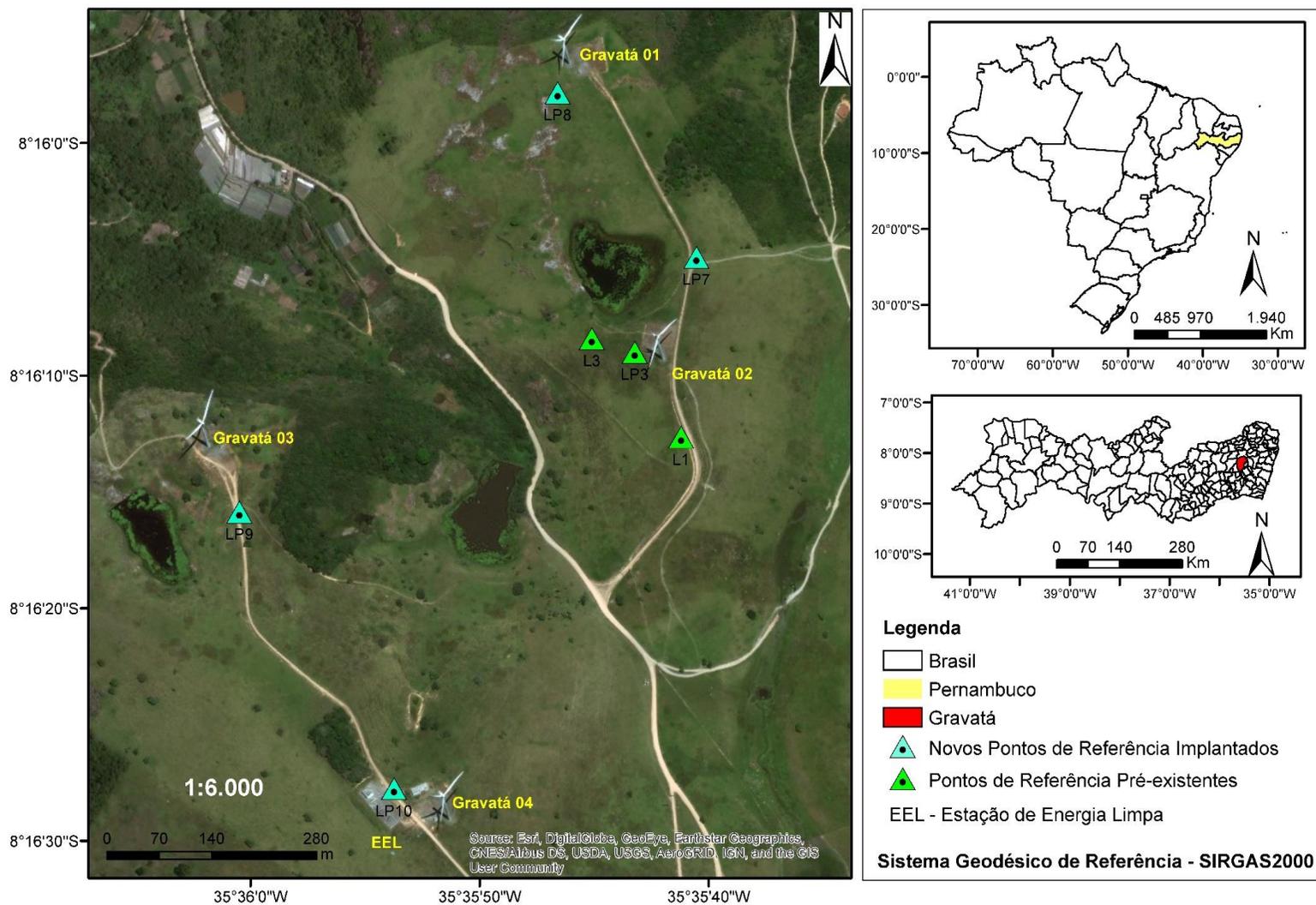


(C) marco geodésico denominado LP10 após materialização no solo.

Fonte: O Autor (2019).

A estrutura geodésica de referência implantada em campo após a execução das atividades realizadas em 13/02/2019 pode ser visualizada na Figura 36.

Figura 36 – Estrutura geodésica de referência implantada.



Fonte: O Autor (2020). *Elaborado a partir do software Arcgis Pro trial version.

5.6.2 Experimentos e Análises Metodológicas a Partir do Uso de Estações Totais

Totais

Ao longo deste item são discutidos os métodos e as metodologias utilizadas para materializar e definir planialtimetricamente as coordenadas de novos pontos de referência na área de estudo 2. A Rede Geodésica de Referência foi densificada nesta dissertação a partir da utilização de métodos clássicos de levantamentos que tiveram como base a coleta de observações lineares e angulares através da utilização de estações totais. Dentre os métodos utilizados, destacam-se irradiação 3D, interseção a ré, triangulateração e o nivelamento trigonométrico, conforme itens 5.6.2.1, 5.6.2.2, 5.6.2.3 e 5.6.2.4.

5.6.2.1 Irradiação 3D

A aplicação da irradiação 3D em campo baseou-se no posicionamento da estação total Topcon GPT 3200-N sobre o vértice L3 e a partir disto tomou-se como alinhamento de referência a direção L3-LP3 (vértices de coordenadas conhecidas) e realizou-se as medições angulares e lineares a uma superfície rochosa localizada nas proximidades da torre eólica Gravatá 01. Esta operação teve como objetivo delimitar a área, na qual seriam posicionados os pontos-objeto e os vértices LP7, LP8, LP9 e LP10. Ao todo foram levantados 89 pontos, uma ilustração do procedimento realizado em campo pode ser visualizada na Figura 37 (A), (B) e (C).

Figura 37 – Campanha de reconhecimento de campo.



(A) posicionamento da estação total sobre vértice L3.



(B) prisma posicionado nas bordas da superfície rochosa delimitada.

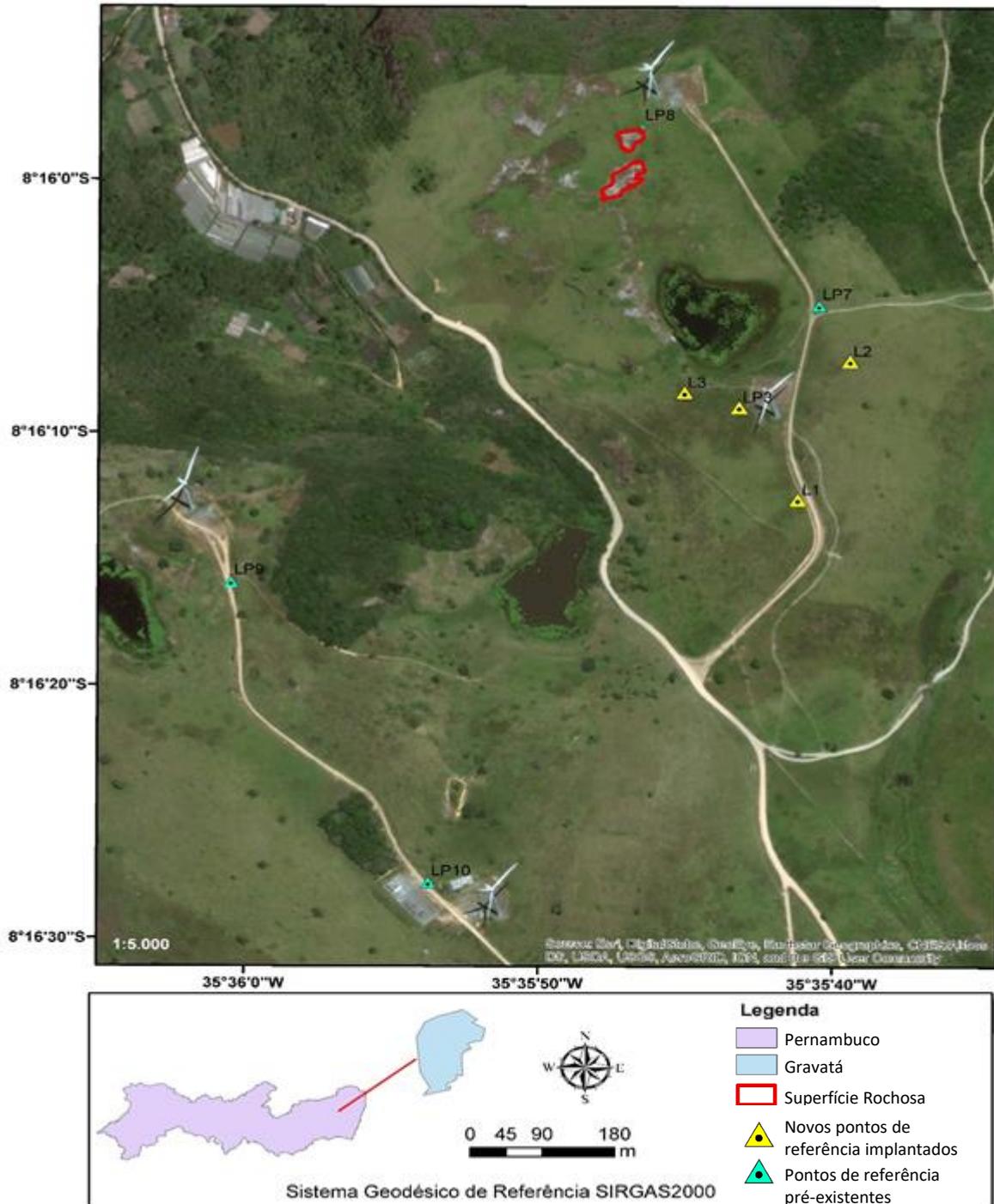


(C) prisma posicionado em provável localização do vértice LP7.

Fonte: O Autor (2018).

A aplicação do método em campo contou com o auxílio de uma equipe composta por 4 pessoas e teve uma duração de aproximadamente 4 horas. A delimitação das superfícies rochosas assim como as prováveis localizações dos vértices LP7, LP8, LP9 e LP10 obtidas através do método da Irradiação 3D podem ser visualizadas na Figura 38.

Figura 38 – Delimitação superfície rochosa área de estudo 2.



Fonte: O Autor (2020). *Elaborado a partir do software Arcgis Pro trial version.

5.6.2.2 Interseção a Ré

O método da interseção a ré foi utilizado nesta dissertação para a determinação das coordenadas planimétricas do vértice LP9, integrante do campo de pontos de referência adotado. As medições ocorreram no dia 13/02/2019 com uma equipe de campo formada por cinco pessoas e uma duração de quatro horas. O equipamento utilizado foi a estação total Topcon GPT-3200 N e as medições ocorreram paralelamente a aplicação do método da Triangulação e Nivelamento Trigonométrico na área de estudo 2, descritos nos itens 5.6.2.3 e 5.6.2.4. Para dar início à aplicação do método a estação total foi devidamente instalada sob o vértice LP9 de onde realizaram-se medidas angulares e lineares direcionadas aos vértices pré-existentes L3, LP3, L1 de coordenadas conhecidas e expostas na Tabela 1 desta dissertação. A coleta destes dados foi feita com emprego de centragem forçada e coleta de três séries de leituras conjugadas (posição direta e inversa da luneta do instrumento). A aplicação do método teve uma duração estimada de 1:30h.

5.6.2.3 Triangulação

A aplicação do método da triangulação na área de estudo 2 ocorreu inicialmente em 13/02/2019 com início às 08:00h da manhã e término às 17:00h deste mesmo dia, no entanto, posteriormente durante a fase de processamentos, notou-se que seriam necessárias a coleta de novas observações com o objetivo de adquirir um maior número de observações redundantes e melhorar a geometria da rede de triangulação implementada, essas novas observações foram coletadas em 07/11/2019. O equipamento utilizado nas duas campanhas de medição realizadas foi a estação total Topcon GPT-3200 N. Os vértices ocupados e as medições realizadas a partir deles podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 – Rede de observações coletadas a partir dos vértices de referência

Estação Ocupada	Estação Visada	Tipo de Dado Coletado	Data de Execução
LP8	L3, LP10, LP7, LP9	Angular, linear	13/02/2019
LP7	LP9, L3, LP8	Angular, linear	13/02/2019
L3	LP9, LP8, LP10, LP7, LP3	Angular, linear	13/02/2019
LP9	L3, LP3, LP7, LP8, L1	Angular, linear	13/02/2019
LP10	L3, LP8	Angular, linear	07/11/2019

Fonte: O Autor (2020).

A execução do método da Triangulação em campo durante a campanha realizada em 13/02/2019 contou com o auxílio de uma equipe formada por cinco

peças e teve uma duração em campo de 8 horas, divididas entre a implantação física dos marcos e a coleta das observações. Para dar início à aplicação do método a estação total foi devidamente instalada sob os vértices LP7, LP8, LP9, e L3, realizando-se a partir destes, medidas angulares e lineares direcionadas aos demais vértices intervisíveis presentes na área de estudo, conforme demonstrado anteriormente na Tabela 5. A coleta destes dados foi feita com emprego de centragem forçada e três séries de leituras conjugadas (posição direta e inversa da luneta do instrumento).

No levantamento realizado em 07/11/2019, adotou-se procedimento similar a empregado em 13/02/2019, desta vez o equipamento foi posicionado apenas sobre o vértice LP10 e realizou-se medições angulares e lineares direcionadas aos vértices LP8 e L3. Nesta campanha também foi realizado o emprego da centragem forçada, no entanto, apenas duas séries de leituras conjugadas foram realizadas. Ao todo foram coletadas 20 observações, das quais considerou-se as 12 iniciais, como ângulos, e as 8 últimas como distâncias. Ilustrações acerca do procedimento de campo e da rede de Triangulação implantada podem ser visualizadas na Figuras 39 (A), (B), (C) e na Figura 40.

Figura 39 – Procedimento de campo (método da triangulação).



(A) estação total posicionada sobre vértice LP9.



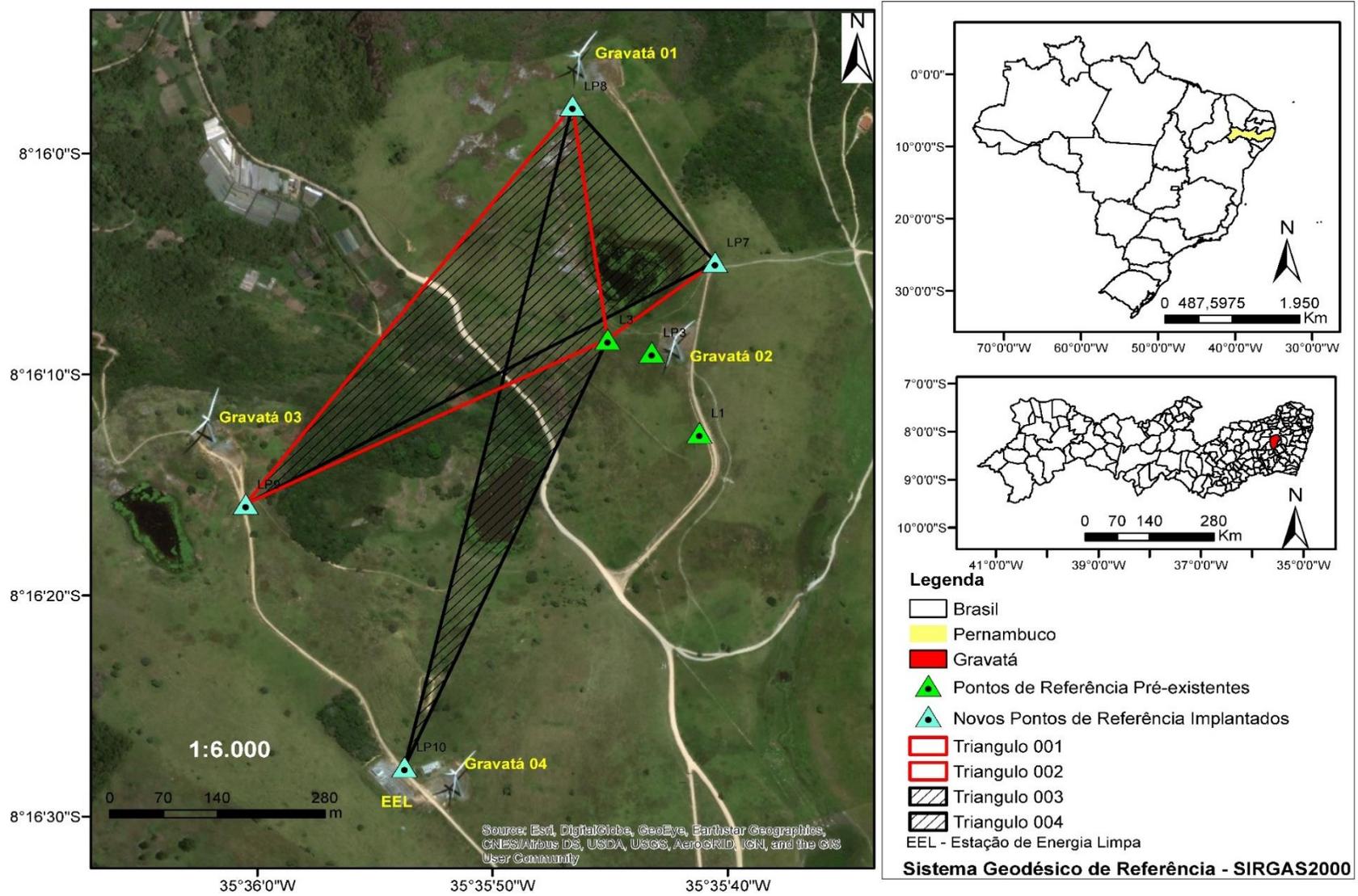
(B) prisma instalado a partir de centragem forçada sobre vértice LP7.



(C) prisma instalado a partir de centragem forçada sobre vértice LP8.

Fonte: O Autor (2019).

Figura 40 – Rede de triangulação observada.



Fonte: O Autor (2020). *Elaborado a partir do software Arcgis Pro trial version.

5.6.2.4 Nivelamento Trigonométrico com Correções da Curvatura Terrestre e da Refração Atmosférica

A aplicação do método de nivelamento trigonométrico ocorreu simultaneamente à aplicação do método da Triangulação na área de estudo 2, logo, os ângulos zenitais e distâncias inclinadas envolvidas foram obtidas a partir de três séries de leituras conjugadas PD e PI. Em cada medição, tomou-se o cuidado de realizar as devidas anotações da altura do instrumento e do prisma envolvidos na observação dos respectivos vértices topográficos. Estas alturas foram determinadas até a terceira casa decimal, com o auxílio de uma trena de fibra de vidro empregada durante as campanhas de medição.

O método do nivelamento trigonométrico foi aplicado a partir dos vértices L3, LP7, LP8 e LP9, no dia 13/02/2019, com o auxílio de uma equipe formada por 5 pessoas.

5.7 IMPLANTAÇÃO E LEVANTAMENTO DE PONTOS-OBJETO NA ÁREA DE ESTUDO 2

Nesta seção serão discutidos as etapas e os métodos adotados na definição e implantação de pontos-objeto na área de estudo 2.

5.7.1 Materialização de Pontos-objeto na Área de Estudo 2

A materialização dos ponto-objeto na área de estudo 2 ocorreu no dia 03/10/2019, os pontos-objeto foram fixados sobre a superfície dos afloramentos rochosos presentes nas proximidades da torre eólica Gravatá 01. Ao todo foram posicionados oito pontos-objeto, aqui denominados sequencialmente de PO01 a PO08, na superfície rochosa. Tais pontos foram confeccionados especialmente para esta dissertação e são representados por um conjunto de 8 parafusos macho/fêmea com diâmetro de 20 mm de modo que é possível através deles fixar tanto um prisma para a observação de medidas angulares e lineares quanto uma haste metálica para o posicionamento de miras verticais, conforme descrito anteriormente no item (5.1.2). Os pontos-objeto podem ser visualizados na Figura 41 (A) e (B).

Figura 41 – Implantação de pontos-objeto.



(A) conexão base-prisma, parafusos macho e fêmea.

(B) parafuso fêmea posicionado sobre ponto-objeto PO02.

Fonte: O Autor (2019).

O procedimento adotado em campo consistiu em distribuir estes pontos-objeto em quadriculados de 10 metros com o auxílio de uma trena de fibra de vidro. No entanto, percebeu-se em campo que alguns pontos ao serem locados de 10 em 10 metros não ficavam posicionados sobre o solo rochoso. Sendo assim, optou-se por dar espaçamento de 20 metros para o ponto PO05 em relação a PO06. A rocha foi perfurada com auxílio de um martelo, uma broca de 20 mm e um gerador elétrico de 3,5 Kva, uma vez que não há energia elétrica na localidade e os parafusos foram fixados na rocha com auxílio de cola Epóxi em uma mistura 2X1. Detalhes acerca do procedimento de campo podem ser visualizados na Figura 42 (A), (B), (C) e (D).

Figura 42 – Fixação de pontos-objeto na área de estudo 2.



(A) abertura de furos com diâmetro de 3cm para fixação de parafuso fêmea.



(B) preparação da cola Epóxi.



(C) parafuso fêmea fixado sobre superfície rochosa.



(D) conjunto parafuso fêmea e parafuso macho fixados no ponto-objeto PO02.

Fonte: O Autor (2019).

5.7.2 Experimentos e Análises Metodológicas a Partir do Uso de Nível digital

Ao longo deste item são detalhados os procedimentos e a metodologia empregada durante a aplicação do método de nivelamento geométrico de altíssima precisão, levando-se em consideração os pontos-objeto PO01, PO02, PO07 e PO08.

5.7.2.1 Método do Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão

A aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão considerando os oito pontos-objetos posicionados sobre as superfícies rochosas presentes na área de estudo 2, ocorreu paralelamente a realização da 4ª campanha de observações entre os pinos das torres eólicas Gravatá 01 e 02, realizada em 09 de outubro de 2019.

A ideia inicial consistia em finalizar os circuitos de nivelamento de I a VII e a partir do vértice LP8 realizar nivelamento e contranivelamento de PO01 a PO08. No entanto, na quarta campanha, as condições climáticas do dia de medição levaram a execução do levantamento em um tempo maior do que o de costume, o que repercutiu na medição também em período noturno. E com a falta de luminosidade do local, não foi possível concluir o levantamento sobre todos os 8 pontos implantados nas rochas. Sendo assim, realizou-se o procedimento de nivelamento seguindo o circuito LP8, PO01, PO02, PO07, PO08, LP8. A aplicação do método em campo é ilustrada na Figura 43 (A), (B) e (C).

Figura 43 – Aplicação do método de nivelamento geométrico de altíssima precisão.



Fonte: O Autor (2019).

5.7.3 Experimentos e Análises Metodológicas a Partir do Uso de Estação Total

Ao longo deste item são detalhados os procedimentos e a metodologia envolvida na definição planialtimétrica dos pontos-objeto P001, PO02, PO03, PO04, PO05, PO06, PO07 e PO08. Os métodos de levantamento empregados foram interseção a vante e a irradiação 3D, apresentados nos itens 5.7.3.1 e 5.7.3.2.

5.7.3.1 Método da Interseção a Vante

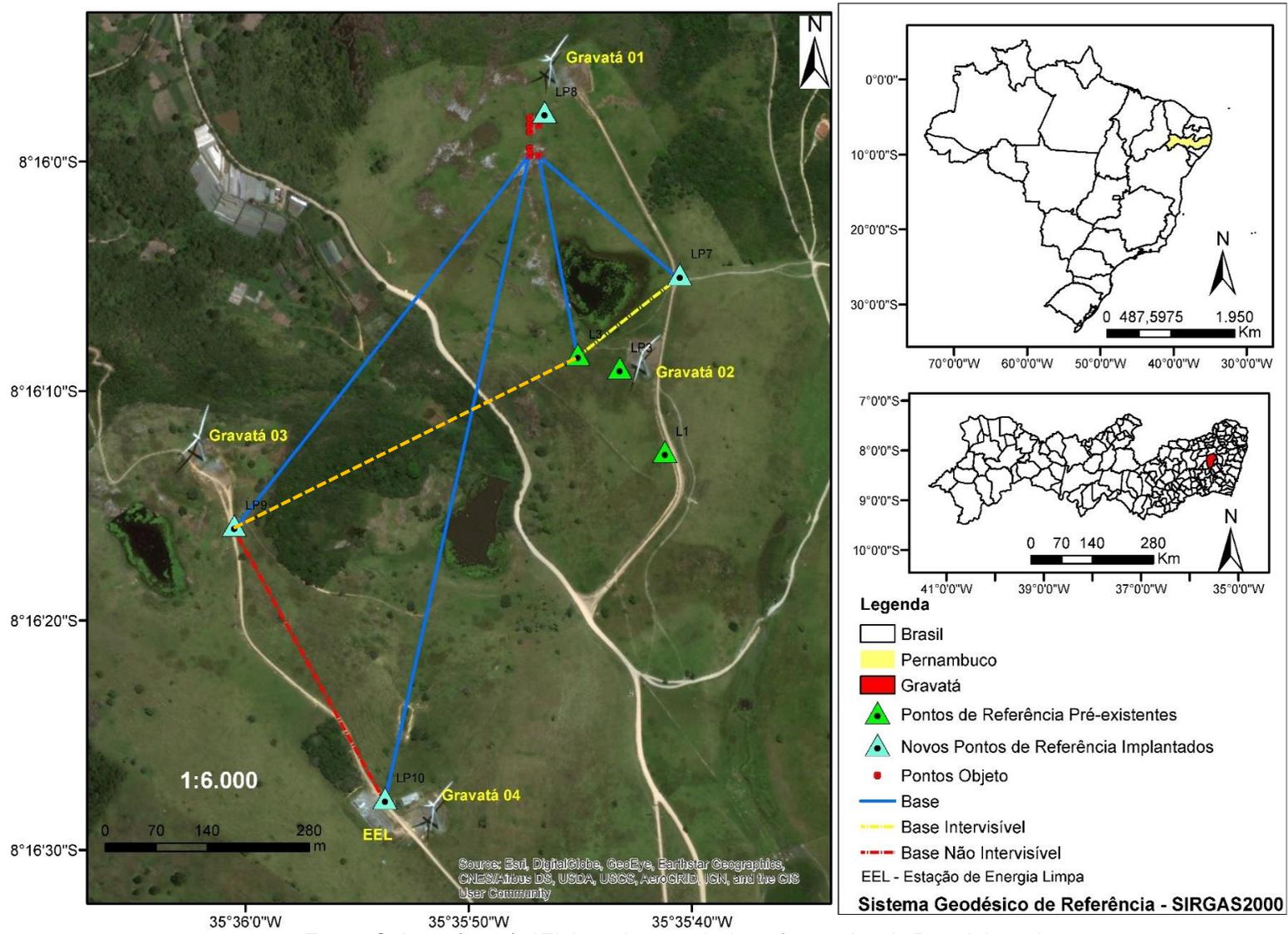
A aplicação do método da interseção a vante na área de estudo 2 com o objetivo de determinar as coordenadas planimétricas dos oito pontos-objeto posicionados sobre a superfície rochosa ocorreu em 07/11/2019. A execução do método em campo teve uma duração de 7 horas e contou com o auxílio de uma equipe formada por 4 pessoas. As bases com coordenadas conhecidas definidas para aplicação do método são compostas pelos vértices LP7-L3 (intervisíveis entre si) e LP9-LP10 (não intervisíveis).

Optou-se em campo por dar início a coleta das observações angulares e lineares a partir do vértice LP7, nesse caso, tomou-se como referência a direção LP7-L3 com coordenadas conhecidas e tentou-se realizar a observação dos oito pontos-objeto posicionados na superfície rochosa. Neste momento foi verificado que a partir do vértice LP7 não seria mais possível observar com clareza os pontos objeto posicionados sobre a superfície rochosa. Isto ocorreu devido ao fato de que no momento em que os pontos-objeto foram fixados sobre a rocha na campanha de levantamento realizada em 03/10/2019, as posições pré-determinadas em 21/12/2018 já não estavam mais visíveis na superfície da rocha e foi necessário realizar a fixação dos pontos com base na escolha de uma área rochosa na qual estes pontos pudessem ser fixados. Infelizmente não se atentou ao fato de que o novo posicionamento dos pontos deveria ser direcionado de tal modo que a partir das bases de observação implantadas todos os prismas posicionados sobre os pontos-objeto, pudessem ser vistos. Diante deste imprevisto, optou-se pela utilização de uma nova base de observações para aplicar o método da interseção a vante, sendo esta composta pelos vértices LP9 e L3, considerando-se como alinhamentos as direções LP9-L3 e L3-LP7.

Finalizadas as observações em L3 o equipamento foi posicionado sobre os vértices LP9 e LP10, dos quais se tomou como alinhamento as direções LP9-L3 e

LP10-L3, respectivamente, nos momentos em que os vértices foram ocupados, e a partir disto, realizou-se as observações angulares e lineares necessárias para a determinação das coordenadas planimétricas dos 8 pontos-objeto posicionados sobre rocha. Uma ilustração da aplicação do método em campo é visualizada na Figura 44.

Figura 44 – Bases de monitoramento implantadas na área de estudo 2.



