

