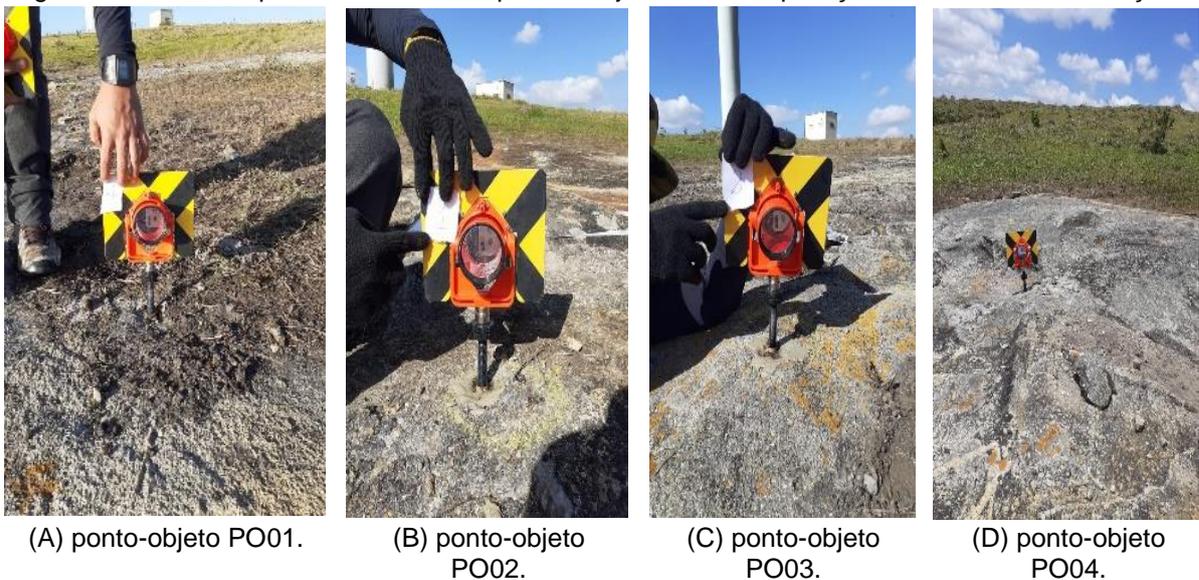
Fonte: O Autor (2020). *Elaborado a partir do software Arcgis Pro trial version.

Os prismas utilizados foram diretamente parafusados sobre os 8 pontos-objeto e a coleta das observações foi realizada, considerando-se duas séries de leituras conjugadas (Posição direta - PD e Posição Inversa – PI da luneta).

5.7.3.2 Método da Irradiação 3D

O método da irradiação 3D foi aplicado a partir do vértice L3, como dito anteriormente no item 5.6.3.1. O procedimento de campo consistiu em posicionar a estação total Topcon GPT 3200-N sobre o vértice L3, tomar como alinhamento a direção L3-LP7 e a partir deste alinhamento visar os oito prismas posicionados sobre os pontos-objeto fixados na rocha. Ao final da aplicação do método apenas não foi possível a coleta das observações lineares e angulares no momento em que o prisma foi fixado sobre o ponto-objeto 03, nesse caso devido à falta de clareza para realização das visadas com o instrumento, optou-se por não considerar tal ponto-objeto. A aplicação do método da Irradiação 3D direcionada aos pontos-objeto sobre a superfície rochosa ocorreu em 07/11/2019 com o auxílio de uma equipe composta por quatro pessoas e uma duração de aproximadamente uma hora e dez minutos. A coleta das observações foi realizada considerando-se duas séries de leituras conjugadas (PD e PI). A altura dos prismas foi coletada através do uso de uma trena. A aplicação do método da irradiação 3D em campo é ilustrada através da Figura 45 (A), (B), (C) e (D).

Figura 45 – Prismas posicionados sobre pontos-objeto durante aplicação do método da irradiação 3D.



Fonte: O Autor (2019).

5.8 ELABORAÇÃO DE APLICATIVOS DE PROCESSAMENTO

Os resultados apresentados no capítulo 6 desta dissertação foram obtidos a partir do desenvolvimento de rotinas de programação na versão *trial do Matlab 2018a*, algumas destas rotinas foram criadas através da edição manual de interfaces gráficas utilizando a funcionalidade *Guide* disponível na versão do *Matlab* anteriormente citada, outras contaram apenas com a edição de *scripts* voltados especificamente para o processamento dos dados coletados em campo.

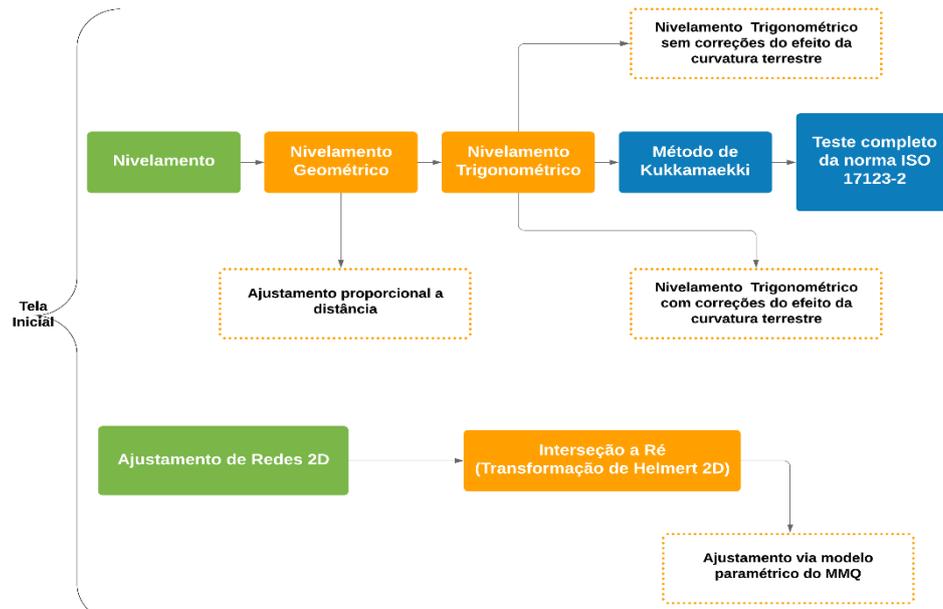
A ferramenta *Guide* é definida em *Matlab* (2018) como um ambiente de desenvolvimento que fornece um conjunto de ferramentas para a criação de Interfaces de Usuários (IUs). Esta ferramenta gera automaticamente arquivos de programa que contém funções que controlam a maneira como a interface do usuário se comporta. Esse arquivo fornece código para inicializar a interface do usuário e contém uma estrutura para os retornos de chamada da interface. Cabendo ao desenvolvedor apenas programar códigos de retornos convenientes as necessidades de um usuário. Apesar de possuir uma interface amigável para a construção de aplicativos o ambiente *Guide* será removido em versões futuras do *Matlab*, sendo substituído pela ferramenta *app designer* que possui um maior número de componentes iterativos e uma maior compatibilidade com outros sistemas e linguagens. Apesar da remoção da ferramenta em versões futuras do *Matlab*, a empresa afirma que os aplicativos desenvolvidos até então continuarão em operacionalidade, no entanto, não poderão ser realizadas alterações em suas estruturas.

O aplicativo de processamento desenvolvido via utilização da ferramenta *Guide* conta com a presença de cinco módulos, sendo eles:

- a) Interseção a ré por transformação de Helmert 2D, com ajustamento por modelo paramétrico do MMQ;
- b) Nivelamento geométrico, com ajustamento pelo método de distâncias proporcionais;
- c) Nivelamento trigonométrico com correções do efeito da curvatura terrestre e da refração atmosférica;
- d) Método de Kukkamäki;
- e) Teste completo da norma ISO 17123-2.

Os demais métodos de levantamentos tiveram suas resoluções apenas com o desenvolvimento de scripts. O fluxograma de funcionamento do aplicativo é ilustrado na Figura 46, ao passo que sua tela inicial pode ser visualizada na Figura 47. As demais telas e relatórios advindos dos processamentos podem ser encontradas no Apêndice A.

Figura 46 – Aplicativo de processamento.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 47 – Tela inicial do aplicativo de processamento.



Fonte: O Autor (2020).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados alcançados ao longo do desenvolvimento desta dissertação, tendo sido os mesmos subdivididos em três seções. A primeira apresenta resultados alcançados, utilizando-se métodos de verificação e retificação de níveis digitais e estações totais, conforme seção 3.3.7, a segunda expõe os resultados alcançados para a Rede Geodésica Altimétrica Local implementada na área de estudo 2 utilizando métodos clássicos de levantamento expostos nas seções 3.3.5 e 3.3.6, por fim na terceira seção é possível encontrar os resultados obtidos para a rede planimétrica de acordo com os métodos de levantamentos expostos nas seções 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 e 3.3.4.

Os resultados foram ajustados através do modelo paramétrico do MMQ, conforme capítulo quatro e o nível de confiança utilizado foi de 95%.

6.1 VERIFICAÇÃO E AJUSTE DE EQUIPAMENTOS GEODÉSICOS / TOPOGRÁFICOS

Nesta seção serão discutidos os resultados alcançados através da aplicação de métodos de verificação e retificação nos níveis e estações totais que foram empregados nesta dissertação.

6.1.1 Resultados e Discussões a Partir do Uso de Nível Digital

O nível digital Leica DNA-03 utilizado foi verificado e ajustado a partir da aplicação do método de Kukkamäki e do teste completo da norma ISO 17123-2 (ISO, 2001). Os resultados são expostos nos itens 6.1.1.1 e 6.1.1.2.

6.1.1.1 Método de Kukkamäki

Os cálculos referentes à aplicação deste método foram realizados em campo com o auxílio de uma calculadora científica, e posteriormente confrontados com o módulo Método de Kukkamäki desenvolvido através da ferramenta *Guide* presente no software Matlab 2018^a e apresentado no Apêndice A. O procedimento consiste em basicamente calcular os desníveis observados para as diferentes configurações em que o instrumento é posicionado.

Os resultados e discussões decorrentes das duas aplicações do método de Kukkamäki na área de estudo 1 são apresentados nas seções 6.1.1.1.1 e 6.1.1.1.2.

6.1.1.1.1 Campanha de medição realizada em 11/02/2019

Os cálculos referentes à aplicação deste método foram realizados em campo com o auxílio de uma calculadora científica, o procedimento consiste em basicamente calcular os desníveis observados para as diferentes configurações em que o instrumento é posicionado. A Tabela 6 mostra as observações realizadas e os dados obtidos.

Tabela 6 – Método de Kukkamäki aplicado em 11/02/2019.

Estação	Ponto Visado	Leitura (m)	Distância (m)	Desnível (m)
E1	A	1,37604	9,97	-0,01561
E1	B	1,39165	9,97	
E2	B	1,41554	19,97	
E2	A	1,39972	39,96	0,01582

Fonte: O Autor (2020).

O conjunto de observações exposto na Tabela 6 permitiu encontrar um valor de 0,10 mm para o erro de colimação (c). Após os ajustes realizados através da função ajustar e verificar, presente no equipamento e descrita no item (a) desta seção, realizou-se novamente a aplicação do método, os dados observados podem ser visualizados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados observados após 1ª retificação do nível digital Leica DNA 03 realizada em 11/02/2019.

Estação	Ponto Visado	Leitura (m)	Distância (m)	Desnível (m)
E1	A	1,40587	9,97	-0,01570
E1	B	1,42157	9,98	
E2	B	1,42521	19,96	
E2	A	1,40997	39,97	0,01524

Fonte: O Autor (2020).

Após a retificação realizada o erro de colimação encontrado com base nos dados da Tabela 7 foi de 0,23 mm, sendo assim foi constatado não haver melhora em relação ao valor encontrado anteriormente, neste caso, optou-se por uma nova aplicação do método, os resultados encontrados são visualizados na Tabela 8.

Tabela 8 – 2ª aplicação do método de Kukkamäki em 11/02/2019.

Estação	Ponto Visado	Leitura (m)	Distância (m)	Desnível (m)
E1	A	1,42146	9,96	-0,01564
E1	B	1,43710	9,98	
E2	B	1,44786	19,97	
E2	A	1,43194	39,96	0,01592

Fonte: O Autor (2020).

O valor do erro de colimação para o novo conjunto de observações realizado foi de -0,14 mm e conforme feito anteriormente realizou-se o ajuste através da função verificar e ajustar e novamente aplicou-se o método de Kukkamäki, os resultados alcançados após a aplicação do segundo procedimento de ajuste e verificação são expostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Dados Observados Após 1ª Retificação do Nível Digital Leica DNA 03 Realizada em 11/02/2019.

Estação	Ponto Visado	Leitura (m)	Distância (m)	Desnível (m)
E1	A	1,44134	9,96	-0,01570
E1	B	1,45704	9,98	
E2	B	1,44024	19,97	
E2	A	1,42468	39,97	0,01556

Fonte: O Autor (2020).

Após a segunda retificação realizada o erro de colimação encontrado com base nos dados da Tabela 9 foi de 0,07 mm, uma melhora significativa em relação ao valor encontrado anteriormente, sendo assim, considerou-se o equipamento como verificado e ajustado.

Cabe destacar aqui que não era esperado a realização de quatro repetições em campo para que o equipamento fosse considerado verificado e ajustado. Em condições ideais este procedimento apenas deveria ter duas aplicações. A primeira para realizar os ajustes e a segunda para conferir se estes ajustes realmente foram efetivos. Uma das possíveis razões para a observação de um número maior de repetições do método pode ter sido o horário e as condições climáticas nas quais o mesmo foi realizado, tendo sido iniciado às 14:00 h de um dia de sol.

6.1.1.1.2 Campanha de medição realizada em 08/10/2019

Os procedimentos foram realizados igualmente ao levantamento realizado em 11/02/2019. Assim como na primeira aplicação do método realizada em 11/02/2019 também foram necessárias à aplicação de 4 conjunto de observações para que o ajuste do equipamento pudesse ser tomado como definitivo. As possíveis explicações para a ocorrência deste fato são as mesmas do levantamento anteriormente realizado, uma vez que o levantamento também foi realizado às 14:00 h de um dia de sol. Os dados coletados no primeiro conjunto de observações são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Método de Kukkamäki aplicado em 08/10/2019.

Estação	Ponto Visado	Leitura (m)	Distância (m)	Desnível (m)
E1	A	1,48959	9,99	
E1	B	1,50574	9,99	-0,01615
E2	B	1,50394	19,98	
E2	A	1,48854	39,98	0,01540

Fonte: O Autor (2020).

O conjunto de observações exposto na Tabela 10 permitiu encontrar um valor de 0,37 mm para o erro de colimação (c). Após os ajustes realizados através da função ajustar e verificar, presente no equipamento, realizou-se novamente a aplicação do método. Os dados observados podem ser visualizados na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados Observados Após 1ª Retificação do Nível Digital Leica DNA 03 realizada em 08/10/2019.

Estação	Ponto Visado	Leitura (m)	Distância (m)	Desnível (m)
E1	A	1,46826	9,98	
E1	B	1,48446	9,98	-0,0162
E2	B	1,47294	19,97	
E2	A	1,45712	39,95	0,01582

Fonte: O Autor (2020).

Após a retificação realizada o erro de colimação encontrado com base nos dados da Tabela 11 foi de 0,19 mm, sendo novamente constatado não haver melhora significativa em relação ao valor encontrado anteriormente, optando-se novamente por outra aplicação do método. Os resultados encontrados são visualizados na Tabela 12.

Tabela 12 – 2ª Aplicação do método de Kukkamäki em 08/10/2019.

Estação	Ponto Visado	Leitura (m)	Distância (m)	Desnível (m)
E1	A	1,45910	9,98	
E1	B	1,47531	9,98	-0,01621
E2	B	1,47957	19,97	
E2	A	1,46299	39,97	0,01658

Fonte: O Autor (2020).

O valor do erro de colimação para o novo conjunto de observações realizado foi de -0,18 mm e conforme feito anteriormente, realizou-se o ajuste através da função verificar e ajustar e novamente aplicou-se o método de Kukkamäki. Os resultados alcançados após a aplicação do segundo procedimento de ajuste e verificação são expostos na Tabela 13.

Tabela 13 – Dados observados após 2ª retificação do nível digital Leica DNA 03 realizada em 08/10/2019.

Estação	Ponto Visado	Leitura (m)	Distância (m)	Desnível (m)
E1	A	1,41750	9,98	-0,01619
E1	B	1,43369	9,98	
E2	B	1,45156	19,97	0,01606
E2	A	1,43550	39,96	

Fonte: O Autor (2020).

Após a segunda retificação realizada o erro de colimação encontrado com base nos dados da Tabela 13 foi de 0,06 mm, uma melhora significativa em relação ao valor encontrado anteriormente, sendo assim, considerou-se o equipamento como verificado e ajustado.

6.1.1.2 Teste Completo da Norma ISO 17123-2 (ISO, 2001)

Os cálculos necessários para a aplicação da ISO 17123-2 (ISO, 2001) foram obtidos através da utilização do módulo teste completo da ISO 17123-2 desenvolvido através da funcionalidade *Guide* disponível no software Matlab 2018^a, apresentado no apêndice A e posteriormente confrontado com planilhas criadas no Excel 2013. Os resultados serão apresentados nesta seção seguindo o procedimento metodológico proposto pela norma. Os dados obtidos para as vinte primeiras observações, através da aplicação do teste completo (item 6 da referida norma) na área de estudo 1 podem ser vistos na Tabela 14.

Tabela 14 – Teste completo ISO 17123-2 (ISO, 2001) das 20 primeiras leituras.

(Continua)

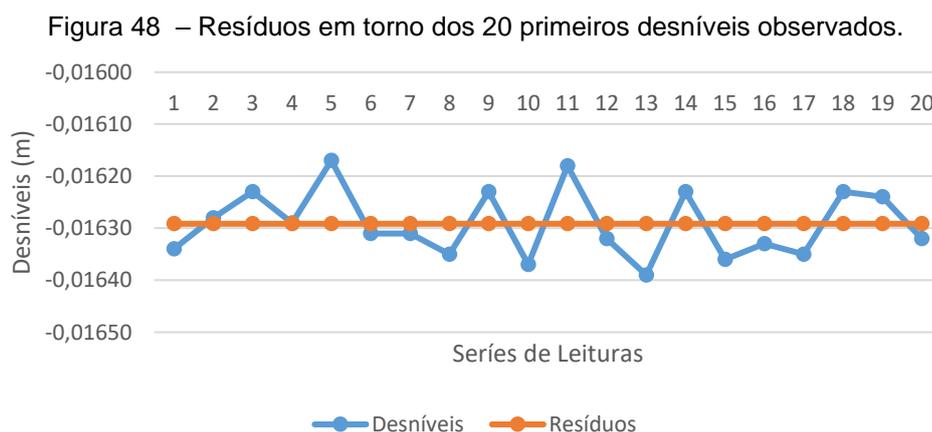
Leitura	Ré (m)	Vante (m)	Desnível (m)	Resíduo (mm)	Distância Ré (m)	Distância Vante (m)
1	1,33555	1,35189	-0,01634	0,05	29,97	29,94
2	1,34837	1,36465	-0,01628	-0,01	29,96	29,95
3	1,35976	1,37599	-0,01623	-0,06	29,96	29,96
4	1,37127	1,38756	-0,01629	0,00	29,97	29,97
5	1,38626	1,40243	-0,01617	-0,12	29,98	29,97
6	1,39584	1,41215	-0,01631	0,02	29,98	29,97
7	1,40784	1,42415	-0,01631	0,02	29,99	29,97
8	1,42135	1,43770	-0,01635	0,06	29,98	29,97
9	1,43271	1,44894	-0,01623	-0,06	29,99	29,97
10	1,44898	1,46535	-0,01637	0,08	29,98	29,97
11	1,35155	1,33537	-0,01618	-0,11	29,97	29,97
12	1,36898	1,35266	-0,01632	0,03	29,96	29,97
13	1,38363	1,36724	-0,01639	0,10	29,96	29,98

Tabela 14 – Teste completo ISO 17123-2 (ISO, 2001) das 20 primeiras leituras.

Leitura	Ré (m)	Vante (m)	Desnível (m)	Resíduo (m)	Distância Ré (m)	(Conclusão)
						Distância Vante (m)
14	1,39829	1,38206	-0,01623	-0,06	29,97	29,98
15	1,41924	1,40288	-0,01636	0,07	29,97	29,98
16	1,43287	1,41654	-0,01633	0,04	29,96	29,98
17	1,44869	1,43234	-0,01635	0,06	29,96	29,99
18	1,46395	1,44772	-0,01623	-0,06	29,97	29,97
19	1,47739	1,46115	-0,01624	-0,05	29,97	29,98
20	1,48510	1,46878	-0,01632	0,03	29,96	29,97
Σ	28,30050	27,97467	-0,32583	0,00	599,41	599,41

Fonte: O Autor (2020).

O desnível médio obtido durante as 20 primeiras observações foi -0,01629 metros, este valor é utilizado como base para o cálculo dos resíduos apresentados na Tabela 14. Tais resíduos equivalem à diferença entre o desnível médio calculado e o desnível obtido em campo para cada observação. O maior resíduo apresentado possui o valor de -0,12 mm, enquanto o menor foi de 0,00 mm, ocorrendo respectivamente na quinta e quarta leitura efetuada. A Figura 48 ilustra por meio de um gráfico os desníveis e respectivos resíduos encontrados ao longo das 20 primeiras observações.



Fonte: O Autor (2020).

Para a primeira série de observações realizadas (equivalentes às vinte primeiras leituras efetuadas), a norma recomenda a aplicação de dois testes aritméticos, no primeiro deles é necessário verificar se o somatório dos resíduos apresentados durante esta série de observações equivale a zero, condição que

conforme apresentado na Tabela 14 é plenamente aceita para os dados coletados. A segunda recomendação indica que a diferença entre o somatório das 20 primeiras leituras realizadas no ponto ré e o somatório das vinte primeiras leituras no ponto vante, deve ser equivalente ao somatório dos vinte primeiros desníveis. Condição que também é aceita uma vez que tanto a diferença entre o somatório das leituras quanto o somatório dos desníveis equivalem a -0,32583 metros.

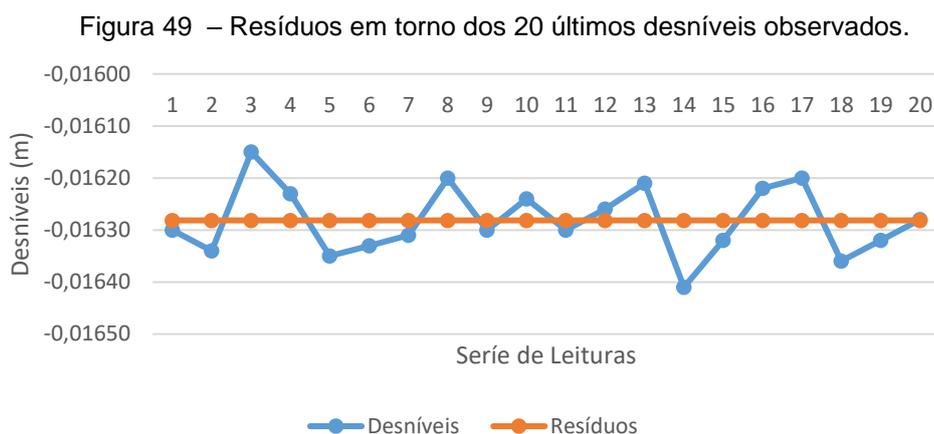
A Tabela 15 expõe o mesmo conjunto de dados apresentados na Tabela 14, no entanto agora são apresentados os valores obtidos através da aplicação do teste completo para as vinte últimas observações coletadas. Neste caso o desnível médio encontrado foi -0,01628 metros, o maior resíduo apresentado possui o valor de $\pm 0,13$ mm ocorrendo na 23ª e 34ª leituras, ao passo que o menor valor residual foi encontrado na 40ª leitura com valor de 0,00 mm. Novamente o somatório dos resíduos foi equivalente a zero, atendendo a condição recomendada.

Tabela 15 – Teste completo ISO 17123-2 (ISO, 2001) das 20 últimas leituras.

Leitura	Ré (m)	Vante (m)	Desnível (m)	Resíduo (mm)	Distância Ré (m)	Distância Vante (m)
21	1,33520	1,35150	-0,01630	0,02	29,98	29,95
22	1,34665	1,36299	-0,01634	0,06	29,97	29,95
23	1,36336	1,37951	-0,01615	-0,13	29,97	29,96
24	1,37977	1,39600	-0,01623	-0,05	29,97	29,95
25	1,39787	1,41422	-0,01635	0,07	29,96	29,95
26	1,40699	1,42332	-0,01633	0,05	29,96	29,96
27	1,4161	1,43241	-0,01631	0,03	29,95	29,96
28	1,43586	1,45206	-0,01620	-0,08	29,97	29,96
29	1,45516	1,47146	-0,01630	0,02	29,96	29,94
30	1,46884	1,48508	-0,01624	-0,04	29,97	29,95
31	1,35163	1,33533	-0,01630	0,02	29,95	29,97
32	1,36133	1,34507	-0,01626	-0,02	29,94	29,96
33	1,37333	1,35712	-0,01621	-0,07	29,95	29,96
34	1,38483	1,36842	-0,01641	0,13	29,95	29,96
35	1,39808	1,38176	-0,01632	0,04	29,94	29,96
36	1,41173	1,39551	-0,01622	-0,06	29,94	29,96
37	1,43513	1,41893	-0,01620	-0,08	29,95	29,96
38	1,45570	1,43934	-0,01636	0,08	29,95	29,96
39	1,47560	1,45928	-0,01632	0,04	29,94	29,95
40	1,48511	1,46883	-0,01628	0,00	29,96	29,96
Σ	28,30102	27,97539	-0,32563	0,00	599,13	599,13

Fonte: O Autor (2020).

A segunda recomendação também é aceita para os dados advindos da Tabela 15, uma vez que a diferença entre as vinte últimas leituras de ré e vante apresentadas equivale a -0,32563 metros, valor idêntico ao somatório dos desníveis para o conjunto de dados apresentados. A Figura 49 ilustra os desníveis e respectivos resíduos encontrados para cada leitura efetuada ao longo das 20 últimas observações.



Fonte: O Autor (2020).

Os dados apresentados nas Tabelas 14 e 15 permitem o cálculo dos valores expostos na Tabela 16, onde conforme a norma ISO 17123-2 (ISO, 2001):

- 1) Somatório dos resíduos ao quadrado ($\sum r^2$): equivale a soma dos quadrados dos vinte primeiros resíduos com os quadrados dos vinte últimos resíduos.
- 2) Graus de liberdade (ν): $2 \times$ (número de observações – número de incógnitas), neste caso o número de graus de liberdade equivale a 38.
- 3) Desvio padrão experimental (s): raiz quadrada do somatório dos resíduos ao quadrado dividido pelo número de graus de liberdade;
- 4) Desvio padrão por 1 km de nivelamento duplo (Siso-lev): segundo a norma ISO 17123-2 (ISO, 2001) corresponde ao desvio padrão experimental multiplicado por uma constante de valor 2,89.
- 5) Delta (Δ): diferença entre o desnível médio das vinte primeiras observações e o desnível médio das vinte últimas observações.

Tabela 16 – Resultados obtidos com a aplicação da ISO 17123-2.

Δ (mm)	$\sum r^2$ (mm)	v	S (mm)	Siso-lev (mm)
-0,01	0,00	38	$\pm 0,07$	$\pm 0,19$

Fonte: O Autor (2020).

Após a aplicação dos testes aritméticos e a obtenção dos valores visualizados na Tabela 16, a norma 17123-2 (ISO, 2001) prevê a aplicação de três testes estatísticos, os resultados advindos da aplicação destes testes são discutidos e analisados separadamente conforme recomenda a norma.

Questão a) Para que a hipótese seja aceita, o desvio padrão (S), obtido nos testes aritméticos deve ser menor ou igual ao valor do desvio padrão do instrumento multiplicado por uma constante de valor 1,19.

Conforme mencionado anteriormente o valor do desvio padrão do equipamento utilizado é $\pm 0,3$ mm. Tal valor multiplicado pela constante indicada na questão (a) resulta em $\pm 0,36$ mm, valor este que é maior que o desvio padrão encontrado na Tabela 16, de valor $\pm 0,07$ mm. Sendo assim, as observações realizadas satisfazem o teste estatístico indicado.

Questão b) A partir da análise da aplicação do teste através de duas amostras diferentes de medições, os desvios padrão obtidos em ambas campanhas pertencerão à mesma população, caso atendam a condição exposta na Equação 62:

$$0,52 \leq \frac{s^2}{s^2} \leq 1,91 \quad (62)$$

A execução deste teste exige que se tenha conhecimento do desvio padrão obtido com uma aplicação do método completo da ISO 17123-2 em uma outra época, nesse caso, utilizou-se o valor encontrado em Santos (2017) e Silva *et al.* (2018) de $\pm 0,06$ mm. Realizando a comparação com o valor de S exposto na Tabela 14 e aplicando-se a Equação 62, encontra-se o valor de 1,18, que está dentro do intervalo descrito na Equação 62, sendo assim, verifica-se que o teste b é atendido para o conjunto de observações realizadas.

Questão c) Caso a diferença delta obtida durante a aplicação das duas séries de 20 leituras realizadas na aplicação do teste for diferente de zero, então, a seguinte condição é observada:

$$\Delta \leq \frac{s^2}{\sqrt{10}} \times 2,02 \leq s \times 0,64 \quad (63)$$

Neste caso, novamente, verifica-se que o teste é aceito, uma vez que $-0,01 \leq 0,04 \leq 0,04$, conforme Equação 63.

6.2 LEVANTAMENTO DA REDE GEODÉSICA ALTIMÉTRICA LOCAL

Neste item são apresentados os resultados alcançados durante a implementação da Rede Geodésica Altimétrica Local, tal rede teve sua implementação em Canto (2018), tendo sido ampliada nesta dissertação e é constituída por seis pinos de superfícies semiesféricas situados nas bases das torres eólicas Gravatá 01 e Gravatá 02, 02 marcos geodésicos de referências superficiais denominados LP7 e LP8 e o pino PO08 fixado em afloramento rochoso, conforme apresentado no item 5.5.

6.2.1 Resultados e Discussões a Partir da Utilização de Nível Digital

Os resultados apresentados neste item se referem aos dados coletados durante quatro campanhas de medição realizadas entre os anos de 2018 e 2019. Nestas campanhas aplicou-se o método do nivelamento geométrico de altíssima precisão, utilizando o nível digital Leica DNA-03.

6.2.1.1 Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão

Neste subitem são apresentados os processamentos advindos dos dados obtidos ao longo das quatro campanhas de levantamentos empregando o método do nivelamento geométrico de altíssima precisão na área de estudo 2. A primeira e a segunda campanha foram realizadas em 20/04/2018 e 01/09/2018 fazendo parte das observações coletadas em Canto (2018), ao passo que a terceira e quarta campanha ocorreram em 14/02/2019 e 09/10/2019, sendo exclusivamente realizadas nesta dissertação. O intervalo temporal decorrido entre a primeira e a

última observação foi de 536 dias. Os resultados brutos alcançados são expostos nos subitens 6.2.1.1.1, 6.2.1.1.2, 6.2.1.1.3, 6.2.1.1.4.

6.2.1.1.1 Campanhas de Medições pré-existentes L01 (20/04/2018)

Os dados brutos das campanhas de nivelamento geométrico de altíssima precisão coletados em Canto (2018) foram reprocessados nesta dissertação, os resultados das linhas de nivelamento e contranivelamento dos circuitos aplicados sobre os pinos materializados nas bases das torres eólicas Gravatá 01, Gravatá 02 e entre as mesmas no dia 20/04/2018 são visualizados nas Tabelas 17, 18 e 19.

Tabela 17 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito I.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L1	RN02	RN01	1	0,01303	8,420
L2	RN01	RN03	1	-0,00251	8,490
L3	RN03	RN02	1	-0,01057	13,195
L18	RN02	RN03	1	0,01056	13,200
L19	RN03	RN01	1	0,00253	8,580
L20	RN01	RN02	1	-0,01310	9,560

Fonte: Canto (2018).

Tabela 18 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito III.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L5	RN02	RN04	16	12,66788	450,555
L16	RN04	RN02	16	-12,66779	449,841

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 19 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito V.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L7	RN04	RN05	1	0,00267	9,385
L8	RN05	RN06	1	-0,00022	12,310
L9	RN06	RN04	1	-0,00248	9,340
L10	RN04	RN06	1	0,00248	9,230
L11	RN06	RN05	1	0,00030	11,430
L12	RN05	RN04	1	-0,00278	8,520

Fonte: Canto (2018).

A análise das Tabelas 17, 18 e 19 permite afirmar que o maior desnível bruto observado ocorre no circuito III entre os pinos RN02 e RN04. Nesse caso o valor observado foi de 12,66788 metros em uma linha de nivelamento com extensão de 450,55 metros. Uma análise mais aprofundada acerca da qualidade atingida durante este levantamento é visualizada nas Tabelas 20, 21 e 22, que contêm os erros de fechamento, os perímetros, as tolerâncias altimétricas aceitáveis e as respectivas precisões alcançadas durante a execução do nivelamento geométrico de altíssima precisão, conforme equações descritas no item 3.3.5. O desvio padrão considerado

para o cálculo das tolerâncias e precisões alcançadas foi o de $\pm 0,3$ mm/km, conforme especificado pelo fabricante do nível digital Leica DNA-03.

Tabela 20 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito I.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
I	-0,05	0,0301	$\pm 0,16$	$\pm 0,28$	20/04/2018
I	0,01	0,0313	$\pm 0,16$	$\pm 0,03$	20/04/2018

Fonte: Canto (2018).

Tabela 21 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito III.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
III	-0,09	0,9004	$\pm 0,85$	$\pm 0,05$	20/04/2018

Fonte: Canto (2018).

Tabela 22 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito V.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
V	-0,02	0,0310	$\pm 0,16$	$\pm 0,07$	20/04/2018
V	0,00	0,0292	$\pm 0,15$	$\pm 0,00$	20/04/2018

Fonte: Canto (2018).

A partir da análise das Tabelas 20, 21 e 22 percebe-se que o maior erro de fechamento foi encontrado no circuito III, com valor de -0,09 mm e em todos os circuitos realizados houve o respeito aos valores de tolerâncias altimétricas previamente calculados, assim como as precisões esperadas foram alcançadas. Ressalta-se que devido ao fato de terem sido realizadas duas séries de leituras compostas por 4 observações, houve casos em que nem sempre se utilizou a média dessas observações para o cálculo do desnível entre um ponto e outro, optando-se por uma em detrimento de outra com o objetivo de minimizar os possíveis erros de fechamentos dos circuitos e assim obter uma melhor precisão para os levantamentos realizados. O erro de fechamento alcançado com o contranivelamento do circuito V foi nulo, devido a este motivo o valor da precisão alcançada ter sido igual a $\pm 0,00$ mm/km.

6.2.1.1.2 Campanha de Medições Pré-existentes L02 (01/09/2018)

Conforme ocorrido com a 1ª série de observações coletadas em Canto (2018) os dados referentes à 2ª série de observações realizada em 01/09/2018 foram reprocessados a partir dos dados brutos coletados em campo, os resultados encontrados podem ser vistos nas Tabelas 23, 24 e 25.

Tabela 23 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito I.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L1	RN02	RN01	1	0,01302	8,82
L2	RN01	RN03	1	-0,00245	9,265
L3	RN03	RN02	1	-0,01053	15,115
L18	RN02	RN03	1	0,01057	15,090
L19	RN03	RN01	1	0,00248	10,090
L20	RN01	RN02	1	-0,01310	9,740

Fonte: Canto (2018).

Tabela 24 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito III.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L5	RN02	RN04	16	12,66750	452,845
L16	RN04	RN02	16	-12,66738	454,050

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 25 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito V.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L7	RN04	RN05	1	0,00269	10,970
L8	RN05	RN06	1	-0,00023	12,980
L9	RN06	RN04	1	-0,00246	9,980
L10	RN04	RN06	1	0,00248	10,055
L11	RN06	RN05	1	0,00026	12,200
L12	RN05	RN04	1	-0,00279	9,280

Fonte: Canto (2018).

Os respectivos erros de fechamento, perímetros, tolerâncias altimétricas aceitáveis e precisões alcançadas durante a execução do método de nivelamento geométrico de altíssima precisão na campanha de medição realizada em 01/09/2018 podem ser consultados nas Tabelas 26, 27 e 28.

Tabela 26 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito I.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
I	0,04	0,0332	± 0,16	± 0,19	01/09/2018
I	-0,05	0,0349	± 0,17	± 0,27	01/09/2018

Fonte: Canto (2018).

Tabela 27 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito III.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
III	0,11	0,9069	± 0,86	± 0,12	01/09/2018

Fonte: Canto (2018).

Tabela 28 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito V.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
V	-0,01	0,0339	± 0,17	± 0,05	01/09/2018
V	-0,04	0,0315	± 0,16	± 0,25	01/09/2018

Fonte: Canto (2018).

A observação das Tabelas 26, 27 e 28 permite afirmar que os índices de qualidade estabelecidos foram respeitados, com os índices de precisão dos nivelamentos mantendo-se no geral dentro de uma faixa de precisão aceitável, observando-se um discreto decréscimo de qualidade em relação às precisões obtidas no levantamento realizado em 20/04/2018. O maior erro de fechamento foi encontrado no circuito III, com valor de 0,11 mm, enquanto a tolerância de erro altimétrico admitido nessa situação foi de ± 0,86 mm.

6.2.1.1.3 Campanha de Medição L03 (14/02/2019).

Os processamentos realizados para os dados coletados em campo durante a terceira campanha de observações utilizando o método de nivelamento geométrico foram análogos aos utilizados para o processamento dos dados advindos das duas primeiras séries observadas, ressaltando-se o fato de que foram adicionados três novos circuitos de nivelamento/contranivelamento sendo eles os circuitos II, IV, VI descritos no item 5.5.1.1 e na Tabela 4. Os respectivos desníveis observados podem ser visualizados nas Tabelas 29, 30, 31, 32, 33 e 34.

Tabela 29 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito I.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L1	RN02	RN01	1	0,01288	10,750
L2	RN01	RN03	1	-0,00229	10,650
L3	RN03	RN02	1	-0,01062	15,930
L18	RN02	RN03	1	0,01057	15,930
L19	RN03	RN01	1	0,00236	10,640
L20	RN01	RN02	1	-0,01282	11,045

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 30 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito II.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L4	RN02	LP7	3	-1,42231	143,612
L15	LP7	RN02	3	1,42239	143,157

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 31 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito III.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L5	RN02	RN04	16	12,66706	455,597
L16	RN04	RN02	16	-12,66698	455,288

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 32 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito IV.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L6	LP7	RN04	19	14,08937	311,985
L17	RN04	LP7	19	-14,08937	312,132

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 33 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito V.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L7	RN04	RN05	1	0,00259	13,145
L8	RN05	RN06	1	-0,00002	14,985
L9	RN06	RN04	1	-0,00260	11,080
L10	RN04	RN06	1	0,00259	11,090
L11	RN06	RN05	1	-0,00001	15,530
L12	RN05	RN04	1	-0,00261	11,505

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 34 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito VI.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L13	RN04	LP8	3	-3,78098	79,950
L14	LP8	RN04	3	3,78087	80,240

Fonte: O Autor (2020).

Os respectivos erros de fechamento, perímetros, tolerâncias altimétricas aceitáveis e precisões alcançadas durante a execução do método de nivelamento geométrico de altíssima precisão na campanha de medição realizada em 14/02/2019 podem ser consultados nas Tabelas 35, 36, 37, 38, 39 e 40.

Tabela 35 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito I.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
I	-0,03	0,0373	± 0,17	± 0,06	14/02/2019
I	0,11	0,0376	± 0,17	± 0,30	14/02/2019

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 36 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito II.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
II	0,09	0,2868	± 0,48	± 0,08	01/09/2018

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 37 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito III.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
III	0,08	0,9109	± 0,86	± 0,04	14/02/2019

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 38 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito IV.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
IV	0,00	0,6241	± 0,71	± 0,00	14/02/2019

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 39 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito V.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
V	-0,04	0,0392	± 0,18	± 0,09	14/02/2019
V	-0,03	0,0381	± 0,18	± 0,08	14/02/2019

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 40 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito VI.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
VI	-0,11	0,1602	± 0,36	± 0,14	14/02/2019

Fonte: O Autor (2020).

A análise das Tabelas 35 a 40 permite observar a ocorrência de ao menos dois circuitos com valores de erros de fechamento superiores aos centésimos de milímetros, sendo eles o contranivelamento do circuito (I) com valor de 0,11 mm e o circuito (VI) com valor de -0,11 mm, em ambas as situações os erros encontrados estiveram dentro dos limites da tolerância altimétrica admissível.

6.2.1.1.4 Campanha de Medição L04 (09/10/2019).

Por fim a quarta série de observações realizada entre os pinos posicionados sobre as torres Gravatá 01 e 02 ocorreu em 09/10/2019, nela além dos vértices de referência LP7 e LP8, também passaram a fazer parte dos circuitos os vértices PO01, PO02, PO07 e PO08. Os respectivos desníveis brutos observados, decorrentes desta série de observações, podem ser visualizados nas Tabelas 41, 42, 43, 44, 45, 46 e 47.

Tabela 41 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito I.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L1	RN02	RN01	1	0,01313	10,990
L2	RN01	RN03	1	-0,00271	9,990
L3	RN03	RN02	1	-0,01046	16,780
L18	RN02	RN03	1	0,01053	16,750
L19	RN03	RN01	1	0,00261	10,670
L20	RN01	RN02	1	-0,01314	11,050

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 42 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito II.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L4	RN02	LP7	4	-1,42372	207,050
L15	LP7	RN02	4	1,42357	206,680

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 43 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito III

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L5	RN02	RN04	26	12,66698	565,730
L16	RN04	RN02	26	-12,66709	566,500

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 44 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito IV.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L6	LP7	RN04	22	14,09070	358,680
L17	RN04	LP7	22	-14,09066	359,820

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 45 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito V.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L7	RN04	RN05	1	0,00271	10,800
L8	RN05	RN06	1	-0,00026	16,010
L9	RN06	RN04	1	-0,00244	10,325
L10	RN04	RN06	1	0,00241	10,240
L11	RN06	RN05	1	0,00031	15,400
L12	RN05	RN04	1	-0,00270	11,000

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 46 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito VI.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L13	RN04	LP8	3	-3,78206	57,705
L14	LP8	RN04	3	3,78214	58,090

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 47 – Desníveis brutos a partir do nivelamento e contranivelamento do circuito VII.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L21	LP8	PO01	1	-0,20638	7,230
L22	PO01	PO02	1	-0,30932	12,230
L23	PO02	PO07	1	-0,90792	11,355
L24	PO07	PO08	1	0,38699	9,915
L25	PO08	LP8	1	1,03676	9,160
L26	LP8	PO08	1	-1,03663	9,145

Fonte: O Autor (2020).

Os erros de fechamento, perímetros, tolerâncias altimétricas aceitáveis e precisões alcançadas durante o nivelamento geométrico de altíssima precisão realizado em 09/10/2019 são apresentados nas Tabelas 48, 49, 50, 51, 52 e 53. É

importante mencionar que devido a condições climáticas e de iluminação não foi possível finalizar o circuito de contranivelamento entre todos os oito pontos-objeto posicionados sobre a rocha e o vértice LP8, com exceção do alinhamento PO08-LP8.

Tabela 48 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito I.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
I	-0,04	0,0378	± 0,17	± 0,10	09/10/2019
I	0,00	0,0385	± 0,18	± 0,00	09/10/2019

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 49 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito II.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
II	-0,15	0,4137	± 0,58	± 0,12	09/10/2019

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 50 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito III.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
III	0,11	1,1322	± 0,96	± 0,05	09/10/2019

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 51 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito IV.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
IV	0,04	0,7185	± 0,76	± 0,02	09/10/2019

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 52 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito V.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
V	0,01	0,0371	± 0,17	± 0,03	09/10/2019
V	0,02	0,0366	± 0,17	± 0,07	09/10/2019

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 53 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito VI.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
VI	0,08	0,1158	± 0,31	± 0,12	09/10/2019

Fonte: O Autor (2020).

O maior erro de fechamento altimétrico apresentado nas Tabelas 48 a 53 foi observado no circuito (II) com valor de 0,15 mm e a tolerância altimétrica admissível para esta situação possui o valor de 0,58 mm. As precisões encontradas foram compatíveis com a aplicação do método do nivelamento geométrico utilizando um equipamento de altíssima precisão.

6.2.1.2 Ajustamento MMQ – modelo paramétrico

Os resultados advindos das quatro campanhas de observações, onde foi aplicado o método do nivelamento geométrico de altíssima precisão foram ajustados utilizando o modelo paramétrico do Método dos Mínimos Quadrados, conforme item 4.1.2. Os dados advindos da 1ª e 2ª campanhas de medições foram obtidos considerando-se a que a RN02 possui cota altimétrica fixa no valor de 1000 metros, em relação às 3ª e 4ª campanhas realizadas, buscou-se a determinação de referenciais altimétricos absolutos representados pela implantação dos vértices LP8 e LP7 (3ª e 4ª campanhas) e PO08 (4ª campanha).

As matrizes e vetores envolvidos, a análise da Matriz Variância – Covariância - MVC, os resíduos encontrados, os desníveis e cotas altimétricas ajustadas em cada série de observações são abordados adiante. O nível de significância considerado foi de 5% e a análise estatística dos resultados foi considerada aplicando-se o teste do Qui-Quadrado – χ^2 . O ajustamento dos dados será abordado adiante através da análise de 4 cenários, expostos nos itens 6.2.1.2.1, 6.2.1.2.2, 6.2.1.2.3 e 6.2.1.2.4.

6.2.1.2.1 Análise do desnível entre RN02 e RN04 obtidos durante as 1ª e 2ª campanhas de levantamento realizadas

O primeiro cenário abordado envolve os dados obtidos em Canto (2018) e reprocessados nesta dissertação. A configuração destas campanhas de levantamentos procura analisar os desníveis obtidos entre os pinos RN02 e RN04, para esse caso a estratégia utilizada foi a de fixar a cota altimétrica da RN02 em 1000 metros e assim determinar os respectivos desníveis e cotas altimétricas ajustadas.

A discussão neste primeiro cenário não será conduzida para a determinação de recalques parciais e acumulados entre estes levantamentos, uma vez que a

RN02 por estar posicionada sobre a estrutura do objeto monitorado é considerada um ponto objeto ao invés de um ponto de referência. Nesse caso a análise temporal será realizada nos subitens 6.2.1.3, 6.2.1.4 e 6.2.1.5 através da comparação entre os desníveis ajustados obtidos. O ajustamento dos circuitos de nivelamento e contranivelamento será demonstrado neste subitem, tomando como base a 1ª campanha de observações realizada.

O vetor dos valores observados é formado pelos desníveis brutos obtidos das linhas niveladas e contraniveladas entre os pinos RN01, RN03, RN04, RN05 e RN06, conforme Equação 64.

$$L_b = \begin{bmatrix} L1 \\ L2 \\ L3 \\ L5 \\ L7 \\ L8 \\ L9 \\ L10 \\ L11 \\ L12 \\ L16 \\ L18 \\ L19 \\ L20 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,01303+RN02 \\ -0,00251 \\ -0,01057-RN02 \\ RN02+12,66788 \\ 0,00267 \\ -0,00022 \\ -0,00248 \\ 0,00248 \\ 0,00030 \\ -0,00278 \\ -12,66779-RN02 \\ RN02+0,01057 \\ 0,00253 \\ -0,01310-RN02 \end{bmatrix} \text{ m} \quad (64)$$

A matriz A, apresentada na Equação 79, é dada pelos coeficientes das incógnitas das equações de observação (Equações 65 a 78).

$$L1=RN01-RN02 \quad (65)$$

$$L2=RN03-RN01 \quad (66)$$

$$L3=RN02-RN03 \quad (67)$$

$$L5=RN04-RN02 \quad (68)$$

$$L7=RN05-RN04 \quad (69)$$

$$L8=RN06-RN05 \quad (70)$$

$$L9=RN04-RN06 \quad (71)$$

$$L10=RN06-RN04 \quad (72)$$

$$L11=RN05-RN06 \quad (73)$$

$$L12=RN04-RN05 \quad (74)$$

$$L16=RN02-RN04 \quad (75)$$

$$L18=RN03-RN02 \quad (76)$$

$$L19=RN01-RN03 \quad (77)$$

$$L20=RN02-RN01 \quad (78)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (79)$$

O ajustamento se deu através da aplicação da Equação 49 conforme item 4.1.2, onde a matriz peso foi tomada como o inverso das distâncias das linhas de nivelamento/contranivelamento aplicadas na área de estudo 2. Os desníveis ajustados, resíduos e respectivos desvios padrão dos resultados coletados na primeira campanha de observações podem ser visualizados na Tabela 54.

Tabela 54 – Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, III e V (1ª campanha de medições).

Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Resíduos (mm)	Desvio Padrão (mm)
I	RN02	RN01	0,01307	0,04	± 0,02
I	RN01	RN03	-0,00251	0,00	± 0,02
I	RN03	RN02	-0,01056	0,01	± 0,02
III	RN02	RN04	12,66783	-0,05	± 0,18
V	RN04	RN05	0,00273	0,06	± 0,02
V	RN05	RN06	-0,00026	-0,04	± 0,02
V	RN06	RN04	-0,00248	0,00	± 0,02
V	RN04	RN06	0,00248	0,00	± 0,02
V	RN06	RN05	0,00026	-0,04	± 0,02
V	RN05	RN04	-0,00273	0,05	± 0,02
III	RN04	RN02	-12,66783	-0,04	± 0,18
I	RN02	RN03	0,01056	-0,01	± 0,02
I	RN03	RN01	0,00251	-0,02	± 0,02
I	RN01	RN02	-0,01307	0,03	± 0,02

Fonte: O Autor (2020).

Da Tabela 54 conclui-se que o maior desnível ajustado encontrado se encontra no circuito III entre os pinos RN02 e RN04 com um valor de 12,66783 metros, ainda nestes pinos são apresentados os maiores valores residuais e desvios padrão para o desnível ajustado, com valores de 0,05 mm e ± 0,18 mm, respectivamente. As cotas altimétricas ajustadas assim como seus desvios padrão são apresentadas na Tabela 55.

Tabela 55 – Cotas altimétricas ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 01.

Pinos	Cotas Ajustadas (m)	Desvio Padrão (mm)	$2,700 \leq \chi^2 \leq 19,023$
RN01	1000,01307	$\pm 0,02$	
RN03	1000,01056	$\pm 0,02$	
RN04	1012,66783	$\pm 0,18$	14,571
RN05	1012,67057	$\pm 0,18$	
RN06	1012,67031	$\pm 0,18$	

Fonte: O Autor (2020).

Os resultados apresentados na Tabela 55 mostram resultados de desvios padrão máximos de 0,18 mm e mínimos de $\pm 0,02$ mm. O valor do Qui-quadrado calculado foi de 14,571, sendo assim, a um nível de confiança de 95% e considerando-se 9 graus de liberdade (14 observações X 5 incógnitas) o ajustamento dos dados foi aceito. O processamento dos dados advindos da 2ª campanha de medições é análogo ao descrito para a 1ª campanha de medições, deste modo, os desníveis ajustados, resíduos, desvios padrão e cotas altimétricas ajustadas são apresentados nas Tabelas 56 e 57.

Tabela 56 – Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, III e V (2ª campanha de medições).

Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Resíduos (mm)	Desvio Padrão (mm)
I	RN02	RN01	0,01305	0,03	$\pm 0,02$
I	RN01	RN03	-0,00248	-0,03	$\pm 0,02$
I	RN03	RN02	-0,01057	-0,04	$\pm 0,02$
III	RN02	RN04	12,66744	-0,06	$\pm 0,17$
V	RN04	RN05	0,00274	0,05	$\pm 0,02$
V	RN05	RN06	-0,00026	-0,03	$\pm 0,02$
V	RN06	RN04	-0,00248	-0,02	$\pm 0,02$
V	RN04	RN06	0,00248	0,00	$\pm 0,02$
V	RN06	RN05	0,00026	0,00	$\pm 0,02$
V	RN05	RN04	-0,00274	0,05	$\pm 0,02$
III	RN04	RN02	-12,66744	-0,06	$\pm 0,17$
I	RN02	RN03	0,01057	0,00	$\pm 0,02$
I	RN03	RN01	0,00248	0,00	$\pm 0,02$
I	RN01	RN02	-0,01305	0,05	$\pm 0,02$

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 57 - Cotas altimétrica ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 02.

(Continua)

Pinos	Cotas Ajustadas (m)	Desvio Padrão (mm)	$2,700 \leq \chi^2 \leq 19,023$
RN01	1000,01305	$\pm 0,02$	13,020
RN03	1000,01057	$\pm 0,02$	

Tabela 57 - Cotas altimétrica ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 02.

Pinos	Cotas Ajustadas (m)	Desvio Padrão (mm)	(Conclusão)
			$2,700 \leq \chi^2 \leq 19,023$
RN04	1012,66744	$\pm 0,17$	13,020
RN05	1012,67018	$\pm 0,17$	
RN06	1012,66992	$\pm 0,17$	

Fonte: O Autor (2020).

Em relação aos dados ajustados advindos da 2ª campanha de medições tem-se que para as observações ajustadas o maior resíduo encontrado foi de -0,06 mm entre os pinos RN02 e RN04, ao passo que o maior desvio-padrão foi observado no circuito que compreende os pinos RN02 e RN04 com valor de $\pm 0,17$ mm, no que diz respeito aos parâmetros ajustados observa-se os maiores desvios padrão encontrados na ordem de $\pm 0,17$ mm para os pinos RN04, RN05 e RN06. O valor do Qui-quadrado calculado foi de 13,020, sendo assim, a um nível de confiança de 95% e considerando-se 9 graus de liberdade (14 observações X 5 incógnitas) o ajustamento dos dados foi aceito. Nota-se no geral que os resultados do ajustamento apresentados na 1ª e 2ª campanha de medições apresentaram valores muito similares no que diz respeito às precisões e resíduos encontrados. Detalhes adicionais acerca do ajustamento das observações considerando este primeiro cenário podem ser encontrados nos apêndices B e C.

6.2.1.2.2 Estudo do desnível entre LP7 e LP8 obtido nas 3ª e 4ª campanhas de levantamentos considerando a RN02 com cota Fixa de 1000 metros

A partir da terceira campanha de medição realizada na área de estudo 2, o modelo matemático do circuito passou por algumas alterações, sendo elas advindas da adição de mais quatro circuitos (II, IV, VI, VII) a rede de nivelamento/contranivelamento. Nesta etapa da dissertação os vértices LP8 e LP7 passaram a integrar as linhas de nivelamento/contranivelamento, com o detalhe de que os mesmos foram posicionados em locais seguros e estáveis fora da superfície do objeto monitorado.

Neste cenário novamente fez-se a análise dos desníveis obtidos entre RN02 e RN04 tomando-se RN02 com cota fixa de 1000 metros e assim como no primeiro a discussão será conduzida para a análise temporal das discrepâncias encontradas entre os desníveis ajustados. Desta vez, considerando-se os dados obtidos na terceira e quarta campanha de medições.

Tomando-se como forma de exemplo os dados obtidos na terceira campanha de medições, tem-se que o vetor dos valores observados é formado pelos desníveis brutos obtidos das linhas niveladas e contraniveladas entre os pinos RN01, RN03, LP7, RN04, RN05, RN06 e LP8, conforme Equação 80.

$$L_b = \begin{bmatrix} L1 \\ L2 \\ L3 \\ L4 \\ L5 \\ L6 \\ L7 \\ L8 \\ L9 \\ L10 \\ L11 \\ L12 \\ L13 \\ L14 \\ L15 \\ L16 \\ L17 \\ L18 \\ L19 \\ L20 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,1288+RN02 \\ -0,00229 \\ -0,01062-RN02 \\ RN02-1,42231 \\ RN02+12,66706 \\ 14,08937 \\ 0,00259 \\ -0,00002 \\ -0,00260 \\ 0,00259 \\ -0,00001 \\ -0,00261 \\ -3,78098 \\ 3,78087 \\ -14,08937 \\ -12,66698-RN02 \\ 1,42239-RN02 \\ RN02+0,01057 \\ 0,00236 \\ -0,01282 \end{bmatrix} \quad (80)$$

A Equação 101 expõe a matriz A formada pelos coeficientes das incógnitas das equações de observação (Equações 81 a 100).

$$L1=RN01-RN02 \quad (81)$$

$$L2=RN03-RN01 \quad (82)$$

$$L3=RN02-RN03 \quad (83)$$

$$L4=LP7-RN02 \quad (84)$$

$$L5=RN04-RN02 \quad (85)$$

$$L6=RN04-LP7 \quad (86)$$

$$L7=RN05-RN04 \quad (87)$$

$$L8=RN06-RN05 \quad (88)$$

$$L9=RN04-RN06 \quad (89)$$

$$L10=RN06-RN04 \quad (90)$$

$$L11=RN05-RN06 \quad (91)$$

$$L12=RN04-RN05 \quad (92)$$

$$L13=LP8-RN04 \quad (93)$$

$$L14=RN04-LP8 \quad (94)$$

$$L15=LP7-RN04 \quad (95)$$

$$L16=RN02-RN04 \quad (96)$$

$$L17=RN02-LP7 \quad (97)$$

$$L18=RN03-RN02 \quad (98)$$

$$L19=RN01-RN03 \quad (99)$$

$$L20=RN02-RN01 \quad (100)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (101)$$

Os desníveis ajustados, resíduos e respectivos desvios padrão dos resultados coletados na terceira campanha de observações pode ser visualizados na Tabela 58.

Tabela 58– Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, II, III, IV e V (3ª campanha de medições).

(Continua)

Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Resíduos (mm)	Desvio Padrão (mm)
I	RN02	RN01	0,01287	-0,01	± 0,02
I	RN01	RN03	-0,00231	-0,02	± 0,02
I	RN03	RN02	-0,01057	0,05	± 0,02
II	RN02	LP7	-1,42235	-0,04	± 0,06
III	RN02	RN04	12,66702	-0,04	± 0,09
IV	LP7	RN04	14,08937	0,00	± 0,08
V	RN04	RN05	0,00260	0,01	± 0,02
V	RN05	RN06	-0,00001	0,01	± 0,02
V	RN06	RN04	-0,00260	0,00	± 0,02
V	RN04	RN06	0,00260	0,01	± 0,02
V	RN06	RN05	0,00001	0,02	± 0,02
V	RN05	RN04	-0,00260	0,01	± 0,02
VI	RN04	LP8	-3,78093	0,05	± 0,05
VI	LP8	RN04	3,78093	0,06	± 0,05
IV	RN04	LP7	-14,08937	0,00	± 0,08
III	RN04	RN02	-12,66702	-0,04	± 0,09

Tabela 58– Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, II, III, IV e V (3ª campanha de medições).

(Conclusão)					
Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Resíduos (mm)	Desvio Padrão (mm)
II	LP7	RN02	1,42235	-0,04	± 0,06
I	RN02	RN03	0,01057	0,00	± 0,02
I	RN03	RN01	0,00231	-0,05	± 0,02
I	RN01	RN02	-0,01287	-0,05	± 0,02

Fonte: O Autor (2020).

A partir da Tabela 58 conclui-se que o maior desnível encontrado está no circuito III entre os pinos LP7 e RN04 com um valor de 14,08937 metros, o maior valor residual está na ordem de 0,06 mm entre os pinos LP8 e RN04, enquanto que o maior desvio padrão para um desnível ajustado possui o valor de 0,09 mm entre os pinos (RN02-RN04). As cotas altimétricas ajustadas assim como seus desvios padrão são apresentadas na Tabela 59.

Tabela 59 - Cotas altimétricas ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 03.

Pinos	Cotas Ajustadas (m)	Desvio Padrão (mm)	$5,009 \leq \chi^2 \leq 24,736$
RN01	1000,01287	± 0,02	
RN03	1000,01057	± 0,02	
LP7	998,57765	± 0,06	
RN04	1012,66702	± 0,09	9,860
RN05	1012,66962	± 0,09	
RN06	1012,66962	± 0,09	
LP8	1008,88609	± 0,10	

Fonte: O Autor (2020).

Os resultados apresentados na Tabela 59 mostram resultados de desvios padrão máximos de 0,10 mm para o pino LP8, e mínimos de 0,02 mm para os pinos RN01 e RN03. O valor do Qui-quadrado calculado foi de 9,860, sendo assim, a um nível de confiança de 95% e considerando-se 13 graus de liberdade (20 observações X 7 incógnitas) o ajustamento dos dados foi aceito.

O processamento dos dados advindos da 4ª campanha de medições é análogo ao descrito para a 3ª campanha de medições, sendo assim, os desníveis ajustados, resíduos, desvios padrão e cotas altimétricas ajustadas são apresentados nas Tabelas 60 e 61.

Tabela 60 – Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, II, III, IV e V (4ª Campanha de Medições).

Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Resíduos (mm)	Desvio Padrão (mm)
I	RN02	RN01	0,01314	0,01	± 0,02
I	RN01	RN03	-0,00266	0,05	± 0,02
I	RN03	RN02	-0,01049	-0,03	± 0,02
II	RN02	LP7	-1,42366	0,06	± 0,08
III	RN02	RN04	12,66700	0,02	± 0,10
IV	LP7	RN04	14,09066	-0,04	± 0,09
V	RN04	RN05	0,00271	0,00	± 0,02
V	RN05	RN06	-0,00028	-0,02	± 0,02
V	RN06	RN04	-0,00242	0,02	± 0,02
V	RN04	RN06	0,00242	0,01	± 0,02
V	RN06	RN05	0,00028	-0,03	± 0,02
V	RN05	RN04	-0,00271	-0,01	± 0,02
VI	RN04	LP8	-3,78210	-0,04	± 0,05
VI	LP8	RN04	3,78210	-0,04	± 0,05
IV	RN04	LP7	-14,09066	0,00	± 0,09
III	RN04	RN02	-12,66700	-0,05	± 0,10
II	LP7	RN02	1,42366	0,09	± 0,08
I	RN02	RN03	0,01049	-0,04	± 0,02
I	RN03	RN01	0,00266	0,05	± 0,02
I	RN01	RN02	-0,01314	0,00	± 0,02

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 61 - Cotas altimétricas ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 04.

Pinos	Cotas Ajustadas (m)	Desvio Padrão (mm)	$5,009 \leq \chi^2 \leq 24,736$
RN01	1000,01314	± 0,02	
RN03	1000,01049	± 0,02	
LP7	998,57634	± 0,08	10,114
RN04	1012,66700	± 0,10	
RN05	1012,66971	± 0,10	
RN06	1012,66942	± 0,10	
LP8	1008,88490	± 0,11	

Fonte: O Autor (2020).

Os dados ajustados advindos da 4ª campanha de medições apresentaram em relação as observações ajustadas maiores valores residuais entre os pinos LP7 e RN02 com valor de 0,24 mm, ao passo que o maior desvio padrão encontrado foi de ± 0,10 mm entre os pinos RN04 e RN02. No que diz respeito aos parâmetros ajustados tem-se que o maior desvio padrão observado foi de ± 0,11 mm para a cota altimétrica ajustada do vértice LP8, ao passo que o menor desvio padrão observado foi de ± 0,02 mm para a cota altimétrica dos vértices RN01 e RN03. Nota-se no geral que o resultado do ajustamento realizado na 3ª campanha de medições

foi um pouco superior, no que diz respeito a precisão, em relação aos dados advindos da 4ª campanha de medições realizada.

O valor do Qui Quadrado calculado foi de 10,114 que está dentro do intervalo especificado na Tabela do Qui Quadrado e apresentado na Tabela 61, sendo assim, considerando-se um nível de significância de 5% e 13 graus de liberdade (20 observações \times 7 incógnitas) o ajustamento é aceito a um nível de confiança de 95%. Detalhes adicionais acerca do ajustamento das observações considerando este segundo cenário podem ser encontrados nos apêndices D e E.

6.2.1.2.3 Estudo do desnível entre LP7 e LP8 obtido na 3ª e 4ª campanhas de levantamento considerando o vértice LP8 como ponto de referência superficial com cota Fixa de 1000 metros.

No terceiro cenário, a discussão foi conduzida para análise de uma composição para o ajustamento das observações via modelo paramétrico do MMQ, na qual o vértice LP8 fosse tomado como ponto de referência absoluta, embora o mesmo apresente natureza superficial. O termo superficial é utilizado devido ao fato de o vértice LP8 ser constituído por um marco de concreto assentado sobre o solo ao invés de uma haste metálica profunda. Os desníveis brutos observados para esta situação foram anteriormente apresentados nos itens 6.2.1.1.3 e 6.2.1.1.4.

Os desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão considerando o terceiro cenário e os dados da 3ª campanha de medições são apresentados na Tabelas 62.

Tabela 62 – Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, II, III, IV, V e VI (3ª Campanha De Medições).

(Continua)

Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Resíduos (mm)	Desvio Padrão (mm)
VI	LP8	RN04	3,78093	0,06	± 0,05
V	RN04	RN06	0,00260	0,01	± 0,02
V	RN06	RN05	0,00001	0,02	± 0,02
V	RN05	RN04	-0,00260	0,01	± 0,02
IV	RN04	LP7	-14,08937	0,00	± 0,08
III	RN04	RN02	-12,66702	-0,04	± 0,09
II	LP7	RN02	1,42235	-0,04	± 0,06
I	RN02	RN03	0,01057	0,00	± 0,02
I	RN03	RN01	0,00231	-0,05	± 0,02
I	RN01	RN02	-0,01287	-0,05	± 0,02
I	RN02	RN01	0,01287	-0,01	± 0,02
I	RN01	RN03	-0,00231	-0,02	± 0,02
I	RN03	RN02	-0,01057	0,05	± 0,02

Tabela 62 – Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, II, III, IV, V e VI (3ª Campanha De Medições).

(Conclusão)					
Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Resíduos (mm)	Desvio Padrão (mm)
II	RN02	LP7	-1,42235	-0,04	± 0,06
III	RN02	RN04	12,66702	-0,04	± 0,09
IV	LP7	RN04	14,08937	0,00	± 0,08
V	RN04	RN05	0,00260	0,01	± 0,02
V	RN05	RN06	-0,00001	0,01	± 0,02
V	RN06	RN04	-0,00260	0,00	± 0,02
VI	RN04	LP8	-3,78093	0,05	± 0,05

Fonte: O Autor (2020).

A partir da Tabela 62 conclui-se que o maior desnível encontrado está no circuito III entre os pinos LP7 e RN04 com um valor de 14,08937 metros, o maior valor residual está na ordem de 0,06 mm entre os pinos LP8 e RN04, enquanto que o maior desvio padrão para um desnível ajustado possui o valor de ± 0,09 mm entre os pinos (RN02-RN04). As cotas altimétricas ajustadas assim como seus respectivos desvios padrão são apresentadas na Tabela 63.

Tabela 63 - Cotas altimétricas ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 03, tomando LP8 como ponto de referência superficial.

Pinos	Cotas Ajustadas (m)	Desvio Padrão (m)	$5,009 \leq \chi^2 \leq 24,736$
RN01	991,12678	± 0,10	
RN02	991,11391	± 0,10	
RN03	991,12447	± 0,10	
LP7	989,69156	± 0,10	9,860
RN04	1003,78093	± 0,05	
RN05	1003,78353	± 0,05	
RN06	1003,78352	± 0,05	

Fonte: O Autor (2020).

No que diz respeito aos parâmetros ajustados apresentados na Tabela 63 tem-se que a maior cota altimétrica foi alcançada para o pino RN05 com valor de 1003,78353 m, ao passo que a menor foi de 989,69156 m para o vértice LP7 e os valores de desvios padrão máximo e mínimo são ± 0,10 mm e ± 0,05 mm, respectivamente, para o conjunto de pinos (RN01, RN02, RN03 e LP7) e (RN04, RN05 e RN06). O valor do Qui-quadrado calculado foi de 9,860, sendo assim, a um nível de confiança de 95% e considerando-se 13 graus de liberdade (20 observações x 7 incógnitas) o ajustamento dos dados foi aceito.

Na Tabela 64 são apresentados os desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão para os dados obtidos na 4ª campanha de medições, considerando-se LP8 como ponto de referência superficial.

Tabela 64– Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, II, III, IV, V e VI (4ª Campanha de Medições).

Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Resíduos (mm)	Desvio Padrão (mm)
VI	LP8	RN04	3,78210	-0,04	± 0,05
V	RN04	RN06	0,00242	0,01	± 0,02
V	RN06	RN05	0,00028	-0,03	± 0,02
V	RN05	RN04	-0,00271	-0,01	± 0,02
IV	RN04	LP7	-14,09068	-0,02	± 0,09
III	RN04	RN02	-12,66704	0,05	± 0,10
II	LP7	RN02	1,42364	0,07	± 0,08
I	RN02	RN03	0,01049	-0,04	± 0,02
I	RN03	RN01	0,00266	0,05	± 0,02
I	RN01	RN02	-0,01314	0,00	± 0,02
I	RN02	RN01	0,01314	0,01	± 0,02
I	RN01	RN03	-0,00266	0,05	± 0,02
I	RN03	RN02	-0,01049	-0,03	± 0,02
II	RN02	LP7	-1,42364	0,08	± 0,08
III	RN02	RN04	12,66704	0,06	± 0,10
IV	LP7	RN04	14,09068	-0,02	± 0,09
V	RN04	RN05	0,00271	0,00	± 0,02
V	RN05	RN06	-0,00028	-0,02	± 0,02
V	RN06	RN04	-0,00242	0,02	± 0,02
VI	RN04	LP8	-3,78210	-0,04	± 0,05

Fonte: O Autor (2020).

O maior valor residual apresentado na Tabela 64 é encontrado entre os pinos RN02-LP7 com valor 0,08 mm, ao passo que o maior desvio padrão de uma observação ajustada possui o valor de $\pm 0,10$ mm entre os pinos RN02 e RN04. Na Tabela 65 são apresentadas as cotas altimétricas ajustadas, desvios padrão obtidos e o valor do χ^2 calculado.

Tabela 65 - Cotas altimétricas ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento campanha 04, tomando LP8 como ponto de referência superficial.

Pinos	Cotas Ajustadas (m)	Desvio Padrão (mm)	$5,009 \leq \chi^2 \leq 24,736$
RN01	991,12821	± 0,11	
RN02	991,11506	± 0,11	
RN03	991,12555	± 0,11	
LP7	989,69142	± 0,10	10,127
RN04	1003,78210	± 0,05	
RN05	1003,78481	± 0,05	
RN06	1003,78452	± 0,05	

Fonte: O Autor (2020).

Os maiores valores de desvios padrão, considerando a Tabela 65, foram obtidos para os pinos RN01, RN02 e RN03 com valores de 0,11 mm, enquanto os valores mínimos foram de 0,05 mm alcançados para os pinos RN04, RN05 e RN06. O valor do Qui-quadrado calculado foi de 10,127, sendo o ajustamento aceito a um nível de confiança de 95%, considerando-se 13 graus de liberdade (20 observações X 7 incógnitas). Detalhes adicionais acerca do ajustamento das observações considerando este terceiro cenário podem ser encontrados nos apêndices F e G.

6.2.1.2.4 Estabelecimento de referencial altimétrico absoluto através de vértice PO08 fixado em rocha

Conforme exposto nos dois primeiros cenários abordados, não foi possível determinar os recalques acumulados e parciais advindos das aplicações do nivelamento geométrico de altíssima precisão na área de estudo 2, nos casos onde considerou-se cota de 1000 metros para a RN02. Assim, a discussão é conduzida para comparações de discrepâncias obtidas entre os desníveis ajustados pelo modelo paramétrico do MMQ.

Nessas situações as cotas altimétricas ajustadas dos pinos posicionados sobre a base das torres eólicas Gravatá 01 e Gravatá 02 foram obtidas a partir da RN02. Considerando, no entanto, que este ponto também pode sofrer deformações estruturais como os demais, por também estar localizado sobre a base da torre eólica Gravatá 02, o ideal seria o estabelecimento de um referencial altimétrico absoluto conforme descrito no item 3.1 desta dissertação, neste tipo de sistema o movimento vertical dos pinos posicionados sobre as torres poderiam ser monitorados em relação a um ponto fixo livre da ação de deformações estruturais. Este tipo de sistema foi implantado na área de estudo 2, em uma área de superfície rochosa localizada nas imediações da torre eólica Gravatá 01, a implantação destes pontos foi detalhada no item 5.7.1.

Para fins de processamento neste cenário o ponto denominado PO08 nivelado e contranivelado na 4ª campanha de medições realizada em 09/10/2019 foi tomado como referência para o reprocessamento dos dados altimétricos até aqui apresentados. Neste cenário está se considerando que o ponto PO08 está livre da ação de deformações em sua estrutura e possui uma cota fixa de 1000 metros, as cotas altimétricas ajustadas não poderão ser comparadas em relação as demais já

apresentadas, porém será possível realizar análises quanto aos desníveis ajustados dos circuitos comuns aos quatro levantamentos realizados, tomando-se como referência os desníveis ajustados obtidos considerando PO08 como ponto de referência absoluto.

O reprocessamento dos dados foi realizado adotando-se os circuitos expostos na Tabela 66. No sentido de evitar equívocos os circuitos que já foram anteriormente processados permaneceram com a mesma numeração, alterando-se somente a ordem em que foram levantados em campo e as respectivas numerações de suas linhas.

Tabela 66 – Circuitos e linhas de nivelamento/contranivelamento adotadas considerando-se PO08 como referência altimétrica.

Circuito	Linha	Saída	Chegada
VII	L21	PO08	LP8
VIII	L22	PO08	RN04
VI	L23	LP8	RN04
V	L24	RN04	RN06
V	L25	RN06	RN05
V	L26	RN05	RN04
IV	L29	RN04	LP7
III	L30	RN04	RN02
II	L31	LP7	RN02
I	L32	RN02	RN03
I	L33	RN03	RN01
I	L34	RN01	RN02
I	L35	RN02	RN01
I	L36	RN01	RN03
I	L37	RN03	RN02
II	L38	RN02	LP7
III	L39	RN02	RN04
IV	L40	LP7	RN04
V	L43	RN04	RN05
V	L44	RN05	RN06
V	L45	RN06	RN04
VI	L46	RN04	LP8
VIII	L47	RN04	PO08
VII	L48	LP8	PO08

Fonte: O Autor (2020).

Os desníveis brutos dos circuitos VII e VIII são apresentados nas Tabelas 67 e 68, os demais circuitos apresentados na Tabela 66 já foram apresentados no item 6.2.1.1.4 por meio das Tabelas 41 a 47.

Tabela 67 – Desnível bruto obtido com o Nivelamento e Contranivelamento do Circuito VII.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L22	PO08	LP8	1	1,03660	9,160
L23	LP8	PO08	1	-1,03663	9,145

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 68 – Desnível bruto obtido com o Nivelamento e Contranivelamento do Circuito VIII.

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L22	PO08	RN04	4	4,81874	67,250
L23	RN04	PO08	4	-4,81868	66,850

Fonte: O Autor (2020).

Os erros de fechamento, perímetros, tolerâncias altimétricas aceitáveis e precisões alcançadas durante o nivelamento geométrico de altíssima precisão, considerando-se os circuitos VII e VIII são apresentados nas Tabelas 69 e 70.

Tabela 69 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito VII.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
VII	-0,03	0,0183	± 0,12	± 0,09	09/10/2019

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 70 – Qualidade atingida com a aplicação do método do nivelamento geométrico de altíssima precisão no circuito VIII.

Circuito	Erro de Fechamento (mm)	Perímetro (km)	Tolerância (mm)	Precisão do nivelamento (mm/km)	Data das Leituras
VIII	0,06	0,4255	± 0,59	± 0,05	09/10/2019

Fonte: O Autor (2020).

Os erros de fechamento apresentados nas Tabelas 69 e 70 estiveram dentro das tolerâncias altimétricas permitidas, tendo o valor de -0,03 mm, obtido no circuito VII, sido o menor erro de fechamento detectado, ao passo que o maior foi encontrado no circuito VIII com valor de 0,06 mm. Os melhores e piores índices de precisão foram alcançados nos circuitos VIII e VII, com valores respectivos de ± 0,05 mm/km e ± 0,09 mm/km.

Os desníveis brutos foram ajustados utilizando o modelo paramétrico do MMQ, conforme item 4.1.2, o ajustamento se deu através da adição de 2 novos circuitos às equações de observações expostas no item 6.2.1.2.2, sendo eles os circuitos VII e VIII expostos nas Tabelas 67 e 68 do item 6.2.1.2.4. As equações de observações são demonstradas na Equação 102.

$$L_b = \begin{bmatrix} L21 \\ L22 \\ L23 \\ L24 \\ L25 \\ L26 \\ L27 \\ L28 \\ L29 \\ L30 \\ L31 \\ L32 \\ L33 \\ L34 \\ L35 \\ L36 \\ L37 \\ L38 \\ L39 \\ L40 \\ L41 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,03660+PO08 \\ PO08+4,81874 \\ 3,78214 \\ 0,00241 \\ 0,00031 \\ -0,00270 \\ -14,09066 \\ -12,66709 \\ 1,42357 \\ 0,01053 \\ 0,00261 \\ -0,01314 \\ 0,01313 \\ -0,00271 \\ -0,01046 \\ -1,42372 \\ 12,66698 \\ 14,09070 \\ 0,00271 \\ -0,00026 \\ -0,00244 \\ -3,78206 \\ -4,81868-PO08 \\ -1,03663-PO08 \end{bmatrix} \quad (102)$$

A matriz A é dada pelos coeficientes das incógnitas das equações de observação (Equações 103 a 123).

$$L21=RN04-PO08 \quad (103)$$

$$L22=RN06-RN04 \quad (104)$$

$$L23=RN05-RN06 \quad (105)$$

$$L24=RN04-RN05 \quad (106)$$

$$L25=LP7-RN04 \quad (107)$$

$$L26=RN02-RN04 \quad (108)$$

$$L27=RN02-LP7 \quad (109)$$

$$L28=RN03-RN02 \quad (110)$$

$$L29=RN01-RN03 \quad (111)$$

$$L30=RN02-RN01 \quad (112)$$

$$L31=RN01-RN02 \quad (113)$$

$$L32=RN03-RN01 \quad (114)$$

$$L33=RN02-RN03 \quad (115)$$

$$L34=LP7-RN02 \quad (116)$$

$$L35=RN04-RN02 \quad (117)$$

$$L36=RN04-LP7 \quad (118)$$

$$L37=RN05-RN04 \quad (119)$$

$$L38=RN06-RN05 \quad (120)$$

L39=RN04-RN06	(121)
L40=LP8-RN04	(122)
L41=PO08-LP8	(123)

Os desníveis ajustados, resíduos e respectivos desvios padrão dos resultados reprocessados, adotando-se o ponto PO08 como referência podem ser visualizados na Tabela 71.

Tabela 71 – Desníveis ajustados, resíduos e desvios padrão do nivelamento/contranivelamento dos circuitos I, II, III, IV, V, VI, VII e VIII.

Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado (m)	Resíduos (mm)	Desvio Padrão (mm)
VII	PO08	LP8	1,03661	0,01	± 0,01
VIII	PO08	RN04	4,81871	-0,03	± 0,03
VI	LP8	RN04	3,78210	-0,04	± 0,03
V	RN04	RN06	0,00242	0,01	± 0,01
V	RN06	RN05	0,00028	-0,03	± 0,02
V	RN05	RN04	-0,00271	-0,01	± 0,01
IV	RN04	LP7	-14,09068	-0,02	± 0,06
III	RN04	RN02	-12,66704	0,05	± 0,07
II	LP7	RN02	1,42364	0,07	± 0,06
I	RN02	RN03	0,01049	-0,04	± 0,02
I	RN03	RN01	0,00266	0,05	± 0,01
I	RN01	RN02	-0,01314	0,00	± 0,01
I	RN02	RN01	0,01314	0,01	± 0,01
I	RN01	RN03	-0,00266	0,05	± 0,01
I	RN03	RN02	-0,01049	-0,03	± 0,02
II	RN02	LP7	-1,42364	0,08	± 0,06
III	RN02	RN04	12,66704	0,06	± 0,07
IV	LP7	RN04	14,09068	-0,02	± 0,06
V	RN04	RN05	0,00271	0,00	± 0,01
V	RN05	RN06	-0,00028	-0,02	± 0,02
V	RN06	RN04	-0,00242	0,02	± 0,01
VI	RN04	LP8	-3,78210	-0,04	± 0,03
VIII	RN04	PO08	-4,81871	-0,03	± 0,03
VII	LP8	PO08	-1,03661	0,02	± 0,01

Fonte: O Autor (2020).

Os desníveis ajustados apresentados na Tabela 71 mostram desvios padrão máximos na ordem de $\pm 0,07$ mm entre os pinos RN02 e RN04 e mínimos de $\pm 0,01$ mm. O conjunto de dados expostos neste subitem foi exposto a um reprocessamento utilizando o módulo nivelamento geométrico disponível no software AstGeoTop (GARNÉS, 2019). Os desníveis calculados a partir do software entre o

pino PO08 e os demais vértices integrantes da Rede Geodésica Altimétrica Local, são apresentados na Tabela 72 e o respectivo relatório gerado pode ser visualizado no Anexo A.

Tabela 72 - Desníveis ajustados e desvios padrão nivelamento/contranivelamento via AstGeoTop.

Pinos	Cotas Ajustadas (m)	Precisão (mm)
RN01	-7,83517	± 0,02
RN02	-7,84833	± 0,03
RN03	-7,83783	± 0,07
LP7	-9,27195	± 0,09
RN04	4,81872	± 0,07
RN05	4,82142	± 0,06
RN06	4,82114	± 0,04
LP8	1,03661	± 0,01

Fonte: O Autor (2020).

A análise dos desníveis ajustados apresentados nas Tabelas 71 e 72 permitem constatar discrepâncias máximas na ordem de $\pm 0,02$ mm entre o pino PO08 e os pinos RN01, RN03 e o marco geodésico LP7, enquanto que as mínimas foram de $\pm 0,00$ mm entre o pino PO08 e os pinos RN02, RN05 e RN06 e o marco geodésico LP8. A melhor precisão alcançada para os dados processados via *software* AstGeoTop foi de $\pm 0,01$ para o desnível existente entre o pino PO08 e o marco geodésico LP8, ao passo que a pior precisão foi observada no desnível observado entre o pino PO08 e o vértice LP7, com valor de $\pm 0,09$ mm. Na Tabela 73 são apresentadas as cotas altimétricas ajustadas e os respectivos desvios padrão dos pinos integrantes da Rede Geodésica altimétrica Local com PO08 como referência absoluta.

Tabela 73 - Cotas altimétricas ajustadas e desvios padrão nivelamento/contranivelamento.

Pinos	Cotas Ajustadas (m)	Desvio Padrão (mm)	$6,908 \leq \chi^2 \leq 28,845$
RN01	992,16482	± 0,07	
RN02	992,15168	± 0,07	
RN03	992,16216	± 0,07	
LP7	990,72803	± 0,06	
RN04	1004,81871	± 0,03	10,976
RN05	1004,82142	± 0,03	
RN06	1004,82114	± 0,03	
LP8	1001,03661	± 0,01	

Fonte: O Autor (2020).

Os resultados apresentados na Tabela 73 mostram resultados de desvios padrão máximos de $\pm 0,07$ mm para os pinos RN01, RN02, e RN03, e mínimos de $\pm 0,01$ mm para o ponto LP8. Nota-se que a precisão alcançada a partir do reprocessamento atingiu valores superiores aos ajustamentos anteriormente realizados, uma vez que todos os desvios padrão encontrados estiveram na casa dos centésimos de milímetros. O teste do χ^2 foi aplicado considerando-se um nível de significância de 5% e o valor encontrado foi de 10,976 que conforme Tabela 73 está enquadrado no intervalo onde se considera 16 graus de liberdade (24 observações e 8 incógnitas), sendo assim, o ajustamento é aceito a um nível de confiança de 95%. Detalhes adicionais acerca do ajustamento das observações considerando este quarto cenário podem ser encontrados no Apêndice H.

6.2.1.3 Análise das discrepâncias encontradas para os desníveis ajustados advindos da 1ª e 2ª campanhas de medições

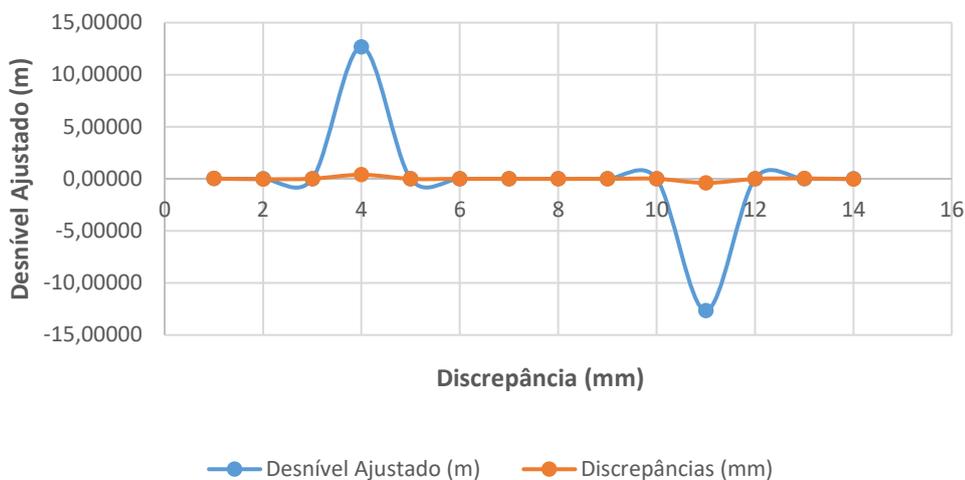
As discrepâncias encontradas entre os desníveis ajustados das linhas de nivelamento/contranivelamento obtidos durante o primeiro e o segundo levantamento realizado, são analisadas neste item. O intervalo de tempo decorrido entre uma observação e outra foi de 133 dias. Os resultados são apresentados na Tabela 74 e na Figura 50.

Tabela 74 – Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 1ª e 2ª campanhas de levantamento.

Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado 1ª (m)	Desnível Ajustado 2ª (m)	Discrepâncias (mm)
I	RN02	RN01	0,01307	0,01305	0,02
I	RN01	RN03	-0,00251	-0,00248	-0,03
I	RN03	RN02	-0,01056	-0,01057	0,01
I	RN02	RN03	0,01056	0,01057	-0,01
I	RN03	RN01	0,00251	0,00248	0,03
I	RN01	RN02	-0,01307	-0,01305	-0,02
III	RN02	RN04	12,66783	12,66744	0,39
III	RN04	RN02	-12,66783	-12,66744	-0,39
V	RN04	RN05	0,00273	0,00274	-0,01
V	RN05	RN06	-0,00026	-0,00026	0,00
V	RN06	RN04	-0,00248	-0,00248	0,00
V	RN04	RN06	0,00248	0,00248	-0,00
V	RN06	RN05	0,00026	0,00026	-0,00
V	RN05	RN04	-0,00273	-0,00274	0,01

Fonte: O Autor (2020).

Figura 50 - Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 1ª e 2ª campanhas de levantamento



Fonte: O Autor (2020).

A análise dos dados ajustados nas campanhas 1 e 2, representados na Tabela 74 e na Figura 50, permitem constatar discrepâncias máximas e mínimas entre os pinos e marcos geodésicos integrantes dos circuitos de nivelamento/contranivelamento. A análise destas discrepâncias será realizada nesta dissertação a partir da análise individual de cada circuito, sendo assim, neste subitem serão realizadas as análises das discrepâncias observadas entre a 1ª e a 2ª campanha de medições, levando-se em consideração os circuitos I, III e V.

Para o circuito I foram observadas discrepâncias máximas na ordem de $\pm 0,03$ mm para os desníveis ajustados observados entre os pinos RN01 e RN03 e mínimas de $\pm 0,01$ mm para os desníveis ajustados entre os pinos RN03 e RN02. Ao passo que no circuito V as discrepâncias máximas são observadas para os desníveis ajustados entre os pinos RN04 e RN05 com valores de $\pm 0,01$ mm, ainda em relação ao circuito V, percebe-se a partir da Tabela 74 que levando-se em consideração os desníveis ajustados entre a 1ª e a 2ª campanha de medições não foram encontradas discrepâncias entre os demais pinos integrantes do circuito. Por fim, tem-se que a maior discrepância encontrada para os desníveis ajustados entre os pinos integrantes do circuito III foi de $\pm 0,39$ mm entre os pinos RN02 e RN04, tendo sido esta, a maior discrepância encontrada para os desníveis ajustados entre um pino e outro, considerando-se todos os circuitos levantados durante as campanhas 1 e 2.

A partir da premissa que o nível digital Leica DNA 03 oferece leituras na ordem dos centésimos de milímetros, pode-se afirmar que as discrepâncias observadas entre os desníveis ajustados para os circuitos integrantes das campanhas 1 e 2 são pouco significativas, uma vez que a maior discrepância encontrada está na ordem dos décimos de milímetros. Além disso, o desnível entre os pinos RN02 e RN04 compreendem o trecho levantado entre as torres eólicas.

6.2.1.4 Análise das discrepâncias encontradas para os desníveis ajustados advindos da 3ª e 4ª campanhas de medições

A partir da 3ª campanha de medições realizada, os vértices LP7 e LP8 passaram a integrar os circuitos de nivelamento/contranivelamento existentes na área de estudo 2. Os processamentos foram realizados de maneira a considerar primeiramente uma situação na qual todos os circuitos foram ajustados considerando-se uma cota fixa de 1000 metros para RN02 (segundo cenário) e posteriormente uma situação na qual o ponto LP8 foi tomado como referência superficial com cota fixa de 1000 metros (terceiro cenário). As discrepâncias encontradas para os desníveis ajustados considerando-se a o segundo cenário são apresentadas na Tabela 75 e na Figura 51.

Tabela 75 – Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 3ª e 4ª campanhas de levantamento considerando-se RN02 com cota fixa.

(Continua)

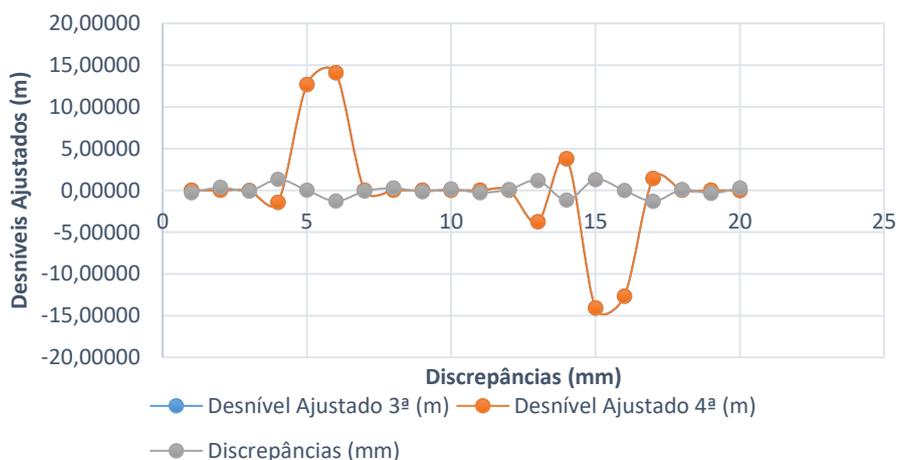
Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado 3ª (m)	Desnível Ajustado 4ª (m)	Discrepâncias (mm)
I	RN02	RN01	0,01287	0,01314	-0,27
I	RN01	RN03	-0,00231	-0,00266	0,35
I	RN03	RN02	-0,01057	-0,01049	-0,08
I	RN02	RN03	0,01057	0,01049	0,08
I	RN03	RN01	0,00231	0,00266	-0,35
I	RN01	RN02	-0,01287	-0,01314	0,27
II	RN02	LP7	-1,42235	-1,42366	1,31
II	LP7	RN02	1,42235	1,42366	-1,31
III	RN02	RN04	12,66702	12,66700	0,02
III	RN04	RN02	-12,66702	-12,66700	-0,02
IV	LP7	RN04	14,08937	14,09066	-1,29
IV	RN04	LP7	-14,08937	-14,09066	1,29
V	RN04	RN05	0,00260	0,00271	-0,11
V	RN05	RN06	-0,00001	-0,00028	0,27
V	RN06	RN04	-0,00260	-0,00242	-0,18
V	RN04	RN06	0,00260	0,00242	0,18

Tabela 75 – Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 3ª e 4ª campanhas de levantamento considerando-se RN02 com cota fixa.

(Conclusão)					
Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado 3ª (m)	Desnível Ajustado 4ª (m)	Discrepâncias (mm)
V	RN06	RN05	0,00001	0,00028	-0,27
V	RN05	RN04	-0,00260	-0,00271	0,11
VI	RN04	LP8	-3,78093	-3,78210	1,17
VI	LP8	RN04	3,78093	3,78210	-1,17

Fonte: O Autor (2020).

Figura 51 - Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 3ª e 4ª campanhas de levantamento considerando-se RN02 com cota fixa.



Fonte: O Autor (2020).

A partir da Tabela 75 e da Figura 51 percebe-se que no circuito I as discrepâncias máximas para os desníveis ajustados, foram encontradas entre os pinos RN01 e RN03 com valores de $\pm 0,35$ mm, enquanto que as discrepâncias mínimas para os desníveis ajustados foram de $\pm 0,08$ mm entre os pinos RN02 e RN03.

A mesma análise é realizada em relação aos demais circuitos integrantes da rede de nivelamento/contranivelamento. Sendo assim, para o circuito II composto pelo pino RN02 e pelo Marco Geodésico LP7 a discrepância observada foi de $\pm 1,31$ mm, nessa análise deve-se levar em consideração que o Marco Geodésico LP7 foi implantado diretamente no solo durante a 3ª campanha de medição e que as observações do nivelamento de altíssima precisão foram coletadas apenas um dia após a materialização do marco sobre o solo, especificamente no dia 14/02/2020, data que corresponde ao tricentésimo dia da série de observações realizadas entre os pinos fixados nas torres eólicas Gravatá 01 e Gravatá 02. A discrepância milimétrica observada pode ser atribuída a consolidação do marco sobre o solo.

A mesma justificativa dada para a observação de discrepâncias milimétricas entre o pino RN02 e LP7 pode ser atribuída a discrepância encontrada para os desníveis ajustados entre o pino RN04 e o Marco Geodésico LP7, integrantes do circuito IV e entre RN04 e o Marco Geodésico LP8 integrantes do circuito VI, nestes caso as discrepâncias observadas entre os pinos e os marcos foram de $\pm 1,29$ mm e $\pm 1,17$ mm, respectivamente, para os circuitos IV e VI.

Para o circuito V as discrepâncias máximas para os desníveis ajustados, foram encontradas entre os pinos RN05 e RN06 com valores de $\pm 0,27$ mm, enquanto que as discrepâncias mínimas para os desníveis ajustados foram de $\pm 0,11$ mm entre os pinos RN05 e RN04. Por fim para o circuito III a discrepância encontrada para os desníveis ajustados entre os pinos RN02 e RN04, únicos integrantes deste circuito, foi de $\pm 0,02$ mm.

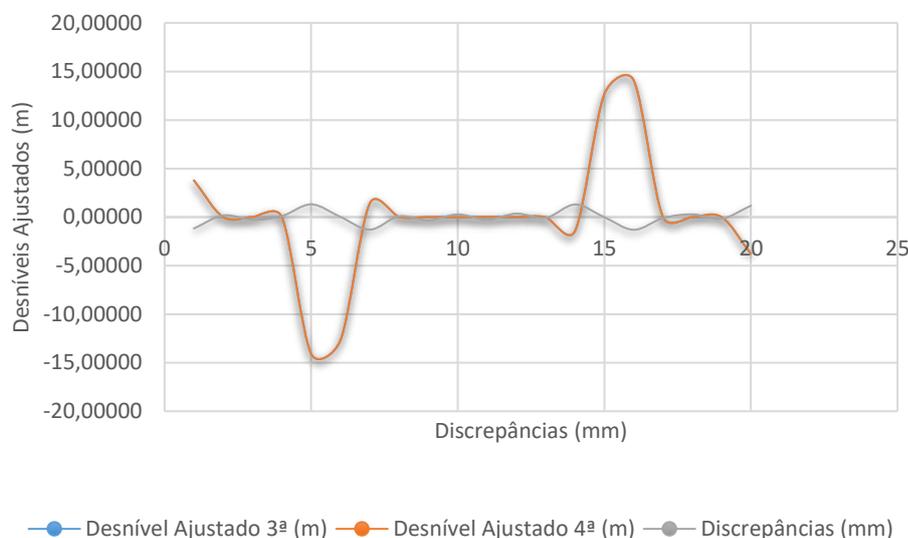
Uma outra análise de discrepância foi realizada desta vez considerando-se o ponto LP8 como referência absoluta para o ajustamento das observações (terceiro cenário), os resultados obtidos são apresentados na Tabela 76 e na Figura 52.

Tabela 76 – Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 3ª e 4ª campanhas de levantamento considerando-se LP8 com cota fixa.

Circuito	Saída	Chegada	Desnível Ajustado 3ª (m)	Desnível Ajustado 4ª (m)	Discrepâncias (mm)
VI	LP8	RN04	3,78093	3,78210	-1,17
VI	RN04	LP8	-3,78093	-3,78210	1,17
V	RN04	RN05	0,00260	0,00271	-0,11
V	RN05	RN06	-0,00001	-0,00028	0,27
V	RN06	RN04	-0,00260	-0,00242	-0,18
V	RN04	RN06	0,00260	0,00242	0,18
V	RN06	RN05	0,00001	0,00028	-0,27
V	RN05	RN04	-0,00260	-0,00271	0,11
IV	RN04	LP7	-14,08937	-14,09068	1,31
IV	LP7	RN04	14,08937	14,09068	-1,31
III	RN04	RN02	-12,66702	-12,66704	0,02
III	RN02	RN04	12,66702	12,66704	-0,02
II	LP7	RN02	1,42235	1,42364	-1,29
II	RN02	LP7	-1,42235	-1,42364	1,29
I	RN02	RN01	0,01287	0,01314	-0,27
I	RN01	RN03	-0,00231	-0,00266	0,35
I	RN03	RN02	-0,01057	-0,01049	-0,08
I	RN02	RN03	0,01057	0,01049	0,08
I	RN03	RN01	0,00231	0,00266	-0,35
I	RN01	RN02	-0,01287	-0,01314	0,27

Fonte: O Autor (2020).

Figura 52 - Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 3ª e 4ª campanhas de levantamento considerando-se LP8 com cota fixa.



Fonte: O Autor (2020).

A análise da Tabela 76 e da Figura 52 permitem afirmar que não houve alterações nos valores de discrepâncias dos desníveis ajustados considerando-se a 3ª e a 4ª campanha utilizando-se RN02 ou LP8 como referências altimétricas para o processamento, fato este que já era esperado.

6.2.1.5 Análise das discrepâncias encontradas para os desníveis ajustados advindos da 1ª, 2ª, 3ª e 4ª campanhas de medições considerando PO08 como referência altimétrica absoluta

Os desníveis ajustados considerando o ponto PO08 como referência altimétrica absoluta, são tomados como valores bases para a realização de futuros levantamentos na área de estudo 2. Na Tabela 77 são apresentadas as discrepâncias encontradas entre os desníveis ajustados obtidos na 4ª campanha (PO08 referência) e nas demais realizadas (RN02 como cota fixa e LP8 como ponto de referência superficial).

Tabela 77 – Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 1ª, 2ª, 3ª e 4ª campanha de levantamento considerando-se PO08 como referência absoluta.

(Continua)

Circuito	Início	Final	ΔH 4ª (m)	ΔH 3ª (m)	ΔH 2ª (m)	ΔH 1ª (m)	ΔH 1ª- ΔH 4ª (mm)	ΔH 2ª- ΔH 4ª (mm)	ΔH 3ª- ΔH 4ª (mm)
VII	PO08	LP8	1,03661	NO	NO	NO	NO	NO	NO
VII	LP8	PO08	-1,03661	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Tabela 77 – Discrepâncias entre desníveis ajustados obtidos na 1ª, 2ª, 3ª e 4ª campanha de levantamento considerando-se PO08 como referência absoluta.

(Conclusão)									
Circuito	Início	Final	ΔH 4ª (m)	ΔH 3ª (m)	ΔH 2ª (m)	ΔH 1ª (m)	ΔH 1ª- ΔH 4ª (mm)	ΔH 2ª- ΔH 4ª (mm)	ΔH 3ª- ΔH 4ª (mm)
VIII	PO08	RN04	4,81871	NO	NO	NO	NO	NO	NO
VIII	RN04	PO08	-4,81871	NO	NO	NO	NO	NO	NO
VI	LP8	RN04	3,78210	3,78093	NO	NO	NO	NO	-1,17
VI	RN04	LP8	-3,78210	-3,78093	NO	NO	NO	NO	1,17
V	RN04	RN05	0,00271	0,00260	0,00274	0,00273	0,02	0,03	-0,11
V	RN05	RN06	-0,00028	-0,00001	-0,00026	-0,00026	0,02	0,02	0,27
V	RN06	RN04	-0,00242	-0,00260	-0,00248	-0,00248	-0,06	-0,06	-0,18
V	RN04	RN06	0,00242	0,00260	0,00248	0,00248	0,06	0,06	0,18
V	RN06	RN05	0,00028	0,00001	0,00026	0,00026	-0,02	-0,02	-0,27
V	RN05	RN04	-0,00271	-0,00260	-0,00274	-0,00273	-0,02	-0,03	0,11
IV	RN04	LP7	-14,09068	-14,08937	NO	NO	NO	NO	1,31
IV	LP7	RN04	14,09068	14,08937	NO	NO	NO	NO	-1,31
III	RN04	RN02	-12,66704	-12,66702	-12,66744	-12,66783	-0,79	-0,40	0,02
III	RN02	RN04	12,66704	12,66702	12,66744	12,66783	0,79	0,40	-0,02
II	LP7	RN02	1,42364	1,42235	NO	NO	NO	NO	-1,29
II	RN02	LP7	-1,42364	-1,42235	NO	NO	NO	NO	1,29
I	RN02	RN01	0,01314	0,01287	0,01305	0,01307	-0,07	-0,09	-0,27
I	RN01	RN03	-0,00266	-0,00231	-0,00248	-0,00251	0,15	0,18	0,35
I	RN03	RN02	-0,01049	-0,01057	-0,01057	-0,01056	-0,07	-0,08	-0,08
I	RN02	RN03	0,01049	0,01057	0,01057	0,01056	0,07	0,08	0,08
I	RN03	RN01	0,00266	0,00231	0,00248	0,00251	-0,15	-0,18	-0,35
I	RN01	RN02	-0,01314	-0,01287	-0,01305	-0,01307	0,07	0,09	0,27

Fonte: O Autor (2020).

Legenda:

NO = Não Observado.

A análise da Tabela 77 é realizada com base nas discrepâncias máximas e mínimas encontradas entre os pontos-objeto e pontos de referências integrantes da Rede Geodésica Altimétrica Local. Devido ao fato de os circuitos VII e VIII terem sido observados apenas na 4ª campanha de medições, não há como identificar discrepâncias entre os desníveis ajustados.

Os circuitos I, III, e V foram observados durante as 4 campanhas de nivelamento geométrico de altíssima precisão realizadas na área de estudo 2. A partir da Tabela 77, tem-se que para o circuito I a maior discrepância de um desnível ajustado ocorreu entre a 3ª e a 4ª campanha entre os pinos RN01 e RN03 com valor de $\pm 0,35$ mm, enquanto que a menor discrepância para um desnível ajustado neste circuito foi de $\pm 0,07$ mm entre os pinos RN01 e RN02 durante as observações

realizadas entre a 1ª e a 4ª campanha. Ainda de acordo com a Tabela 77 a maior discrepância para os desníveis ajustados entre os pinos RN02 e RN04 integrantes do circuito III foi observada entre a 1ª e a 4ª campanha de medição com valor de $\pm 0,79$ mm, enquanto que a menor discrepância para os desníveis ajustados entre os pinos RN02 e RN04 foi de $\pm 0,02$ mm entre a 3ª e a 4ª campanha de medição. Por fim na Tabela 77 é possível observar que a maior discrepância para os desníveis ajustados dos pinos integrantes do circuito V foi observada entre a 3ª e a 4ª campanha de medição com valor de $\pm 0,27$ mm entre os pinos RN05 e RN06, ao passo que a menor discrepância para os desníveis ajustados deste circuito foi de $\pm 0,02$ mm entre os pinos RN04 e RN05 e entre os pinos RN05 e RN06 levando-se em consideração as observações efetuadas entre a 1ª e a 4ª campanha de medição.

Uma outra abordagem a respeito dos dados apresentados na Tabela 77 é efetuada a partir da análise das discrepâncias observadas entre os circuitos II, IV e VI. Tais circuitos apenas foram observados durante a 3ª e a 4ª campanha de medições e a análise das discrepâncias dos desníveis ajustados entre os pinos e Marcos Geodésicos integrantes destes circuitos já foi realizada no item 6.2.1.4 desta dissertação.

6.3 DENSIFICAÇÃO DA INFRAESTRUTURA GEODÉSICA DE REFERÊNCIA NA ÁREA DE ESTUDO 2

Neste item são descritos as etapas e os métodos adotados na definição de pontos de referência na área de estudo 2.

6.3.1 Medições, Processamentos e Análises dos Resultados obtidos usando Estação Total

Neste item são discutidos os resultados alcançados para as coordenadas planialtimétricas dos vértices integrantes da estrutura Geodésica de Referência implementada na área de estudo 02

6.3.1.1 Irradiação 3D

Os dados advindos da irradiação 3D tomaram como referência o azimuth L3-LP3 com valor de $107^{\circ}51'31''$ e cota altimétrica de 993,566 metros para o vértice L3, conforme Tabela 2 do subitem 5.1.2, determinada via GNSS em Canto (2018). Os

resultados tridimensionais dos 86 pontos coletados em campo podem ser visualizados na Tabela 78. A base para o cálculo das cotas altimétricas foi o vértice L3, obtido a partir de nivelamento trigonométrico a partir do vértice LP7 que teve sua cota determinada pelo método do nivelamento geométrico no valor de 990,72803, conforme Tabela 72 do item 6.2.1.2.4.

Tabela 78 – Resultados advindos da aplicação da irradiação 3D na área de estudo 2.

(Continua)

Estação	X (m)	Y (m)	Cota (m)	Estação	X (m)	Y (m)	Cota (m)
L3	149819,305	250451,603		35	149838,825	250405,400	981,815
LP3	149822,664	250450,554		36	149840,331	250402,141	982,000
1	149819,305	250451,603	Não medida	37	149836,362	250400,238	982,233
2	149822,664	250450,554	Não medida	38	149833,287	250398,403	982,439
3	149825,092	250451,779	Não medida	39	149831,093	250395,600	982,703
4	149828,167	250451,630	978,389	40	149829,605	250392,498	982,922
5	149831,323	250452,679	978,125	41	149832,777	250393,215	982,744
6	149834,161	250454,263	977,909	42	149837,257	250393,167	982,556
7	149833,716	250451,894	978,081	43	149836,035	250390,377	982,798
8	149836,087	250450,483	978,055	44	149833,160	250388,328	983,087
9	149838,599	250449,104	977,852	45	149829,945	250387,044	983,290
10	149838,556	250446,245	978,033	46	149826,290	250385,990	983,392
11	149838,390	250443,209	978,177	47	149823,263	250384,675	983,499
12	149881,512	250130,916	993,425	48	149821,447	250381,058	983,805
13	149835,329	250438,358	978,651	49	149817,727	250380,147	984,105
14	149832,088	250438,253	978,856	50	149815,384	250377,183	984,260
15	149830,505	250435,829	979,123	51	149815,071	250374,010	984,410
16	149825,513	250434,438	979,583	52	149811,646	250371,901	984,578
17	149827,669	250432,204	979,566	53	149808,407	250371,492	984,624
18	149827,736	250428,634	979,834	54	149804,537	250370,703	984,718
19	149824,174	250427,226	980,388	55	149800,014	250369,882	985,038
20	149820,661	250426,555	981,087	58	149797,688	250372,848	985,100
21	149820,712	250428,802	980,809	59	149881,512	250130,916	993,425
22	149817,023	250430,030	981,596	60	149794,869	250376,001	985,240
23	149815,603	250432,975	981,649	61	149795,679	250380,247	985,175
24	149815,148	250436,247	981,474	62	149798,478	250381,991	984,924
25	149814,120	250440,714	981,358	63	149801,725	250383,762	984,647
26	149812,351	250444,209	981,560	64	149805,089	250385,510	984,404
27	149811,306	250447,235	981,310	65	149806,509	250388,560	984,358
28	149813,998	250449,224	980,300	66	149806,979	250392,315	984,327
29	149817,881	250449,925	979,476	67	149805,719	250395,759	984,514
30	149828,462	250413,996	981,608	68	149807,639	250398,829	984,498
31	149831,778	250414,797	981,518	69	149820,129	250406,077	982,883
32	149834,978	250414,698	981,567	70	149829,722	250383,154	983,232
33	149837,668	250411,605	981,623	71	149820,192	250450,036	978,972
34	149838,766	250408,629	981,682	72	149822,579	250440,395	979,340

Tabela 78 – Resultados advindos da aplicação da irradiação 3D na área de estudo 2.
(Conclusão)

Estação	X (m)	Y (m)	Cota (m)	Estação	X (m)	Y (m)	Cota (m)
73	149824,872	250430,718	979,864	79	149814,546	250387,348	983,773
74	149827,390	250421,090	980,648	80	149806,187	250381,928	984,336
75	149829,874	250411,452	981,689	81	149855,096	250491,699	974,309
76	149839,942	250403,141	981,967	82	149857,281	250494,809	974,307
77	149831,488	250397,871	982,426	83	149867,145	250480,332	974,411
78	149823,021	250392,676	983,101	84	149870,401	250480,877	974,388

Fonte: O Autor (2020).

A maior cota altimétrica observada durante a aplicação do método da irradiação 3D possui o valor de 1003,466 metros e corresponde ao 86º ponto medido, ao passo que a menor cota altimétrica registrada possui o valor de 974,388 tendo sido o 84º ponto observado.

6.3.1.2 Interseção a Ré

As coordenadas planimétricas do vértice LP9 foram obtidas através da aplicação do método da interseção a ré a partir da medição de ângulos e distâncias do vértice LP9 para os vértices L3, LP3 e L1, item 3.3.1.1. A rotina de programação utilizada para a obtenção dos resultados foi desenvolvida no *software Matlab 2018a*, através da elaboração de um aplicativo criado utilizando a função *Guide* do *Matlab*, que pode ser visualizado no item A. As coordenadas ajustadas através do MMQ – modelo paramétrico e os respectivos desvios padrão do vértice LP9 são apresentadas na Tabela 79.

Tabela 79 – Coordenadas planimétricas no SGL SIRGAS2000 do vértice LP9.

Estação	X (m)	Y (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	$0,051 \leq \chi^2 \leq 7,378$
LP9	149419,959	249822,785	0,015	0,015	0,582

Fonte: O Autor (2020).

O valor do χ^2 calculado exposto na Tabela 79 está dentro do intervalo esperado, levando-se em consideração um número de dois graus de liberdade (6 parâmetros e 4 incógnitas). Sendo assim, a um grau de confiança de 95% as coordenadas obtidas foram aceitas.

6.3.1.3 Triangulação

Os resultados advindos da aplicação do método da Triangulação 2D na área de estudo 2 foram ajustados utilizando o modelo paramétrico do MMQ,

conforme item 4.1.2, para a obtenção dos valores ajustados, adaptou-se *script* desenvolvido em linguagem *Matlab* desenvolvido pelo Professor Dr. Jaime Mendonça, (MENDONÇA, 2018), e fornecido aos alunos durante a disciplina Teoria dos Erros Ministrada junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação (PPGCGTG). Os ângulos e distâncias observados, seus valores ajustados, resíduos e respectivos desvios padrão são apresentados na Tabela 80. Vale ressaltar que as 12 primeiras observações expostas nas colunas da Tabela 80, referem-se a ângulos apresentados em graus decimais e as oito últimas, referem-se a distâncias horizontais apresentadas em metros. Os vértices L3 e LP9 tiveram suas coordenadas fixadas e serviram como base para a realização do ajustamento e como a maior parte das observações de distâncias efetuadas foram realizadas tanto no sentido direto como no sentido inverso, tomou-se a média aritmética dessas observações. Os resultados foram alcançados na 2ª iteração e utilizou-se o método da Irradiação 3D a partir do alinhamento L3-LP9 para obter as coordenadas aproximadas dos vértices LP7, LP8 e LP10.

Tabela 80 – Valores observados, resíduos, observações ajustadas e desvio padrão das observações ajustadas, obtidas via ajustamento por MMQ de uma rede 2D de triangulação.

Estação Ocupada	Observação	Valor Observado (L _b)	Resíduo (V)	Observações Ajustadas (L _a)	Desvio Padrão (L _a)
LP8	A1 = HZ _{L3} -HZ _{LP9}	42,47138888889°	23,4"	42,4779014917°	0,1"
L3	A2 = HZ _{LP9} -HZ _{LP8}	113,9996296296°	-16,5"	113,9950388636°	0,1"
LP9	A3 = HZ _{LP8} -HZ _{L3}	23,5250462963°	7,2"	23,5270596447°	0,0"
LP8	A4 = HZ _{LP7} -HZ _{L3}	32,0076851852°	-13,0"	32,0040737381°	0,0"
LP7	A5 = HZ _{L3} -HZ _{LP8}	85,8480092593°	7,9"	85,8502156987°	0,1"
L3	A6 = HZ _{LP8} -HZ _{LP7}	62,1445833333°	4,1"	62,1457105632°	0,1"
LP8	A7 = HZ _{L3} -HZ _{LP10}	23,0251388889°	8,6"	23,0275270236°	0,2"
L3	A8 = HZ _{LP10} -HZ _{LP8}	145,5359259259°	-2,6"	145,5352153041°	0,2"
LP10	A9 = HZ _{LP8} -HZ _{L3}	11,4369444444°	1,1"	11,4372576724°	0,1"
LP8	A10 = HZ _{LP9} -HZ _{LP7}	74,4790740741°	10,4"	74,4819752298°	0,1"
LP7	A11 = HZ _{LP9} -HZ _{LP8}	82,9126851852°	1,6"	82,9131403501°	0,2"
LP9	A12 = HZ _{LP8} -HZ _{LP7}	22,6033333333°	5,6"	22,6048844201°	0,0"
LP8/LP3	D1 = Dh _{LP8-L3}	328,040 m	0,000 m	328,040 m	0,004 m
L3/LP9	D2 = Dh _{L3-LP9}	554,941 m	0,013 m	554,954 m	0,000 m
LP9/LP8	D3 = Dh _{LP9-LP8}	750,764 m	0,000 m	750,764 m	0,005 m
LP8/LP7	D4 = Dh _{LP8-LP7}	290,796 m	0,000 m	290,796 m	0,004 m
LP7/L3	D5 = Dh _{LP7-L3}	174,318 m	-0,006 m	174,312 m	0,003 m
LP8/LP10	D6 = Dh _{LP8-LP10}	936,172 m	0,000 m	936,172 m	0,005 m
L3/LP10	D7 = Dh _{L3-LP10}	647,121 m	0,000 m	647,121 m	0,004 m
LP9/LP7	D8 = Dh _{LP9-LP7}	728,957 m	0,008 m	728,965 m	0,003 m

Fonte: O Autor (2020).

As coordenadas ajustadas e os respectivos desvios padrão dos vértices LP7, LP8 e LP10 podem ser visualizadas na Tabela 81.

Tabela 81 – coordenadas planimétricas e precisões posicionais dos vértices LP7, LP8 e LP10

Estação	X (m)	Y (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	$6,574 \leq \chi^2 \leq 23,685$
LP7	150019,648	250237,228	0,005	0,007	
LP8	149826,068	250454,229	0,008	0,003	8,594
LP10	149610,758	249543,153	0,034	0,013	

Fonte: O Autor (2020).

Nota-se a partir da análise da Tabela 81 que o valor do desvio padrão encontrado para a coordenada X do vértice LP10 apresentou um valor de $\pm 0,034$ metros, no entanto a expectativa era de encontrar um desvio padrão na ordem de no máximo $\pm 2,5$ cm compatível com os valores de precisão sob os quais determinou-se os vértices LP9 e L3 utilizados como bases para o ajustamento da rede de Triangulação, no entanto era esperado que se atingisse precisões superiores e a não ocorrência disso pode ser justificada pelo fato de as medições angulares e lineares a partir do vértice LP10 terem sido realizadas em uma data posterior as realizadas a partir de LP7 e LP8. No que diz respeito a análise estatística a aplicação do teste de hipóteses considerando a distribuição χ^2 encontrou um valor de 8,594, valor este, que se enquadra no intervalo crítico admissível para situações, onde se tem 14 graus de liberdade (20 observações e 6 incógnitas) e 5% de nível de significância. Sendo assim, a um grau de confiança de 95% as coordenadas ajustadas obtidas foram aceitas.

6.3.1.4 Nivelamento Trigonométrico com Correções dos Efeitos da Curvatura Terrestre e da Refração Atmosférica

Os resultados advindos da aplicação do método de nivelamento trigonométrico foram obtidos de acordo com as equações expostas no item (3.3.6). Sendo assim, os respectivos desníveis observados através da aplicação do método do nivelamento trigonométrico na área de estudo 2 podem ser consultados na Tabela 82, conforme Equação 26. O raio médio terrestre utilizado para os cálculos dos efeitos da curvatura terrestre e da refração atmosférica possui o valor de 6357632,660 metros com base no vértice LP3, este calculado a partir da Equação 124, enquanto o coeficiente de refração adotado foi de 0,13.

$$R_m = \sqrt{MN} \quad (124)$$

Onde:

M = Seção primeiro vertical;

N = Seção meridiana.

Tabela 82 – Resultados Nivelamento Trigonométrico Utilizando Estação Total Topcon GPT 3200-N.

E.O	E.V	Zº	DI(m)	DP(m)	$\delta R_0(m)$	$\delta K_0(m)$	$\Delta H'$ (m)	$\Delta H(m)$
LP7	LP5	89,5837962963	109,801	109,798	0,001	0,000	0,798	0,684
	LP8	87,9874537037	290,975	290,796	0,007	0,001	10,218	10,328
	LP9	91,1735185185	729,110	728,957	0,042	0,005	-14,932	-14,709
	L3	91,6877314815	174,394	174,318	0,002	0,000	-5,136	-5,008
LP8	LP7	92,0343518519	290,980	290,797	0,007	0,001	-10,329	-10,354
	LP9	91,9350925926	751,188	750,759	0,044	0,006	-25,353	-25,193
	LP10	90,3592129630	936,190	936,172	0,069	0,009	-5,869	-5,574
	L3	92,6740740741	328,395	328,037	0,008	0,001	-15,321	-15,374
LP9	LP3	89,0181481481	555,024	554,942	0,024	0,003	15,934	15,950
	LP7	88,8487962963	729,105	728,958	0,042	0,005	14,648	14,631
	LP8	88,0963888889	751,183	750,768	0,044	0,006	24,989	25,068
	L1	89,2251851852	606,546	606,491	0,029	0,004	7,849	7,987
	L3	89,0181481481	555,024	554,942	0,024	0,003	9,511	9,623
L3	LP3	83,8887962963	60,295	59,952	0,000	0,000	6,419	6,311
	LP7	88,3155555556	174,394	174,319	0,002	0,000	5,126	4,985
	LP8	87,3333796296	328,399	328,043	0,008	0,001	15,279	15,266
	LP9	91,0080555556	555,025	554,939	0,024	0,003	-9,765	-9,680
	LP10	89,1297222222	647,197	647,122	0,033	0,004	9,893	9,934

Fonte: O Autor (2020).

Percebe-se que o maior desnível encontrado foi observado no momento em que o vértice LP8 foi ocupado e visou-se LP9, enquanto que o menor ocorreu quando LP7 foi ocupado e visou-se LP5. Ainda na Tabela 82, nota-se que a curvatura e a refração atmosférica já se fazem perceptíveis, chegando a alcançar na visada realizada entre os vértices LP8 e LP10 valores de + 6,90 cm e de -0,009 m para as correções da curvatura terrestre e da refração atmosférica. Também é possível concluir a partir da Tabela 82 que os dados advindos do nivelamento trigonométrico não alcançaram a precisão esperada, podendo ser observadas discrepâncias máximas de $\pm 0,10$ cm para os desníveis obtidos de LP8 para L3 e de L3 para LP8.

Diante da imprecisão alcançada para os dados advindos do nivelamento trigonométrico ainda optou-se por realizar o cálculo das cotas altimétricas dos vértices LP9, LP10 e L3. A estratégia adotada foi a de considerar os vértices LP8 e LP7 que tiveram suas coordenadas altimétricas determinadas via nivelamento geométrico de altíssima precisão durante a aplicação da 3ª e 4ª campanhas de medições como pontos de referência. Nesse caso, considerou-se as cotas

altimétricas de LP7 e LP8 obtidas durante a quarta campanha de medição, na situação, onde se considerou PO08 como ponto de referência absoluto e a partir disto, determinou-se as cotas altimétricas de LP9, LP10 e L3, utilizando-se o método do nivelamento trigonométrico, tais resultados podem ser visualizados nas Tabelas 83 e 84.

Tabela 83 – Cotas altimétricas de referência obtidas via nivelamento geométrico.

Estação	Cota Altimétrica Ajustada (m)	Desvio Padrão (mm)
LP7	990,72803	± 0,06
LP8	1001,03661	± 0,01

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 84 – Cotas altimétricas obtidas via nivelamento trigonométrico.

Estação	Cota Altimétrica (m)
LP9	976,019
LP10	995,487
L3	985,699

Fonte: O Autor (2020).

Os resultados apresentados na Tabela 86 foram calculados de acordo com os dados fornecidos na Tabela 83, utilizando a Equação 27, a estratégia utilizada para o cálculo da cota de LP9 e L3 foi considerar a média dos desníveis obtidos durante as ocupações das estações LP7 e LP8, pois a partir destes pontos, visou-se os mesmos, tal fato não ocorreu para o vértice LP10 que só teve visada diretamente efetuada a partir do vértice LP8 e a cota apresentada representa a obtida a partir deste vértice.

6.4 IMPLANTAÇÃO E LEVANTAMENTO DE PONTOS-OBJETO NA ÁREA DE ESTUDO 2

Nesta seção serão discutidos as etapas e os métodos adotados na definição e implantação de pontos-objeto na área de estudo 2.

6.4.1 Medições, Processamentos e Análises de Resultados dos Pontos-Objeto usando Nível Digital

Neste item são discutidos os resultados alcançados para as coordenadas altimétricas dos oito pontos-objeto determinados a partir de métodos que utilizam o nível digital.

6.4.1.1 Método do Nivelamento Geométrico de Altíssima Precisão

Os dados coletados referentes a aplicação do método do nivelamento geométrico foram processados através de scripts desenvolvidos em linguagem *Matlab*, os resultados alcançados para os pontos-objeto observados podem ser visualizados na Tabela 85 e as linhas integrantes destes circuitos podem ser vistas no subitem 5.5.1.1 através da Figura 33.

Tabela 85 – Nivelamento geométrico de altíssima precisão (pontos-objeto posicionados sobre superfície rochosa).

Linha	Saída	Chegada	Nº de Lances	Desnível Bruto (m)	Distância (m)
L1	LP8	PO01	1	-0,20638	7,23
L2	PO01	PO02	1	-0,30932	12,23
L3	PO02	PO07	1	-0,90792	11,35
L8	PO07	PO08	1	0,38699	9,91
L9	PO08	LP8	1	1,03676	9,16
L10	LP8	PO08	1	-1,03663	9,14

Fonte: O Autor (2020).

Devido ao fato de os pontos-objeto estarem posicionados em uma superfície teoricamente livre de deformações, recomenda-se que os mesmos sejam utilizados futuramente como pontos de referência e para a avaliação de possíveis recalques nas torres eólicas Gravatá 01 e Gravatá 02. Na Tabela 86 são apresentadas as cotas altimétricas dos pontos-objeto PO01, PO02 e PO07 conforme Equação 21, levando-se em consideração o 4º cenário de processamento detalhado no subitem 6.2.1.2.4, onde o ponto P008 foi tomado como referência absoluta para os processamento, com cota altimétrica arbitrada em 1000 metros.

Tabela 86 – Cotas altimétricas dos pontos-objeto obtidas via nivelamento geométrico.

Estação	Cota Altimétrica (m)
PO01	1000,83025
PO02	1000,52093
PO07	999,61301

Fonte: O Autor (2020).

6.4.2 Medições, Processamentos e Análises de Resultados dos Pontos-Objeto usando Estação Total

Neste item são discutidos os resultados alcançados para as coordenadas planialtimétricas obtidas para os oito pontos-objeto materializados sobre a superfície

rochosa de um terreno inclinado, levando-se em consideração métodos de levantamentos que utilizam estações totais.

6.4.2.1 Método da Interseção a Vante

Os oito pontos-objetos observados a partir das bases de observação composta pelos vértices (LP9 - LP10) e (LP9 – L3) foram calculados inicialmente conforme equações 15, 16 e 17 e são apresentados nas Tabelas 87 e 88.

Tabela 87 – Coordenadas planimétricas obtidas via método da interseção a vante a partir da base LP9-LP10.

Estação	X (m)	Y (m)
PO01	149829,735	250451,566
PO02	149806,367	250403,803
PO03	149839,703	250402,347
PO04	149829,880	250400,123
PO05	149827,941	250410,049
PO06	149823,801	250429,601
PO07	149821,777	250439,417
PO08	149819,950	250449,369

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 88 – Coordenadas planimétricas obtidas via método da interseção a vante a partir da base LP9-L3.

Estação	X (m)	Y (m)
PO01	149829,507	250451,212
PO02	149831,328	250441,329
PO03	NO	NO
PO04	149829,826	250400,044
PO05	149827,800	250409,842
PO06	149823,636	250429,350
PO07	149821,624	250439,180
PO08	149819,725	250449,012

Fonte: O Autor (2020).

Onde:

NO = Não observado.

Os dados apresentados nas Tabelas 87 e 88 serviram como valores aproximados iniciais para a aplicação do ajustamento via modelo paramétrico do MMQ. O modelo de ajustamento utilizou como valores observados os azimutes e as distâncias existentes entre os pontos LP9/LP10 e LP9/L3 e os ponto-objeto posicionados sobre a superfície rochosa. As coordenadas planimétricas ajustadas e seus respectivos desvios padrão são apresentadas nas Tabelas 89 e 90.

Tabela 89 – Coordenadas planimétricas dos pontos-objeto posicionados sobre a superfície rochosa utilizando base LP9-LP10.

Estação	X (m)	Y (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_{xy} (m)	$0,051 \leq \chi^2 \leq 7,378$
PO01	149829,614	250450,741	0,025	0,012	0,028	4,275
PO02	149831,476	250440,892	0,021	0,010	0,023	0,054
PO03	149839,718	250401,863	0,021	0,011	0,024	3,748
PO04	149829,901	250399,679	0,020	0,010	0,022	3,316
PO05	149827,892	250409,420	0,022	0,011	0,025	4,072
PO06	149823,761	250428,932	0,024	0,012	0,027	4,435
PO07	149821,750	250438,728	0,026	0,013	0,029	4,843
PO08	149819,860	250448,532	0,027	0,013	0,030	5,092

Fonte: O Autor (2020).

Tabela 90 – Coordenadas planimétricas dos pontos-objeto posicionados sobre a superfície rochosa utilizando base LP9-L3.

Estação	X (m)	Y (m)	σ_x (m)	σ_y (m)	σ_{xy} (m)	$0,051 \leq \chi^2 \leq 7,378$
PO01	149829,602	250450,750	0,010	0,003	0,010	4,124
PO02	149831,446	250440,912	0,010	0,003	0,010	4,557
PO03	NO	NO	NO	NO	NO	NO
PO04	149829,877	250399,697	0,007	0,002	0,007	2,487
PO05	149827,863	250409,441	0,008	0,003	0,009	3,218
PO06	149823,731	250428,953	0,009	0,003	0,009	3,533
PO07	149821,720	250438,748	0,009	0,003	0,009	3,838
PO08	149819,829	250448,553	0,010	0,003	0,010	4,219

Fonte: O Autor (2020).

As coordenadas foram obtidas através de uma rotina iterativa desenvolvida no software Matlab 2018^a e 7 das oito observações convergiram na terceira iteração, a exceção foi a coordenada do ponto PO02 obtida a partir da base LP9 – LP10 que teve sua solução encontrada apenas na sexta iteração. Os resultados advindos da aplicação do teste do χ^2 , considerando os oito pontos-objetos analisados estiveram dentro do intervalo crítico admitido para situações, onde se tem dois graus de liberdade e um nível de significância de 5%. A partir das Tabelas 89 e 90 serão realizadas algumas considerações acerca das discrepâncias para as coordenadas X e Y dos oito pontos-objeto obtidas, considerando-se as bases de observação LP9-LP10 e LP10 – L3.

A discrepância máxima obtida para a coordenada X de um ponto-objeto observado a partir das bases de observação LP9 – LP10 e LP9 – L3 foi de 3 cm para os pontos-objeto PO06 e PO07, enquanto a mínima discrepância em X considerando as duas bases de observação foi de 1,2 cm para a coordenada de PO01. A discrepância máxima em Y foi de 2,1 cm observada entre as coordenadas Y de PO05, PO06 e PO08 obtidas a partir das diferentes bases de observação consideradas, enquanto que a mínima discrepância observada em Y foi de 0,9 cm para o ponto-objeto PO01. A precisão do vértice LP10 interferiu na qualidade da

interseção a vante uma vez que a qualidade desse vértice na coordenada X apresentou valor de 0,034 cm, conforme Tabela 81 do subitem 6.3.1.3.

Nota-se que no geral as precisões médias das coordenadas X e Y dos pontos-objeto analisados foram de 2,6 cm, podendo chegar até 3 cm, considerando a base LP9 – LP10, dito isto, pode-se afirmar que a partir da base de monitoramento constituída por tais vértices LP9 e LP10, não poderão ser detectados deslocamentos inferiores a 3 cm. Em relação a base LP9 – L3 foram obtidas coordenadas X e Y do oito pontos-objeto com precisões médias de 0,9 cm podendo alcançar até 1 cm, dito isto e não levando em consideração as precisões posicionais dos vértices integrantes da base de observação, pode-se afirmar que deslocamentos inferiores a 1 cm são passíveis de não serem detectados a partir desta base de observação.

6.4.2.2 Método da Irradiação 3D

Os dados coletados referentes a aplicação da irradiação 3D foram processados utilizando rotinas desenvolvidas no *Software Excel 2013*, utilizando as Equações 17, 18 e 19 expostas no item 3.3.4. Os ângulos observados, as distâncias horizontais encontradas, os azimutes e as respectivas coordenadas planialtimétricas encontradas, para os sete pontos-objeto visíveis a partir de L3 são apresentados na Tabela 89. A cota altimétrica adotada para L3 foi de 985,699 m exposta na Tabela 84.

Tabela 91 – Resultados Irradiação 3D a partir de L3.

E. O	P. V	HZ	DH (m)	Azimutes	X (m)	Y (m)	H (m)
L3	LP7	359,999375000	174,322	52,41477395	150019,648	250237,228	
L3	PO01	298,36194444°	324,027	350,77671839	149829,579	250450,746	1000,695
L3	PO02	298,40090278°	314,021	350,81567672	149831,394	250440,904	1000,378
L3	PO03	***	***	***	***	***	
L3	PO04	296,71305556°	273,704	349,12782950	149829,889	250399,699	996,643
L3	PO05	296,68437500°	283,653	349,09914895	149827,873	250409,443	997,229
L3	PO06	296,60916667°	303,595	349,02394061	149823,711	250428,949	999,023
L3	PO07	296,59013889°	313,594	349,00491284	149821,705	250438,745	999,493
L3	PO08	296,59215278°	323,579	349,00692672	149819,812	250448,549	999,872

Fonte: O Autor (2020).

Em relação a Tabela 91 foram realizadas comparações entre as cotas altimétricas dos pontos-objeto PO01 e PO02 obtidas via irradiação 3D a partir do vértice L3, com as cotas apresentadas na Tabela 86 obtidas via nivelamento

geométrico. Nessa comparação foram encontradas discrepâncias de 0,135 cm e 0,143 cm respectivamente para os pontos-objeto PO01 e PO02 obtidos via nivelamento geométrico e via nivelamento trigonométrico. Nesse caso é importante frisar que os dados obtidos via nivelamento trigonométrico não foram considerados satisfatórios nesta dissertação, uma vez que foram obtidas discrepâncias superiores a 10 cm para os desníveis coletados a partir de um mesmo alinhamento, conforme detalhado no subitem 6.3.1.4.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais acerca desta dissertação, assim como possíveis recomendações a serem adotadas em levantamentos e pesquisas futuramente realizadas.

7.1 CONCLUSÕES

O estudo e análise de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos realizado nesta dissertação, envolveu a definição e densificação de uma estrutura geodésica composta por um conjunto de pontos de referência e pontos-objeto, materializados através da utilização de diferentes métodos de levantamentos geodésicos/topográficos. Dentre estes foram empregados para a definição do campo de pontos de referência o método de nivelamento geométrico de altíssima precisão, nivelamento trigonométrico, interseção a ré 2D a partir do modelo de transformação de Helmert e triangulação 2D, enquanto que para a definição do campo de pontos-objeto foram utilizados o método da interseção a vante 2D, a irradiação 3D, o nivelamento geométrico de altíssima precisão e o nivelamento trigonométrico. A qualidade do nível digital Leica DNA-03 utilizado durante as campanhas de nivelamento geométrico realizadas foi verificada através da aplicação de procedimentos de verificação e retificação de níveis e da norma ISO 17123-2 (ISO, 2001).

A determinação de pontos de referência da rede utilizando o método da interseção a ré, nesse caso o vértice LP9, a partir dos vértices LP3, L3 e L1 (cf. subitem 5.6.2.2) permitiu a obtenção de coordenadas planimétricas com precisão na ordem de $\pm 0,015$ m. Os demais vértices integrantes da estrutura geodésica de referência determinados via método da triangulação apresentaram precisões posicionais na ordem dos milímetros para os vértices LP8 e LP7, respectivamente, $\pm 0,008$ m e $\pm 0,009$ m (cf. subitem 5.6.2.3). Para o vértice LP10 a precisão posicional foi de $\pm 0,036$ m, ressalta-se que este vértice foi medido em campanhas de medição realizadas em épocas diferentes das realizadas para os vértices LP8 e LP7, tendo sido observado na ocasião da medição possíveis variações no entorno do vértice.

O método do nivelamento trigonométrico possibilitou para as coordenadas altimétricas dos vértices desta rede implantada uma precisão decimétrica, com

discrepâncias na ordem de até $\pm 0,10$ m entre os desníveis encontrados. As máximas correções advindas da curvatura e da refração terrestre foram, respectivamente, em módulo, de 0,069 m e 0,009 m para a cota altimétrica do vértice LP10 determinada a partir do vértice LP8 e as mínimas correções foram, respectivamente, em módulo de 0,000 m e 0,000 m para o vértice LP3 determinado a partir do vértice L3 . Embora tenham sido calculadas as cotas altimétricas dos vértices LP9, LP10 e L3 a partir do nivelamento trigonométrico, ressalta-se que o nível de precisão altimétrica esperado não foi alcançado e os resultados advindos de sua aplicação não devem ser vinculados a Rede Geodésica Planialtimétrica Local, recomendando-se nesse caso uma nova aplicação do método.

A Rede Geodésica Altimétrica Local implantada em Canto (2018), composta por seis pontos-objeto representados por pinos de superfície semiesférica posicionados sobre a base das torres eólicas Gravatá 01 (RN04, RN05 e RN06) e Gravatá 02 (RN01, RN02 e RN03) foi densificada nesta dissertação a partir da adição dos vértices LP7 e LP8, marcos de referências superficiais, e PO08, PO01, PO02 e PO07 pinos fixados em afloramentos rochosos (cf. subitens 5.6.1 e 5.7.1). O monitoramento da rede altimétrica foi realizado em 4 épocas distintas, aplicando-se o método do nivelamento geométrico de altíssima precisão. As duas últimas épocas ocorreram nesta dissertação, adicionando à rede o estudo altimétrico a partir de referências absolutas.

O intervalo temporal decorrido entre a primeira campanha de medição e a última foi de 536 dias. Durante essa série temporal foi possível observar as discrepâncias nos desníveis entre os pinos posicionados entre as torres ao longo das quatro épocas. Na torre eólica Gravatá 01 as discrepâncias máximas e mínimas para o desnível observado ajustado entre os pinos RN04 – RN05 foram de, respectivamente, 0,11 mm entre a terceira e a quarta campanha e de 0,02 mm entre a primeira e a quarta campanha. Entre os pinos RN05 – RN06 as discrepâncias máximas e mínimas para o desnível observado ajustado foram de, respectivamente, 0,27 mm entre a terceira e a quarta campanha e de 0,02 mm entre a segunda e a quarta campanha. Para os pinos RN06 – RN04 as discrepâncias máximas e mínimas para o desnível observado ajustado foram de, respectivamente, 0,18 mm entre a terceira e a quarta campanha e de 0,06 mm entre a segunda e a quarta campanha.

Na torre eólica Gravatá 02 as discrepâncias máximas e mínimas para o desnível observado ajustado entre os pinos RN02 – RN01 foram de, respectivamente, 0,27 mm entre a terceira e a quarta campanha e de 0,07 mm entre a primeira e a quarta campanha. Entre os pinos RN01 – RN03 as discrepâncias máximas e mínimas para o desnível observado ajustado foram de, respectivamente, 0,35 mm entre a terceira e a quarta campanha e de 0,15 mm entre a primeira e a quarta campanha. Para os pinos RN03 – RN02 as discrepâncias máximas e mínimas para o desnível observado ajustado foram de, respectivamente, 0,08 mm entre a terceira e a quarta campanha e de 0,07 mm entre a primeira e a quarta campanha.

A maior discrepância observada entre um pino e outro durante a série temporal analisada foi encontrada entre os pinos RN02 e RN04, que apresentaram oscilações máximas de 0,79 mm entre a primeira e a quarta campanha de levantamento realizada e mínimas de 0,02 mm entre a terceira e a quarta campanha realizadas. Ressalta-se que os pinos RN02 e RN04 compreendem o trecho de medição entre as torres eólicas monitoradas e que fatores como as condições climáticas e a cive acentuado devem ser levados em consideração, além disso, todas as medições entre os pinos foram realizadas com as torres eólicas em pleno funcionamento o que dificultou a realização de algumas leituras com o nível digital.

Ao final da terceira campanha de levantamento foi possível propor, a partir da materialização do marco geodésico LP8, um sistema de referência absoluto para o monitoramento de recalques entre estas estruturas e o terreno inclinado observado na região. No entanto, como o marco geodésico foi implantado no solo ele não pôde ser considerado uma Referência de Nível ideal para o monitoramento de recalques e deslizamentos considerando a precisão altíssima do nível empregado nas medições. Esta afirmação pode ser atestada pela análise das discrepâncias entre os desníveis observados entre os vértices LP7 e LP8 (marcos geodésicos) e as RRNN 02 e 04, durante a terceira e quarta campanha de levantamento que foram superiores a 1 mm, valores estes que superaram a precisão das observações ajustadas durante este período, por estarem os vértices LP7 e LP8 implantados superficialmente no terreno.

A materialização de uma Referência de Nível adequada ao estudo de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos foi realizada durante a

quarta campanha de levantamentos, na qual foram materializados oito pontos-objeto em uma superfície rochosa localizada nas proximidades da torre eólica Gravatá 01. Os pontos foram sequencialmente denominados PO01 a PO08 e estão espaçados em uma malha quadriculada ao longo da superfície rochosa (cf. subitem 5.7.1). Sugere-se nesse caso a adoção do ponto PO08 nivelado e contranivelado durante a quarta campanha de levantamentos realizada como Referência de Nível absoluta na realização de futuras campanhas de nivelamento na localidade. Presume-se, neste caso, que a superfície rochosa esteja livre da ação de deformações detectáveis pelo nível digital utilizado, podendo ser investigado futuramente a partir dos demais pontos implantados nesta superfície rochosa.

No que diz respeito ao acompanhamento planialtimétrico de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos, foram analisados os oito pontos-objeto (PO01 a PO08) espalhados ao longo do terreno inclinado e medidos com estação total. Suas coordenadas planimétricas foram determinadas via aplicação do método da interseção a vante, onde a partir de ajustamento via modelo paramétrico do MMQ, utilizando as bases de observação LP9 – LP10 e LP9 – L3.

Para a base composta pelos vértices LP9 e LP10 obteve-se desvios padrão mínimos de $\pm 0,010$ m e $\pm 0,021$ m para as coordenadas X e Y do ponto, ao passo que o maiores desvios padrão encontrados a partir desta base foram de $\pm 0,028$ m para as coordenadas X e $\pm 0,013$ m para as coordenadas Y do ponto.

Para a base composta pelos vértices LP9 e L3 foram obtidos desvios padrão mínimos de $\pm 0,007$ m e $\pm 0,002$ m para as coordenadas X e Y do ponto PO04, enquanto que os maiores desvios padrão encontrados foram de $\pm 0,010$ m e $\pm 0,003$ m para as coordenadas X e Y dos pontos PO01, PO02 E PO08.

As coordenadas altimétricas dos pontos-objeto fixados sobre superfície rochosa também foram determinadas via método da irradiação 3D a partir do vértice L3, embora os pontos-objeto tenham sido levantados trigonometricamente a partir de LP9, LP10 e L3, os mesmos não foram analisados quanto a altimetria determinada pelo nivelamento trigonométrico, pois a altimetria da rede estava comprometida, conforme descrito anteriormente.

O aplicativo de processamento foi desenvolvido com a finalidade de automatizar o processamento dos dados advindos dos métodos de levantamentos aplicados em campo e no geral foi elaborado de modo que possa ser utilizado para

dados coletados em outros trabalhos, desde que adaptados as situações especificamente abordadas no aplicativo (nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico, método de Kukkamäki, método completo da norma ISO 17123-2 e o método da interseção a ré a partir da transformação de Helmert 2D). No entanto, ainda é necessário realizar testes mais abrangentes para que haja a validação do aplicativo como uma ferramenta confiável.

Para finalidades de monitoramento de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos deve haver uma aplicação periódica de métodos de levantamentos topográficos e geodésicos em tais localidades, os dados obtidos em épocas diferentes auxiliam o estudo geotécnico acerca do local estudado, possibilitando o conhecimento dos parâmetros de movimentação do terreno inclinado. Esta dissertação propõe a partir de sistemas de medição geodésica uma metodologia para detecção de recalques e deslizamentos em terrenos inclinados, apoiando-se em uma Rede Geodésica Altimétrica Local determinada com o emprego de nível digital e em uma rede geodésica planialtimétrica determinada com estação total.

A aplicação da metodologia utilizada nesta dissertação de mestrado em terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos localizados em outras áreas de estudo pode ser efetuada, desde que se atenha as limitações de cada método de levantamento empregado. Entraves como a limitação das linhas de visada e o alto grau de ocupação devem ser levados em consideração, a aplicação de apenas um método de levantamento dificilmente será suficiente para se ter informações detalhadas de um terreno inclinado de grandes extensões

Por fim é importante salientar que embora os métodos de levantamentos Topográficos e Geodésicos proporcionem dados precisos e acurados, o avanço da tecnologia vem proporcionando uma maior otimização das operações de campo alavancando a utilização de tecnologias como o Lidar, o Laser Scanner e estações totais robotizadas. Também vale ressaltar o fato de que o monitoramento e a análise de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos exigem uma interdisciplinaridade entre a Geodésia e a Geotecnia na busca pela solução adequada a cada caso específico.

7.2 RECOMENDAÇÕES

Em função dos resultados obtidos nesta dissertação e no que diz respeito especificamente a área de estudo 2, recomenda-se a adoção dos seguintes procedimentos:

- a) Dar continuidade as campanhas de monitoramento de terrenos inclinados susceptíveis a recalques e deslizamentos. Adotando como pontos de referências altimétricas os pontos-objeto materializados na superfície rochosa localizada nas proximidades da torre eólica Gravatá 01;
- b) Determinar as coordenadas planimétricas dos pontos de referência presentes na área de estudo utilizando equipamento geodésicos/topográficos de alta precisão e que sejam preferencialmente robóticos, eliminando assim, erros humanos no processo de determinação das coordenadas;
- c) Aperfeiçoar o nivelamento trigonométrico da rede geodésica planialtimétrica implantada;
- d) Vincular as Referências de Nível absolutas implantadas na área de estudo 2 à Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), a partir levantamento GNSS.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13133: Execução de Levantamento Topográfico.** Rio de Janeiro – RJ, 1994. 35p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6122 ABNT: Projeto e Execução de Fundações.** Rio de Janeiro – RJ, 2019. 91p.
- AUGUSTO FILHO, O.. **Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de ilha bela.** Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, São Paulo, 1994. 168p.
- BANDEIRA, A.. **Mapa de Risco de Erosão e Escorregamento das Encostas com Ocupações Desordenadas no Município de Camaragibe-PE.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2003. 209p.
- BAYRAK, T.; EYO, E.; BAŞOĞLU, N.; MUSA, T.; AKPEE, D.. **Development of an alternative low - cost landslide monitoring method using data from tusaga - aktif GNSS network.** Boletim de Ciências Geodésicas, v. 21, n. 3, p. 610-623, 2015.
- BOTELHO, F.J.L.. **Métodos de Racionalização Construtiva no Posicionamento preciso de Edificações Prediais.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2003. 102p.
- BRASIL. Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. **Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6766.htm. Acesso em 07.06.2017.
- BRUM, E.V.P.. **Verificação e classificação de níveis de acordo com normas internacionais.** Dissertação de mestrado Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, 2005. 77p.
- BURITY, E.F.. **Determinação da Vulnerabilidade Física em Áreas de Risco de Deslizamento a partir do Posicionamento GNSS, com Técnica RTK-NTRIP.** Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2016. 315p.
- CANTO, L.F.C.. **Metodologia para o Monitoramento Geodésico em Torres Eólicas Onshore.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2018. 250p.
- CANTO, L.F.C; SEIXAS, A.; CANTO, I.C.; PESTANA, P.H.O.N.; SANTOS, W.J.. **Aplicação da Geodésia para o Monitoramento de Torres Eólicas Onshore.** In *Brazil Windpower Conference & Exhibition*. Rio de Janeiro, 2018. 10p.

CANTO, L.F.C; SEIXAS, A.. **Auscultação Geodésica em Torres Eólicas Onshore: Definição do Sistema de Referência e de Medição para o Monitoramento.** REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (ONLINE), v. 72. n.2, 2020. No prelo.

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. **Projeto Monitoramento de Encostas para Prevenção de Deslizamentos.** Disponível em < <https://www.cemaden.gov.br/projeto-monitoramento-de-encostas-para-prevencao-de-deslizamentos/>> Acesso em 21.09.2019.

DALMOLIN, Q.. **Ajustamento por Mínimos Quadrados.** Curitiba: Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas/UFPR, 2002. 175p.

DRAGOMIR, P. I.; NEGRILĂ, A.F.C.; SĂRĂCIN A. **Geodesic techniques used to monitoring the wind turbines towers.** RevCAD, 2014. p.56-63.

ERBA, D.; UCHOA, C.; SOUZA, G.; VERONEZ, M.; FIGUEIREDO, L.; BARCELOS, T.. **Topografia para estudantes de arquitetura, engenharia e geologia.** São Leopoldo – RS: Editora Unisinos, 2005. 211p.

ESPARTEL, L.. **Curso de Topografia.** Porto Alegre: Editora Globo. 7ª. Ed.1987. 688p.

FAGGION, P.L.. **Considerações Sobre a Instrumentação Topográfica.** Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2011. 61p.

FARAH, F.. **Habitação e encostas.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo - SP, 2003. 312p.

GAMA, L. F.; SEIXAS, A.; SOUZA, A. M. B.. **Implantação e análise de estruturas geodésicas planimétricas obtidas por GPS e estação total: Aplicações em levantamentos cadastrais e urbanos.** Revista Brasileira de Cartografia, v. 64, n. 2. p. 227- 247, 2012.

GAMA, L.. **Experimentos e análises metodológicas do desempenho de estruturas geodésicas planimétricas implantadas com GPS e estação total: aplicações em levantamentos cadastrais urbanos.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2008. 154p.

GARNÉS, S. J. A.. **Programa AstGeoTop 2019.** Software de cálculo, Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2019.

GARNÉS, S.J.A.. **O conceito e a dedução das equações da distância horizontal e da diferença de nível das estações totais.** Anais do VII Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação. Recife, 2018. p. 704-712.

GEMAEL, C.. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas.** Curitiba: Editora UFPR, 1994. 319p.

GHILANI, C. D. **Geomática**. São Paulo – SP: *Pearson Education* do Brasil, 2013. 698p.

GHILANI, C.. **Adjustment Computations: Spatial Data Analysis**. New Jersey: Ed. *John Wiley & Sons Inc.* 5th ed, 2010. 647p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao sistema geodésico brasileiro**. Rio de Janeiro – RJ, 2017. 56p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Padronizações de Marcos Geodésicos**. Rio de Janeiro - RJ, 2008. 28p.

IUGS - International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides. **A suggested Method for Describing the Rate of Movement of a Landslide**. Bulletin of The International Association of Engineering Geology, 1995 No. 52. p. 75-78.

ISO - *International Organization for Standardization*. **ISO 17123: Optics and Optical Instruments – Field Procedures for Testing Geodetic and Surveying Instruments – Part 2: Levels**. Geneva, 2001. 13p.

KAHMEN, H.; FAIG, W.. **Surveying**. Berlin. Ed. De Gruyter. 1988. 578p.

KLEIN, I.; MATSUOKA, M, T.; SOUZA, S.F.; COLLISCHONN, C.. **Planejamento de Redes Geodésicas Resistentes a Múltiplos Outliers**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, 2012, v. 18, no 1. p.480-507.

LEICA GEOSYSTEMS. **Manual do Utilizador Leica DNA03/DNA 10**. 2006. Disponível em <<http://www.leicageosystems.com>>. Acesso em 19.06.2017.

MATLAB. Matlab app building. Natick – MA: *MathWorks*, 2018. 518p.

MENDONÇA, J.B.. **Arquivos disponibilizados em sala de aula**. Scripts - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2018.

ONU - Organização das Nações Unidas. **Living with Risk. A global review of disaster reduction initiatives**. Inter-Agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction. Genebra, Suíça, 1994.

PAESE, C. P. M.; WERLICH, R. M. C.; KRUEGER, C. P.; GARNÉS, S. J. A.. **Aplicação de estrutura geodésica no monitoramento de área de escorregamento de terra**. Anais do V Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação. Recife, 2014. p. 473-480.

PINTO, L. I. C.; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.. **O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais**. Revista Ambiente & Água, vol. 12 n. 6, 2017. p. 1082-1100.

RESNIK, B.; BILL, R.. **Vermessungskunde fuer den Planungs-, Bau- und Umweltbereich**. 3. Aulf. Wichmann Verlag: Heidelberg, 2003. 329p.

RHADAMEK, A.A.P.. **Uma abordagem metodológica para a identificação, representação e monitoramento geodésico de uma encosta em risco natural**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2008. 118p.

RHADAMEK, A.A.P.; SILVA, T.F.. **Monitoramento geodésico de uma encosta em processo de deslizamento de terra**. Anais do IV Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação. Recife, 2012. p. 001-009.

SANTOS, M.C.. **Estabilidade das Estruturas Geodésicas**. Universidade Federal do Paraná, Setor de ciências da terra. Curitiba, 1999. 79p.

SANTOS, W. J.; SEIXAS, A.; SANTOS, S. M.. **Avaliação da Aplicação e Eficácia de Métodos de Medição Geodésicos e Topográficos nos Levantamentos de Terrenos Inclinados Susceptíveis a Áreas de Risco**. Revista Anuário do Instituto de Geociências, vol. 42 n.4, 2019. p. 267-283.

SANTOS, W.J.. **A Contribuição da Topografia e da Geodésia no Estudo de Terrenos Inclinados e Áreas de Risco**. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2017. 143p.

SANTOS, W.J.; SEIXAS, A.; SILVA, M.B.; MELO, M.F.O.. **Métodos de Medição Topográficos e Geodésicos Aplicados ao Estudo de Terrenos Inclinados Susceptíveis a Áreas De Risco**. Anais do VII Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação. Recife, 2018. p. 685-694.

SEIXAS, A.. **Projeto de Pesquisa**. Projeto de Pesquisa - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2008.

SEIXAS, A.; SEIXAS, J.R.; SEIXAS, J.J.. **Auscultação Geodésica No Controle De Recalque Da Fundação De Edifício Predial De Grande Porte**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, 2009, v. 15, no21. p.277-298.

SEIXAS, A.; SEIXAS, J.R. ; SEIXAS, J.J.. **Verification and Control of Vertical Bench Mark Applied for Settling Measurements of Large Structure Buildings**. In: FIG Working Week 2012, Rome.

SEIXAS, A; SEIXAS, J.. **Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis – LITPEG CTG/UFPE**. Projeto de Pesquisa - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2015.

SEIXAS, A; SEIXAS, J.. **Controle e Monitoramento de Recalques - Edifício em Construção do Laboratório Integrado de Tecnologia em Petróleo, Gás e Biocombustíveis – LITPEG CTG/UFPE**. Relatório técnico. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2019.

SIGUEL, A.R.; FAGGION, L.P.; VEIGA, L, A, K.; NADAL, C, A.; MATTOS, M, S.; SOARES, M, A.. **Aplicação do Método de Irradiação Tridimensional no Monitoramento de Barragens**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, 2013, v. 19, no3, p.391-406.

SILVA, E. V.; SEIXAS, A.. **O estabelecimento de padrões de referência metrológica: controle e análise da qualidade de estruturas geodésicas altimétricas implantadas no campus Recife da UFPE**. RBC. REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (ONLINE), v. 69. p. 1807-1832, 2017.

SILVA, E.V.. **Monitoramento de estruturas geodésicas altimétricas e estabelecimento de padrões de referência metrológica: Campus Recife da UFPE**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2017. 165p.

SILVA, E.V; SANTOS, W.J.; PESTANA, P.H.O.N; SEIXAS, A.. **Metodologia Para Verificação e Classificação de Nivel Digital Conforme a ISO 17123 – 2**. Anais do VII Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação. Recife, 2018. p. 675-684.

SILVA, G. P.; SEIXAS, A.; GARNÉS, S. J. A.; ROMÃO, V. M. C.. **Definição do sistema de referência para a locação de edificações prediais - área experimental: bairro da Madalena, Recife - PE**. RBC. Revista Brasileira de Cartografia (Online), v. 67, 2015. p. 445-463.

SILVA, G.P.. **Uma abordagem geodésica da locação e controle dimensional de estruturas da construção civil**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2015. 174p.

SILVA, I.; SEGANTINE, P. **Topografia para Engenharia Teoria e Prática de Geomática**. Rio de Janeiro – RJ: Editora Elsevier, 2015. 412p.

SILVA, T. F.; SEIXAS, A.; ROMÃO, V. M. C.. **Conceituação de Campos de Pontos na Medição de Deformação de Objetos**. Anais do I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação. Recife, 2004.

SILVA, T. R. F. ; SEIXAS, A.. **Verificação Metrológica da Qualidade de uma Estação Total: Implantação de Pontos de Apoio e Estudos de Comandos Embutidos**. In: 28º Congresso Nacional de Iniciação Científica, 2017, Recife.

SOUZA, A.. **Análise e comparação de estruturas geodésicas tridimensionais definidas por métodos planialtimétricos de medição**. Dissertação de Mestrado -

Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, 2012. 163p.

TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R.. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 196p.

TORGE, W.. **Geodaesie, 2**. Aufage, Berlin: de Gruyter Lehrbuch, 2001. 416p.

USGS – United States Geological Survey. **The landslide handbook – A guide to understanding landslides**. Reston, Virginia, 2008. 129p.

VARNES, D. J.. **Slope Movement Types and Processes. Landslides Analysis and Control**. In: SCHUSTER, R.L. & KRIZEK, R.J. (Eds.). *Landslides: Analysis and Control*. National Academies Press. p.11-33, 1978.

VARNÉS, D.. **Landside Hazard Zonation: a Review of Principles and Practices**. Paris, 1984. 60p.

WOLF, P; GHILANI, C.. **Adjustment computations : statistics and least square in surveying and GIS**. New Jersey: Ed. John Wiley & Sons Inc. 3th ed, 1996.

APÊNDICE A – TELAS E RELATÓRIOS DO APLICATIVO DE PROCESSAMENTO DESENVOLVIDO

Nivelamento_Geometrico
— □ ×

Arquivo

Nivelamento Geométrico

E.O	E.V	Visada (R/V/I)	Leitura (m)	Distância (m)	Desnível (m)
E7	RN2	R	1.0484	20.2600	-0.1329
E7	RN2	R	1.0484	20.2600	-0.0262
E7	AUX1P	V	1.1812	18.9000	-1.2632
E7	AUX1P	V	1.1813	18.9000	0.6162
E8	AUX1P	R	1.5813	20.2600	0.8861
E8	AUX1P	R	1.5813	20.2600	0.5916
E8	AUX2P	V	1.6075	25.6100	0.6464
E8	AUX2P	V	1.6075	25.6100	1.0966
E9	AUX2P	R	0.5089	26.6800	1.0043
E9	AUX2P	R	0.5089	26.6800	1.1121
E9	LP7	V	1.7722	26.2100	1.5012
E9	LP7	V	1.7721	26.2100	1.2723
E10	LP7	R	1.3920	23.9700	1.3258
E10	LP7	R	1.3920	23.9700	1.2708
E10	AUX3P	V	0.7759	21.0200	1.4829
E10	AUX3P	V	0.7759	21.0300	0.9352
E11	AUX3P	R	1.6981	20.1900	0.3491
E11	AUX3P	R	1.6982	20.1900	-0.3966
E11	AUX4P	V	0.8120	19.4800	-0.9685
E11	AUX4P	V	0.8121	19.4800	-1.4362
E12	AUX4P	R	1.6263	16.0600	-1.1862
E12	AUX4P	R	1.6262	16.0600	-1.3655
E12	AUX5P	V	1.0347	14.6200	-1.2620
E12	AUX5P	V	1.0347	14.6100	-1.5528
E13	AUX5P	R	1.5196	10.8900	-1.1672
E13	AUX5P	R	1.5195	10.9000	-0.8943
E13	AUX6P	V	0.8732	10.7700	-1.1288
E13	AUX6P	V	0.8732	10.7600	-0.6226
E14	AUX6P	R	1.7779	10.5900	-0.6126
E14	AUX6P	R	1.7779	10.5900	-0.8768

Método Tradicional

Digite Número de Séries de Repetições

Digite Altitude Inicial (m)

Ré	Vante	Desnível (m)	Altitudes Calculadas (m)	Altitudes Corrigidas (m)
RN2	AUX1P	-0.1329	999.86713	999.86713
AUX1P	AUX2P	-0.0262	999.84093	999.84092
AUX2P	LP7	-1.2632	998.57773	998.57772
LP7	AUX3P	0.6162	999.19391	999.19391
AUX3P	AUX4P	0.8861	1000.08000	1000.08000
AUX4P	AUX5P	0.5916	1000.67156	1000.67156
AUX5P	AUX6P	0.6464	1001.31795	1001.31795
AUX6P	AUX7P	1.0966	1002.41458	1002.41458

Ajustamento das Observações

Digite Número de Referências de Nível Conhecidas

RN	Altitude (m)	Observações

Ajustamento MMQ - Modelo Paramétrico
 Ajustamento MMQ - Modelo Combinado

Nivelamento_Trigonometrico

Arquivo

Nivelamento Trigonométrico

Dados de Entrada

E.O	E.V	Ângulo Zenital (PD)			Ângulo Zenital (PI)			Dist. Inclinação PD (m)	Dist. Inclinação PI (m)	Alt. do Instrumento (m)	Alt. do Prisma (m)
		G	M	S	G	M	S				
LP8	L3	92	40	30	267	19	31	328.3950	328.3950	1.4390	1.4910
LP8	L3	92	40	14	267	19	31	328.3950	328.3950	1.4390	1.4910
LP8	L3	92	40	34	267	19	36	328.3950	328.3950	1.4390	1.4910
LP8	LP10	90	21	25	269	38	26	936.1890	936.1900	1.4390	1.1960
LP8	LP10	90	21	39	269	38	26	936.1900	936.1910	1.4390	1.1960
LP8	LP10	90	21	26	269	38	19	936.1910	936.1910	1.4390	1.1960
LP8	LP7	92	2	7	267	58	2	290.9800	290.9800	1.4390	1.4610
LP8	LP7	92	1	58	267	57	52	290.9800	290.9800	1.4390	1.4610
LP8	LP7	92	2	15	267	58	4	290.9790	290.9800	1.4390	1.4610
LP8	LP9	91	55	57	268	3	51	751.1880	751.1870	1.4390	1.3090
LP8	LP9	91	56	8	268	3	54	751.1880	751.1880	1.4390	1.3090
LP8	LP9	91	56	7	268	3	49	751.1880	751.1880	1.4390	1.3090

Dados de Entrada

Número de Séries de Repetições:

Altitude Inicial (m):

Raio Médio Local da Terra (m):

Coefficiente de Refração:

Opções de Processamento

Método Tradicional

Correções do Efeito da Curvatura e da Refração

Resultados

E.O	E.V	Ângulo Z...	Desnível(m)	Altitude(m)
LP8	L3	92.6741	-15.3657	984.63428
LP8	LP10	90.3592	-5.5664	994.43357
LP8	LP7	92.0344	-10.3456	989.65439
LP8	LP9	91.9351	-25.1970	974.80299

Kukkamaki

Método de Kukkamaki

Processamentos

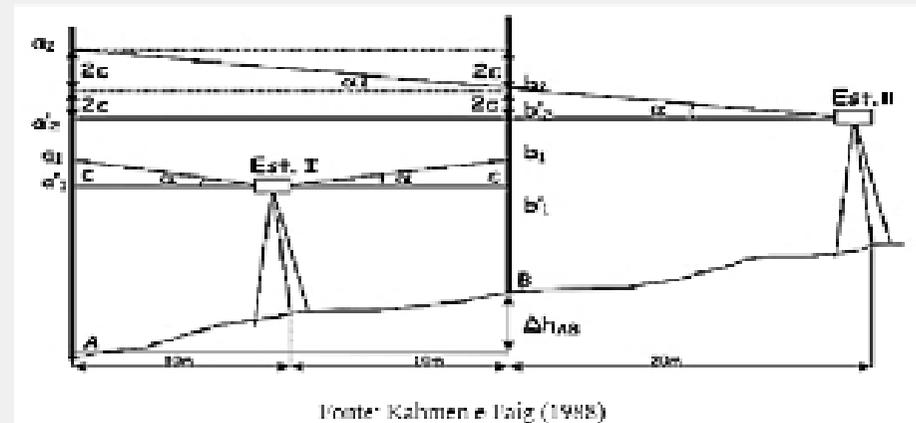
A1

B1

A2

B2

C



ISO_17123_2

Arquivo

Método Completo ISO

Dados de Entrada

L(a) m	L(b) m	D(a) m	D(b) m	$\Delta(a-b)$ m	R (m)	R ² (m)
1.4288	1.4492	29.9600	29.9600	-0.0205	-9.0000e-06	8.1000e-11
1.4290	1.4495	29.9800	29.9600	-0.0205	3.1000e-05	9.6100e-10
1.4282	1.4486	29.9600	29.9500	-0.0204	-8.9000e-05	7.9210e-09
1.4284	1.4488	29.9500	29.9600	-0.0204	-7.9000e-05	6.2410e-09
1.4289	1.4494	29.9500	29.9600	-0.0205	4.1000e-05	1.6810e-09
1.4282	1.4486	29.9500	29.9300	-0.0203	-1.3900e-04	1.9321e-08
1.4288	1.4495	29.9600	29.9400	-0.0207	1.9100e-04	3.6481e-08
1.4286	1.4492	29.9800	29.9500	-0.0205	7.1000e-05	5.0410e-09
1.4291	1.4497	29.9800	29.9700	-0.0206	1.5100e-04	2.2801e-08
1.4290	1.4493	29.9800	29.9500	-0.0203	-1.6900e-04	2.8561e-08
1.4290	1.4496	29.9800	29.9400	-0.0206	1.3100e-04	1.7161e-08
1.4291	1.4495	29.9700	29.9400	-0.0203	-1.2900e-04	1.6641e-08
1.4259	1.4465	29.9600	29.9600	-0.0206	1.2100e-04	1.4641e-08
1.4259	1.4462	29.9600	29.9500	-0.0203	-2.0900e-04	4.3681e-08
1.4261	1.4467	29.9500	29.9400	-0.0206	8.1000e-05	6.5610e-09
1.4263	1.4471	29.9500	29.9500	-0.0208	3.1100e-04	9.6721e-08
1.4263	1.4467	29.9800	29.9600	-0.0204	-5.9000e-05	3.4810e-09
1.4267	1.4473	29.9600	29.9500	-0.0205	5.1000e-05	2.6010e-09
1.4267	1.4471	29.9800	29.9400	-0.0204	-6.9000e-05	4.7610e-09
1.4271	1.4473	29.9700	29.9500	-0.0202	-2.2900e-04	5.2441e-08
1.4265	1.4472	29.9700	29.9400	-0.0206	1.8200e-04	3.3124e-08
1.4263	1.4467	29.9600	29.9500	-0.0204	-6.8000e-05	4.6240e-09
1.4269	1.4472	29.9600	29.9500	-0.0203	-1.3800e-04	1.9044e-08
1.4271	1.4478	29.9500	29.9500	-0.0207	2.6200e-04	6.8644e-08
1.4274	1.4479	29.9600	29.9300	-0.0205	8.2000e-05	6.7240e-09
1.4276	1.4479	29.9600	29.9300	-0.0203	-1.6800e-04	2.8224e-08
1.4275	1.4479	29.9700	29.9400	-0.0204	-1.8000e-05	3.2400e-10
1.4278	1.4481	29.9500	29.9500	-0.0202	2.0800e-04	4.3264e-08

Processamentos

Dados de Entrada

Desvio Padrão do Equipamento (mm)

s (mm)

Processamento

S (mm)

δ (mm)

Testes Aritméticos

Σr (i=1:20) Σr (i=21:40)

$\Sigma L(a)$ (i=1:20) - $\Sigma L(b)$ (i=1:20) $\Sigma \Delta(a-b)$ (i=1:20)

$\Sigma L(a)$ (i=21:40) - $\Sigma L(b)$ (i=21:40) $\Sigma \Delta(a-b)$ (i=21:40)

Resultado

Testes Estatísticos

$\sigma \times 1,19$ $S \leq \sigma \times 1,19$

S^2/s^2 $0,52 \leq S^2/s^2 \leq 1,91$

$(S/\sqrt{10}) \times 2,02$ $|\delta| \leq (S/\sqrt{10}) \times 2,02$

Results_niv_trig_LP8.txt - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

Universidade Federal de Pernambuco

Centro de Tecnologia e Geociências

Departamento de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura

Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação

Sistemas de Medição Geodésicos e Detecção de Movimentos 3D em Terrenos Susceptíveis a Recalques e Deslizamentos

Módulo Nivelamento Trigonométrico - Correções do Efeito da Curvatura e Refração

27-Jan-2020 15:46:53

E.O	E.V	Ângulo Zenital	Dist. Incl.(m)	Desnível (m)	Altitude (m)	Efeito da Curvatura (m)	Efeito da Refração (m)
LP8	L3	92.6740740741	328.395	-15.3657161455	984.634	0.0084755797	0.0011018254
LP8	LP10	90.3592129630	936.190	-5.5664318358	994.434	0.0688818249	0.0089546372
LP8	LP7	92.0343518519	290.980	-10.3456101941	989.654	0.0066542961	0.0008650585
LP8	LP9	91.9350925926	751.188	-25.1970147505	974.803	0.0443479378	0.0057652319

Windows (CRLF)

Ln 1, Col 1

100%

**APÊNDICE B – AJUSTAMENTO MMQ PRIMEIRA CAMPANHA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTÍSSIMA PRECISÃO
COM COTA FIXA DE 1000,0000 METROS PARA RN02**

Vetor dos valores observados (Lb) m	Distâncias das linhas nivelamento/contranivelamento (Km)	Matriz dos Coeficientes das Incógnitas A	Vetor L (m)
0,01303	0,00842	1 0 0 0 0	1000,01303
-0,00251	0,00849	-1 1 0 0 0	-0,00251
-0,01057	0,01319	0 -1 0 0 0	-1000,01057
12,66788	0,45055	0 0 1 0 0	1012,66788
0,00267	0,00938	0 0 -1 1 0	0,00267
-0,00022	0,01231	0 0 0 -1 1	-0,00022
-0,00248	0,00934	0 0 1 0 -1	-0,00248
0,00248	0,00923	0 0 -1 0 1	0,00248
0,0003	0,01143	0 0 0 1 -1	0,0003
-0,00278	0,00852	0 0 1 -1 0	-0,00278
-12,6678	0,44984	0 0 -1 0 0	-1012,66779
0,01057	0,0132	0 1 0 0 0	1000,01057
0,00253	0,00858	1 -1 0 0 0	0,00253
-0,0131	0,00956	-1 0 0 0 0	-1000,0131

Matriz dos Pesos

Diagonal = [118,7648 117,7856 75,8150 2,2195 106,6098 81,2348 107,0664 108,3424 87,4891 117,3709 2,2230 75,7596 116,5501 104,6025]

Vetor dos parâmetros (X)	Variância a Posteriori	Variância a Priori	Qui-Quadrado
1000,01307			
1000,01055			
1012,66783	1,4571e-07	9,0000e-08	14,5707
1012,67057			
1012,67031			

Vetor dos Resíduos (V) m	Observações Ajustadas (La) m	Desvio padrão das observações ajustadas m
0,00004	0,01307	± 0,00002
0,00000	-0,00251	± 0,00002
0,00001	-0,01056	± 0,00002
-0,00005	12,66783	± 0,00018
0,00006	0,00273	± 0,00002
-0,00004	-0,00026	± 0,00002
0,00000	-0,00248	± 0,00002
0,00000	0,00248	± 0,00002
-0,00004	0,00026	± 0,00002
0,00005	-0,00273	± 0,00002
-0,00004	-12,66783	± 0,00018
-0,00001	0,01056	± 0,00002
-0,00002	0,00251	± 0,00002
0,00003	-0,01307	± 0,00002

Matriz Variância-Covariância dos Parâmetros Ajustados (MVCXa)					Desvio padrão dos parâmetros ajustados (m)
4,61966E-10	2,80520E-10	0	0	0	± 0,00002
2,80520E-10	5,47910E-10	0	0	0	± 0,00002
0	0	3,27983E-08	3,27983E-08	3,27983E-08	± 0,00018
0	0	3,27983E-08	3,32557E-08	3,29992E-08	± 0,00018
0	0	3,27983E-08	3,29992E-08	3,32659E-08	± 0,00018

Matriz Variância-Covariância das observações ajustadas (MVCLa)													
4,6E-10	-1,8E-10	-2,8E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	2,8E-10	1,8E-10	-4,6E-10
-1,8E-10	4,5E-10	-2,7E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	2,7E-10	-4,5E-10	1,8E-10
-2,8E-10	-2,7E-10	5,5E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	-5,5E-10	2,7E-10	2,8E-10
0	0	0	3,3E-08	6,6E-24	-6,6E-24	0,0E+00	0,0E+00	6,6E-24	-6,6E-24	-3,3E-08	0	0	0
0	0	0	6,6E-24	4,6E-10	-2,6E-10	-2,0E-10	2,0E-10	2,6E-10	-4,6E-10	-6,6E-24	0	0	0
0	0	0	-6,6E-24	-2,6E-10	5,2E-10	-2,7E-10	2,7E-10	-5,2E-10	2,6E-10	6,6E-24	0	0	0
0	0	0	0,0E+00	-2,0E-10	-2,7E-10	4,7E-10	-4,7E-10	2,7E-10	2,0E-10	0	0	0	0
0	0	0	0,0E+00	2,0E-10	2,7E-10	-4,7E-10	4,7E-10	-2,7E-10	-2,0E-10	0	0	0	0
0	0	0	6,6E-24	2,6E-10	-5,2E-10	2,7E-10	-2,7E-10	5,2E-10	-2,6E-10	-6,6E-24	0	0	0
0	0	0	-6,6E-24	-4,6E-10	2,6E-10	2,0E-10	-2,0E-10	-2,6E-10	4,6E-10	6,6E-24	0	0	0
0	0	0	-3,3E-08	-6,6E-24	6,6E-24	0	0	-6,6E-24	6,6E-24	3,3E-08	0	0	0
2,8E-10	2,7E-10	-5,5E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5E-10	-2,7E-10	-2,8E-10
1,8E-10	-4,5E-10	2,7E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	-2,7E-10	4,5E-10	-1,8E-10
-4,6E-10	1,8E-10	2,8E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	-2,8E-10	-1,8E-10	4,6E-10

**APÊNDICE C – AJUSTAMENTO MMQ SEGUNDA CAMPANHA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTÍSSIMA PRECISÃO
COM COTA FIXA DE 1000,00000 METROS PARA RN02**

Vetor dos valores observados (Lb) m	Distâncias das linhas nivelamento/contranivelamento (Km)	Matriz dos Coeficientes das Incógnitas A					Vetor L (m)
0,01302	0,0088	1	0	0	0	0	1000,01302
-0,00245	0,0093	-1	1	0	0	0	-0,00245
-0,01053	0,0151	0	-1	0	0	0	-1000,01053
12,66750	0,4528	0	0	1	0	0	1012,66750
0,00269	0,0110	0	0	-1	1	0	0,00269
-0,00023	0,0130	0	0	0	-1	1	-0,00023
-0,00246	0,0100	0	0	1	0	-1	-0,00246
0,00248	0,0101	0	0	-1	0	1	0,00248
0,00026	0,0122	0	0	0	1	-1	0,00026
-0,00279	0,0093	0	0	1	-1	0	-0,00279
-12,66738	0,4541	0	0	-1	0	0	-1012,66738
0,01057	0,0151	0	1	0	0	0	1000,01057
0,00248	0,0101	1	-1	0	0	0	0,00248
-0,01310	0,0097	-1	0	0	0	0	-1000,01310

Matriz dos Pesos

Diagonal = [113,3787 107,9914 66,1813 2,2083 91,1577 77,0416 100,2004 99,5025 81,9672 107,7586 2,2024 66,2691 99,1080 102,6694]

Vetor dos parâmetros (X)	Variância a Posteriori	Variância a Priori	Qui-Quadrado
1000,01305			
1000,01057			
1012,66744	1,30263E-07	9,00000E-08	13,0263
1012,67018			
1012,66992			

Vetor dos Resíduos (V) m	Observações Ajustadas (La) m	Desvio padrão das observações ajustadas m
0,00003	0,01305	± 0,00002
-0,00003	-0,00248	± 0,00002
-0,00004	-0,01057	± 0,00002
-0,00006	12,66744	± 0,00017
0,00005	0,00274	± 0,00002
-0,00003	-0,00026	± 0,00002
-0,00002	-0,00248	± 0,00002
0,00000	0,00248	± 0,00002
0,00000	0,00026	± 0,00002
0,00005	-0,00274	± 0,00002
-0,00006	-12,66744	± 0,00017
0,00000	0,01057	± 0,00002
0,00000	0,00248	± 0,00002
0,00005	-0,01305	± 0,00002

Matriz Variância-Covariância dos Parâmetros Ajustados (MVCXa)					Desvio padrão dos parâmetros ajustados (m)		
4,38843E-10	2,67661E-10	0	0	0	± 0,00002		
2,67661E-10	5,46887E-10	0	0	0	± 0,00002		
0	0	2,95335E-08	2,95335E-08	2,95335E-08	± 0,00017		
0	0	2,95335E-08	2,99867E-08	2,97344E-08	± 0,00017		
0	0	2,95335E-08	2,97344E-08	2,99857E-08	± 0,00017		

Matriz Variância-Covariância das observações ajustadas (MVCLa)														
4,4E-10	-1,7E-10	-2,7E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,7E-10	1,7E-10	-4,4E-10
-1,7E-10	4,5E-10	-2,8E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,8E-10	-4,5E-10	1,7E-10
-2,7E-10	-2,8E-10	5,5E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5,5E-10	2,8E-10	2,7E-10
0	0	0	3,0E-08	-6,6E-24	6,6E-24	0	0	-6,6E-24	6,6E-24	-3,0E-08	0	0	0	0
0	0	0	-6,6E-24	4,5E-10	-2,5E-10	-2,0E-10	2,0E-10	2,5E-10	-4,5E-10	6,6E-24	0	0	0	0
0	0	0	6,6E-24	-2,5E-10	5,0E-10	-2,5E-10	2,5E-10	-5,0E-10	2,5E-10	-6,6E-24	0	0	0	0
0	0	0	0	-2,0E-10	-2,5E-10	4,5E-10	-4,5E-10	2,5E-10	2,0E-10	0	0	0	0	0
0	0	0	0	2,0E-10	2,5E-10	-4,5E-10	4,5E-10	-2,5E-10	-2,0E-10	0	0	0	0	0
0	0	0	-6,6E-24	2,5E-10	-5,0E-10	2,5E-10	-2,5E-10	5,0E-10	-2,5E-10	6,6E-24	0	0	0	0
0	0	0	6,6E-24	-4,5E-10	2,5E-10	2,0E-10	-2,0E-10	-2,5E-10	4,5E-10	-6,6E-24	0	0	0	0
0	0	0	-3,0E-08	6,6E-24	-6,6E-24	0	0	6,6E-24	-6,6E-24	3,0E-08	0	0	0	0
2,7E-10	2,8E-10	-5,5E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5E-10	-2,8E-10	-2,7E-10	0
1,7E-10	-4,5E-10	2,8E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	-2,8E-10	4,5E-10	-1,7E-10	0
-4,4E-10	1,7E-10	2,7E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	-2,7E-10	-1,7E-10	4,4E-10	0

Matriz dos Pesos

Diagonal = [93,02 93,20 62,77 6,96 2,19 3,21 76,05 66,71 90,25 90,17 64,39 86,88 12,51 12,46 3,20 2,20 6,99 62,77 93,98 90,50]

Vetor dos parâmetros (X)	Variância a Posteriori	Variância a Priori	Qui-Quadrado
1000,01287			
1000,01057			
998,57765			
1012,66702	6,82644E-08	9,00000E-08	9,860406849
1012,66962			
1012,66962			
1008,88609			

Vetor dos Resíduos (V) m	Observações Ajustadas (La) m	Desvio padrão das observações ajustadas m
-0,00001	0,01287	± 0,00002
-0,00002	-0,00231	± 0,00002
0,00005	-0,01057	± 0,00002
-0,00004	-1,42235	± 0,00006
-0,00004	12,66702	± 0,00009
0,00000	14,08937	± 0,00008
0,00001	0,00260	± 0,00002
0,00001	-0,00001	± 0,00002
0,00000	-0,00260	± 0,00002
0,00001	0,00260	± 0,00002
0,00002	0,00001	± 0,00002
0,00001	-0,00260	± 0,00002
0,00005	-3,78093	± 0,00005
0,00006	3,78093	± 0,00005
0,00000	-14,08937	± 0,00008
-0,00004	-12,66702	± 0,00009
-0,00004	1,42235	± 0,00006
0,00000	0,01057	± 0,00002
-0,00005	0,00231	± 0,00002
-0,00005	-0,01287	± 0,00002

Matriz Variância-Covariância dos Parâmetros Ajustados (MVCXa)							Desvio padrão dos parâmetros ajustados (m)
2,6379E-10	1,5813E-10	0	0	0	0	0	± 0,00002
1,5813E-10	3,1258E-10	0	0	0	0	0	± 0,00002
0	0	4,1237E-09	2,4470E-09	2,4470E-09	2,4470E-09	2,4470E-09	± 0,00006
0	0	2,4470E-09	7,7727E-09	7,7727E-09	7,7727E-09	7,7727E-09	± 0,00009
0	0	2,4470E-09	7,7727E-09	8,0585E-09	7,8929E-09	7,7727E-09	± 0,00009
0	0	2,4470E-09	7,7727E-09	7,8929E-09	8,0424E-09	7,7727E-09	± 0,00009
0	0	2,4470E-09	7,7727E-09	7,7727E-09	7,7727E-09	1,0506E-08	± 0,00010

Matriz dos Pesos

Diagonal = 90,99 100,10 59,59 4,83 1,77 2,79 92,59 62,46 96,81 97,66 64,94 90,91 17,33 17,21 2,78 1,77 4,84 59,70 93,72 90,50]

Vetor dos parâmetros (X)	Variância a Posteriori	Variância a Priori	Qui-Quadrado
1000,01314			
1000,01049			
998,57634			
1012,66700	7,00E-08	9,00E-08	10,114
1012,66971			
1012,66942			
1008,88490			

Vetor dos Resíduos (V) m	Observações Ajustadas (La) m	Desvio padrão das observações ajustadas m
0,00001	0,01314	± 0,00002
0,00005	-0,00266	± 0,00002
-0,00003	-0,01049	± 0,00002
0,00006	-1,42366	± 0,00008
0,00002	12,66700	± 0,00010
-0,00004	14,09066	± 0,00009
0,00000	0,00271	± 0,00002
-0,00002	-0,00028	± 0,00002
0,00002	-0,00242	± 0,00002
0,00001	0,00242	± 0,00002
-0,00003	0,00028	± 0,00002
-0,00001	-0,00271	± 0,00002
-0,00004	-3,78210	± 0,00005
-0,00004	3,78210	± 0,00005
0,00000	-14,09066	± 0,00009
-0,00005	-12,66700	± 0,00010
0,00009	1,42366	± 0,00008
-0,00004	0,01049	± 0,00002
0,00005	0,00266	± 0,00002
0,00000	-0,01314	± 0,00002

Matriz Variância-Covariância dos Parâmetros Ajustados (MVCXa)							Desvio padrão dos parâmetros ajustados (m)
2,74E-10	1,70E-10	0	0	0	0	0	± 0,00002
1,70E-10	3,29E-10	0	0	0	0	0	± 0,00002
0	0	5,92E-09	3,62E-09	3,62E-09	3,62E-09	3,62E-09	± 0,00008
0	0	3,62E-09	9,91E-09	9,91E-09	9,91E-09	9,91E-09	± 0,00010
0	0	3,62E-09	9,91E-09	1,02E-08	1,00E-08	9,91E-09	± 0,00010
0	0	3,62E-09	9,91E-09	1,00E-08	1,02E-08	9,91E-09	± 0,00010
0	0	3,62E-09	9,91E-09	9,91E-09	9,91E-09	1,19E-08	± 0,00011

**APÊNDICE F – AJUSTAMENTO MMQ TERCEIRA CAMPANHA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTÍSSIMA PRECISÃO
COM COTA FIXA DE 1000,0000 METROS PARA LP8**

Vetor dos valores observados (Lb) m	Distâncias das linhas nivelamento/contranivelamento (Km)	Matriz dos Coeficientes das Incógnitas A								Vetor L (m)
3,78087	0,08024	0	0	0	0	1	0	0	1003,78087	
0,00259	0,01109	0	0	0	0	-1	0	1	0,00259	
-0,00001	0,01553	0	0	0	0	0	1	-1	-0,00001	
-0,00261	0,01151	0	0	0	0	1	-1	0	-0,00261	
-14,08937	0,31213	0	0	0	1	-1	0	0	-14,08937	
-12,66698	0,45529	0	1	0	0	-1	0	0	-12,66698	
1,42239	0,14316	0	1	0	-1	0	0	0	1,42239	
0,01057	0,01593	0	-1	1	0	0	0	0	0,01057	
0,00236	0,01064	1	0	-1	0	0	0	0	0,00236	
-0,01282	0,01105	-1	1	0	0	0	0	0	-0,01282	
0,01288	0,01075	1	-1	0	0	0	0	0	0,01288	
-0,00229	0,01065	-1	0	1	0	0	0	0	-0,00229	
-0,01062	0,01593	0	1	-1	0	0	0	0	-0,01062	
-1,42231	0,14361	0	-1	0	1	0	0	0	-1,42231	
12,66706	0,45560	0	-1	0	0	1	0	0	12,66706	
14,08937	0,31199	0	0	0	-1	1	0	0	14,08937	
0,00259	0,01315	0	0	0	0	-1	1	0	0,00259	
-0,00002	0,01499	0	0	0	0	0	-1	1	-0,00002	
-0,00261	0,01108	0	0	0	0	1	0	-1	-0,00261	
-3,78098	0,07995	0	0	0	0	-1	0	0	-1003,78098	

Matriz dos Pesos

Diagonal = [12,46 90,17 64,39 86,88 3,20 2,20 6,99 62,77 93,98 90,50 93,02 93,90 62,77 6,96 2,19 3,21 76,05 66,71 90,25 12,51]

Vetor dos parâmetros (X)	Variância a Posteriori	Variância a Priori	Qui-Quadrado
991,12678			
991,11391			
991,12447			
989,69156	6,94E-08	9,00E-08	10,023
1003,78093			
1003,78353			
1003,78352			

Vetor dos Resíduos (V) m	Observações Ajustadas (La) m	Desvio padrão das observações ajustadas m
0,00006	3,78093	± 0,00005
0,00001	0,00260	± 0,00002
0,00001	0,00000	± 0,00002
0,00001	-0,00260	± 0,00002
0,00000	-14,08937	± 0,00008
-0,00004	-12,66702	± 0,00009
-0,00004	1,42235	± 0,00006
0,00000	0,01057	± 0,00002
-0,00005	0,00231	± 0,00002
-0,00005	-0,01287	± 0,00002
-0,00001	0,01287	± 0,00002
-0,00002	-0,00231	± 0,00002
0,00005	-0,01057	± 0,00002
-0,00004	-1,42235	± 0,00006
-0,00004	12,66702	± 0,00009
0,00000	14,08937	± 0,00008
0,00001	0,00260	± 0,00002
0,00002	0,00000	± 0,00002
0,00001	-0,00260	± 0,00002
0,00005	-3,78093	± 0,00005

Matriz Variância-Covariância dos Parâmetros Ajustados (MVCXa)							Desvio padrão dos parâmetros ajustados (m)
1,09E-08	1,07E-08	1,08E-08	8,19E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	± 0,00010
1,07E-08	1,07E-08	1,07E-08	8,19E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	± 0,00010
1,08E-08	1,07E-08	1,10E-08	8,19E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	± 0,00010
8,19E-09	8,19E-09	8,19E-09	9,90E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	± 0,00010
2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	± 0,00005
2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	3,07E-09	2,90E-09	± 0,00006
2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,78E-09	2,90E-09	3,05E-09	± 0,00006

Matriz Variância-Covariância das observações ajustadas (MVCLa)

3E-09	0	0	0	-3E-24	-5E-24	-2E-24	-4E-25	0	4E-25	-4E-25	0	4E-25	2E-24
0	3E-10	-2E-10	-1E-10	-4E-25	-4E-25	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-2E-10	3E-10	-2E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1E-10	-2E-10	3E-10	4E-25	4E-25	0	0	0	0	0	0	0	0
-3E-24	-4E-25	0	4E-25	7E-09	5E-09	-2E-09	-2E-24	2E-24	0	0	-2E-24	2E-24	2E-09
-5E-24	-4E-25	0	4E-25	5E-09	8E-09	2E-09	-2E-24	0	2E-24	-2E-24	0	2E-24	-2E-09
-2E-24	0	0	0	-2E-09	2E-09	4E-09	0	-2E-24	2E-24	-2E-24	2E-24	0	-4E-09
-4E-25	0	0	0	-1E-24	-1E-24	0	3E-10	-2E-10	-2E-10	2E-10	2E-10	-3E-10	0
0	0	0	0	2E-24	0	-2E-24	-2E-10	3E-10	-1E-10	1E-10	-3E-10	2E-10	2E-24
4E-25	0	0	0	-4E-25	1E-24	2E-24	-2E-10	-1E-10	3E-10	-3E-10	1E-10	2E-10	-2E-24
-4E-25	0	0	0	4E-25	-1E-24	-2E-24	2E-10	1E-10	-3E-10	3E-10	-1E-10	-2E-10	2E-24
0	0	0	0	-2E-24	0	2E-24	2E-10	-3E-10	1E-10	-1E-10	3E-10	-2E-10	-2E-24
4E-25	0	0	0	1E-24	1E-24	0	-3E-10	2E-10	2E-10	-2E-10	-2E-10	3E-10	0
2E-24	0	0	0	2E-09	-2E-09	-4E-09	0	2E-24	-2E-24	2E-24	-2E-24	0	4E-09
5E-24	4E-25	0	-4E-25	-5E-09	-8E-09	-2E-09	2E-24	0	-2E-24	2E-24	0	-2E-24	2E-09
3E-24	4E-25	0	-4E-25	-7E-09	-5E-09	2E-09	2E-24	-2E-24	0	0	2E-24	-2E-24	-2E-09
0	1E-10	2E-10	-3E-10	-4E-25	-4E-25	0	0	0	0	0	0	0	0
0	2E-10	-3E-10	2E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-3E-10	2E-10	1E-10	4E-25	4E-25	0	0	0	0	0	0	0	0
-3E-09	0	0	0	3E-24	5E-24	2E-24	4E-25	0	-4E-25	4E-25	0	-4E-25	-2E-24

**APÊNDICE G – AJUSTAMENTO MMQ QUARTA CAMPANHA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTÍSSIMA PRECISÃO
COM COTA FIXA DE 1000,0000 METROS PARA LP8**

Vetor dos valores observados (Lb) m	Distâncias das linhas nivelamento/contranivelamento (Km)	Matriz dos Coeficientes das Incógnitas A								Vetor L (m)
3,78214	0,058	0	0	0	0	1	0	0	0	1003,78214
0,00241	0,010	0	0	0	0	-1	0	1	0	0,00241
0,00031	0,015	0	0	0	0	0	1	-1	0	0,00031
-0,0027	0,011	0	0	0	0	1	-1	0	0	-0,00270
-14,09066	0,360	0	0	0	1	-1	0	0	0	-14,09066
-12,66709	0,567	0	1	0	0	-1	0	0	0	-12,66709
1,42357	0,207	0	1	0	-1	0	0	0	0	1,42357
0,01053	0,017	0	-1	1	0	0	0	0	0	0,01053
0,00261	0,011	1	0	-1	0	0	0	0	0	0,00261
-0,01314	0,011	-1	1	0	0	0	0	0	0	-0,01314
0,01313	0,011	1	-1	0	0	0	0	0	0	0,01313
-0,00271	0,010	-1	0	1	0	0	0	0	0	-0,00271
-0,01046	0,017	0	1	-1	0	0	0	0	0	-0,01046
-1,42372	0,207	0	-1	0	1	0	0	0	0	-1,42372
12,66698	0,566	0	-1	0	0	1	0	0	0	12,66698
14,0907	0,359	0	0	0	-1	1	0	0	0	14,09070
0,00271	0,011	0	0	0	0	-1	1	0	0	0,00271
-0,00026	0,016	0	0	0	0	0	-1	1	0	-0,00026
-0,00244	0,010	0	0	0	0	1	0	-1	0	-0,00244
-3,78206	0,058	0	0	0	0	-1	0	0	0	-1003,78206

Matriz dos Pesos																		
17,21	97,66	64,94	90,91	2,78	1,77	4,84	59,70	93,72	90,50	90,99	100,10	59,59	4,83	1,77	2,79	92,59	62,46	96,81

Vetor dos parâmetros (X)	Variância a Posteriori	Variância a Priori	Qui-Quadrado
991,12821			
991,11506			
991,12555			
989,69142	7,01E-08	9,00E-08	10,127
1003,78210			
1003,78481			
1003,78452			

Vetor dos Resíduos (V) m	Observações Ajustadas (La) m	Desvio padrão das observações ajustadas m
-0,00004	3,78210	± 0,00005
0,00001	0,00242	± 0,00002
-0,00003	0,00028	± 0,00002
-0,00001	-0,00271	± 0,00002
-0,00002	-14,09068	± 0,00009
0,00005	-12,66704	± 0,00010
0,00007	1,42364	± 0,00008
-0,00004	0,01049	± 0,00002
0,00005	0,00266	± 0,00002
0,00000	-0,01314	± 0,00002
0,00001	0,01314	± 0,00002
0,00005	-0,00266	± 0,00002
-0,00003	-0,01049	± 0,00002
0,00008	-1,42364	± 0,00008
0,00006	12,66704	± 0,00010
-0,00002	14,09068	± 0,00009
0,00000	0,00271	± 0,00002
-0,00002	-0,00028	± 0,00002
0,00002	-0,00242	± 0,00002
-0,00004	-3,78210	± 0,00005

Matriz Variância-Covariância dos Parâmetros Ajustados (MVCXa)							Desvio padrão dos parâmetros ajustados (m)
1,22E-08	1,20E-08	1,21E-08	8,33E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	± 0,00011
1,20E-08	1,20E-08	1,20E-08	8,33E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	± 0,00011
1,21E-08	1,20E-08	1,23E-08	8,33E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	± 0,00011
8,33E-09	8,33E-09	8,33E-09	1,06E-08	2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	± 0,00010
2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	± 0,00005
2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,30E-09	2,14E-09	± 0,00005
2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,03E-09	2,14E-09	2,29E-09	± 0,00005

**APÊNDICE H – AJUSTAMENTO MMQ QUARTA CAMPANHA NIVELAMENTO GEOMÉTRICO DE ALTÍSSIMA PRECISÃO
COM COTA FIXA DE 1000,0000 METROS PARA PO08**

Vetor dos valores observados (Lb) m	Distâncias das linhas nivelamento/contranivelamento (Km)	Matriz dos Coeficientes das Incógnitas A	Vetor L (m)
1,03660	0,0092	0 0 0 0 0 0 0 0 1	1001,03660
4,81874	0,0673	0 0 0 0 1 0 0 0 0	1004,81874
3,78214	0,0581	0 0 0 0 1 0 0 0 -1	3,78214
0,00241	0,0102	0 0 0 0 -1 0 1 0 0	0,00241
0,00031	0,0154	0 0 0 0 0 0 1 -1 0	0,00031
-0,00270	0,0110	0 0 0 0 1 -1 0 0 0	-0,00270
-14,09066	0,3598	0 0 0 1 -1 0 0 0 0	-14,09066
-12,66709	0,5665	0 1 0 0 -1 0 0 0 0	-12,66709
1,42357	0,2067	0 1 0 -1 0 0 0 0 0	1,42357
0,01053	0,0168	0 -1 1 0 0 0 0 0 0	0,01053
0,00261	0,0107	1 0 -1 0 0 0 0 0 0	0,00261
-0,01314	0,0111	-1 1 0 0 0 0 0 0 0	-0,01314
0,01313	0,0110	1 -1 0 0 0 0 0 0 0	0,01313
-0,00271	0,0100	-1 0 1 0 0 0 0 0 0	-0,00271
-0,01046	0,0168	0 1 -1 0 0 0 0 0 0	-0,01046
-1,42372	0,2071	0 -1 0 1 0 0 0 0 0	-1,42372
12,66698	0,5657	0 -1 0 0 1 0 0 0 0	12,66698
14,09070	0,3587	0 0 0 -1 1 0 0 0 0	14,09070
0,00271	0,0108	0 0 0 0 -1 1 0 0 0	0,00271
-0,00026	0,0160	0 0 0 0 0 0 -1 1 0	-0,00026
-0,00244	0,0103	0 0 0 0 1 0 -1 0 0	-0,00244
-3,78206	0,0577	0 0 0 0 -1 0 0 0 1	-3,78206
-4,81868	0,0669	0 0 0 0 -1 0 0 0 0	-1004,81868
-1,03663	0,0091	0 0 0 0 0 0 0 0 -1	-1001,03663

Matriz dos Pesos

109,2 14,9 17,2 97,7 64,9 91 2,8 1,8 4,8 59,7 93,7 90,5 91,0 100,1 59,6 4,8 1,8 2,8 92,6 62,5 96,8 17,3 15,0 109,4

Vetor dos parâmetros (X)	Variância a Posteriori	Variância a Priori	Qui-Quadrado
992,16482			
992,15168			
992,16216			
990,72803	6,17E-08	9,00E-08	10,976
1004,81871			
1004,82142			
1004,82114			
1001,03661			

Vetor dos Resíduos (V) m	Observações Ajustadas (La) m	Desvio padrão das observações ajustadas m
0,00001	1,03661	± 0,00002
-0,00003	4,81871	± 0,00003
-0,00004	3,78210	± 0,00003
0,00001	0,00242	± 0,00002
-0,00003	0,00028	± 0,00002
-0,00001	-0,00271	± 0,00002
-0,00002	-14,09068	± 0,00009
0,00005	-12,66704	± 0,00009
0,00007	1,42364	± 0,00007
-0,00004	0,01049	± 0,00002
0,00005	0,00266	± 0,00002
0,00000	-0,01314	± 0,00002
0,00001	0,01314	± 0,00002
0,00005	-0,00266	± 0,00002
-0,00003	-0,01049	± 0,00002
0,00008	-1,42364	± 0,00007
0,00006	12,66704	± 0,00009
-0,00002	14,09068	± 0,00009
0,00000	0,00271	± 0,00002
-0,00002	-0,00028	± 0,00002
0,00002	-0,00242	± 0,00002
-0,00004	-3,78210	± 0,00003
-0,00003	-4,81871	± 0,00003
0,00002	-1,03661	± 0,00002

Matriz Variância-Covariância dos Parâmetros Ajustados (MVCXa)								Desvio padrão dos parâmetros ajustados (m)
1,00E-08	9,77E-09	9,92E-09	6,58E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,41E-10	± 0,00010
9,77E-09	9,77E-09	9,77E-09	6,58E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,41E-10	± 0,00010
9,92E-09	9,77E-09	1,01E-08	6,58E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,41E-10	± 0,00010
6,58E-09	6,58E-09	6,58E-09	8,61E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,41E-10	± 0,00009
1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,41E-10	± 0,00003
1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,27E-09	1,13E-09	1,41E-10	± 0,00004
1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,03E-09	1,13E-09	1,26E-09	1,41E-10	± 0,00004
1,41E-10	1,41E-10	1,41E-10	1,41E-10	1,41E-10	1,41E-10	1,41E-10	2,63E-10	± 0,00002

Matriz Variância-Covariância das observações ajustadas (MVCLa)

2,63E-10	1E-10	-1E-10	0	0	0	-1E-25	-2E-25	-1E-25	-3E-26	0	3E-26	-3E-26	0	3E-26	1E-25	2E-25	1E-25
1,41E-10	1E-09	9E-10	0	0	0	-1E-24	-2E-24	-6E-25	-2E-25	0	2E-25	-2E-25	0	2E-25	6E-25	2E-24	1E-24
-1,22E-10	9E-10	1E-09	0,00	0,00	0	-9E-25	-1E-24	-5E-25	-2E-25	0	2E-25	-2E-25	0	2E-25	5E-25	1E-24	9E-25
0	0E+00	0,00	2E-10	-1E-10	-9E-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0E+00	0,00	-1E-10	3E-10	-1E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-9E-11	-1E-10	2E-10	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,29E-25	-1E-24	-9E-25	0	0	0	8E-09	6E-09	-2E-09	-8E-25	0E+00	8E-25	-8E-25	0E+00	8E-25	2E-09	-6E-09	-8E-09
-2,33E-25	-2E-24	-1E-24	0	0	0	6E-09	9E-09	3E-09	0	-2E-24	2E-24	-2E-24	2E-24	0	-3E-09	-9E-09	-6E-09
-1,03E-25	-6E-25	-5E-25	0	0	0	-2E-09	3E-09	5E-09	8E-25	-8E-25	0E+00	0	8E-25	-8E-25	-5E-09	-3E-09	2E-09
-2,58E-26	-2E-25	-2E-25	0	0	0	-6E-25	2E-25	8E-25	3E-10	-1E-10	-1E-10	1E-10	1E-10	-3E-10	-8E-25	-2E-25	6E-25
0	0	0,00E+00	0	0	0	-8E-25	-2E-24	-8E-25	-1E-10	2E-10	-9E-11	9E-11	-2E-10	1E-10	8E-25	2E-24	8E-25
2,58E-26	2E-25	2E-25	0	0	0	1E-24	1E-24	0	-1E-10	-9E-11	2E-10	-2E-10	9E-11	1E-10	0	-1E-24	-1E-24
-2,58E-26	-2E-25	-2E-25	0,00E+00	0,00E+00	0	-1E-24	-1E-24	0	1E-10	9E-11	-2E-10	2E-10	-9E-11	-1E-10	0	1E-24	1E-24
0,00E+00	0E+00	0	0,00E+00	0,00E+00	0	8E-25	2E-24	8E-25	1E-10	-2E-10	9E-11	-9E-11	2E-10	-1E-10	-8E-25	-2E-24	-8E-25
2,58E-26	2E-25	2E-25	0,00E+00	0	0	6E-25	-2E-25	-8E-25	-3E-10	1E-10	1E-10	-1E-10	-1E-10	3E-10	8E-25	2E-25	-6E-25
1,03E-25	6E-25	5E-25	0	0	0	2E-09	-3E-09	-5E-09	-8E-25	8E-25	0	0	-8E-25	8E-25	5E-09	3E-09	-2E-09
2,33E-25	2E-24	1E-24	0	0	0	-6E-09	-9E-09	-3E-09	0E+00	2E-24	-2E-24	2E-24	-2E-24	0	3E-09	9E-09	6E-09
1,29E-25	1E-24	9E-25	0	0	0	-8E-09	-6E-09	2E-09	8E-25	0E+00	-8E-25	8E-25	0E+00	-8E-25	-2E-09	6E-09	8E-09
0	0	0	9E-11	1E-10	-2E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,00E+00	0	0	1E-10	-3E-10	1E-10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-2E-10	1E-10	9E-11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,22E-10	-9E-10	-1E-09	0	0	0	9E-25	1E-24	5E-25	2E-25	0	-2E-25	2E-25	0	-2E-25	-5E-25	-1E-24	-9E-25
-1,41E-10	-1E-09	-9E-10	0	0	0	1E-24	2E-24	6E-25	2E-25	0	-2E-25	2E-25	0	-2E-25	-6E-25	-2E-24	-1E-24
-2,63E-10	-1E-10	1E-10	0	0	0	1E-25	2E-25	1E-25	3E-26	0	-3E-26	3E-26	0	-3E-26	-1E-25	-2E-25	-1E-25

**ANEXO A – RELATÓRIO NIVELAMENTO GEOMÉTRICO PROCESSADO VIA ASTGEOTOP
(GARNÉS, 2019).**

AstGeoTop 2014: MÓDULO - NIVELAMENTO GEOMÉTRICO
RELATÓRIO DO AJUSTAMENTO DO NIVELAMENTO E DO CONTRANIVELAMENTO

NIVELAMENTO

SEM AJUSTAMENTO COM AJUSTAMENTO

ESTAÇÃO	COTA(m)	COTA(m)
LP8	1,03660	1,03660
AUX25A	2,23591	2,23592
AUX24A	3,62588	3,62589
RN4	4,81865	4,81866
RN5	4,82136	4,82137
RN6	4,82110	4,82111
RN4	4,81866	4,81867
AUX23A	4,39485	4,39487
AUX22A	3,60668	3,60670
AUX21A	2,65743	2,65745
AUX20A	1,81913	1,81915
AUX19A	0,87358	0,87360
AUX18A	-0,12405	-0,12403
AUX17A	-1,11653	-1,11651
AUX16A	-2,04792	-2,04790
AUX15A	-2,93963	-2,93961
AUX14A	-3,66316	-3,66314
AUX13A	-4,23168	-4,23166
AUX12A	-4,82335	-4,82333
AUX11A	-5,40958	-5,40956
AUX10A	-5,96678	-5,96676
AUX9A	-6,69325	-6,69323
AUX8A	-7,13166	-7,13164
AUX7A	-7,40716	-7,40714
AUX6A	-7,72893	-7,72891
AUX5A	-8,09447	-8,09445
AUX4A	-8,40708	-8,40705
AUX3A	-9,24576	-9,24573
LP7	-9,27204	-9,27201
AUX3A	-9,24649	-9,24646
AUX2A	-8,38221	-8,38218
AUX1A	-7,83833	-7,83830
RN2	-7,84832	-7,84829
RN1	-7,83519	-7,83516
RN3	-7,83790	-7,83787
RN2	-7,84836	-7,84833

Número de Pontos ajustados Nivelamento = 35

CONTRANIVELAMENTO

SEM AJUSTAMENTO AJUSTADAS

ESTAÇÃO	COTA(m)	COTA REDUZIDA(m)	AJUSTADA(m)
LP8	1,03663	1,03663	1,03663
AUX25P	2,27038	2,27038	2,27037
AUX24P	3,59916	3,59916	3,59915

RN4	4,81877	4,81877	4,81876
RN6	4,82118	4,82118	4,82117
RN5	4,82149	4,82149	4,82148
RN4	4,81880	4,81880	4,81879
AUX23P	4,44134	4,44134	4,44132
AUX22P	3,55171	3,55171	3,55169
AUX21P	2,63445	2,63445	2,63443
AUX20P	1,76705	1,76705	1,76703
AUX19P	0,84741	0,84741	0,84739
AUX18P	-0,09896	-0,09896	-0,09898
AUX17P	-1,10146	-1,10146	-1,10148
AUX16P	-2,01201	-2,01201	-2,01203
AUX15P	-2,93589	-2,93589	-2,93591
AUX14P	-3,65210	-3,65210	-3,65212
AUX13P	-4,29462	-4,29462	-4,29464
AUX12P	-4,80813	-4,80813	-4,80815
AUX11P	-5,40924	-5,40924	-5,40926
AUX10P	-5,97008	-5,97008	-5,97010
AUX9P	-6,71077	-6,71077	-6,71079
AUX8P	-7,07894	-7,07894	-7,07896
AUX7P	-7,39672	-7,39672	-7,39674
AUX6P	-7,71431	-7,71431	-7,71433
AUX5P	-8,10704	-8,10704	-8,10706
AUX4P	-8,40485	-8,40485	-8,40487
AUX3P	-9,18105	-9,18105	-9,18108
LP7	-9,27186	-9,27186	-9,27189
AUX3P	-9,18115	-9,18115	-9,18118
AUX2P	-8,31920	-8,31920	-8,31923
AUX1P	-7,82121	-7,82121	-7,82124
RN2	-7,84829	-7,84829	-7,84832
RN3	-7,83776	-7,83776	-7,83779
RN1	-7,83515	-7,83515	-7,83518
RN2	-7,84829	-7,84829	-7,84832

Número de Pontos ajustados Contranivelamento = 35

AJUSTAMENTO COM VALORES MÉDIOS DOS PONTOS COMUNS

ESTAÇÃO	COTA NIV(m)	COTA CNIV(m)	MEDIA(m)	Precisão(mm)
LP8	1,03660	1,03663	1,03661	0,01
RN4	4,81866	4,81877	4,81872	0,05
RN6	4,82110	4,82118	4,82114	0,04
RN5	4,82136	4,82149	4,82142	0,06
RN4	4,81866	4,81880	4,81873	0,07
LP7	-9,27204	-9,27186	-9,27195	0,09
RN2	-7,84836	-7,84829	-7,84833	0,03
RN3	-7,83790	-7,83776	-7,83783	0,07
RN1	-7,83519	-7,83515	-7,83517	0,02
RN2	-7,84836	-7,84829	-7,84833	0,03

Desnível entre PO08 e RN2 = -7,84833 m

Erro de fechamento = -0,00007 m => -0,07000 mm

Comprimento do circuito = 704,19 m

Precisão = 0,042 mm/km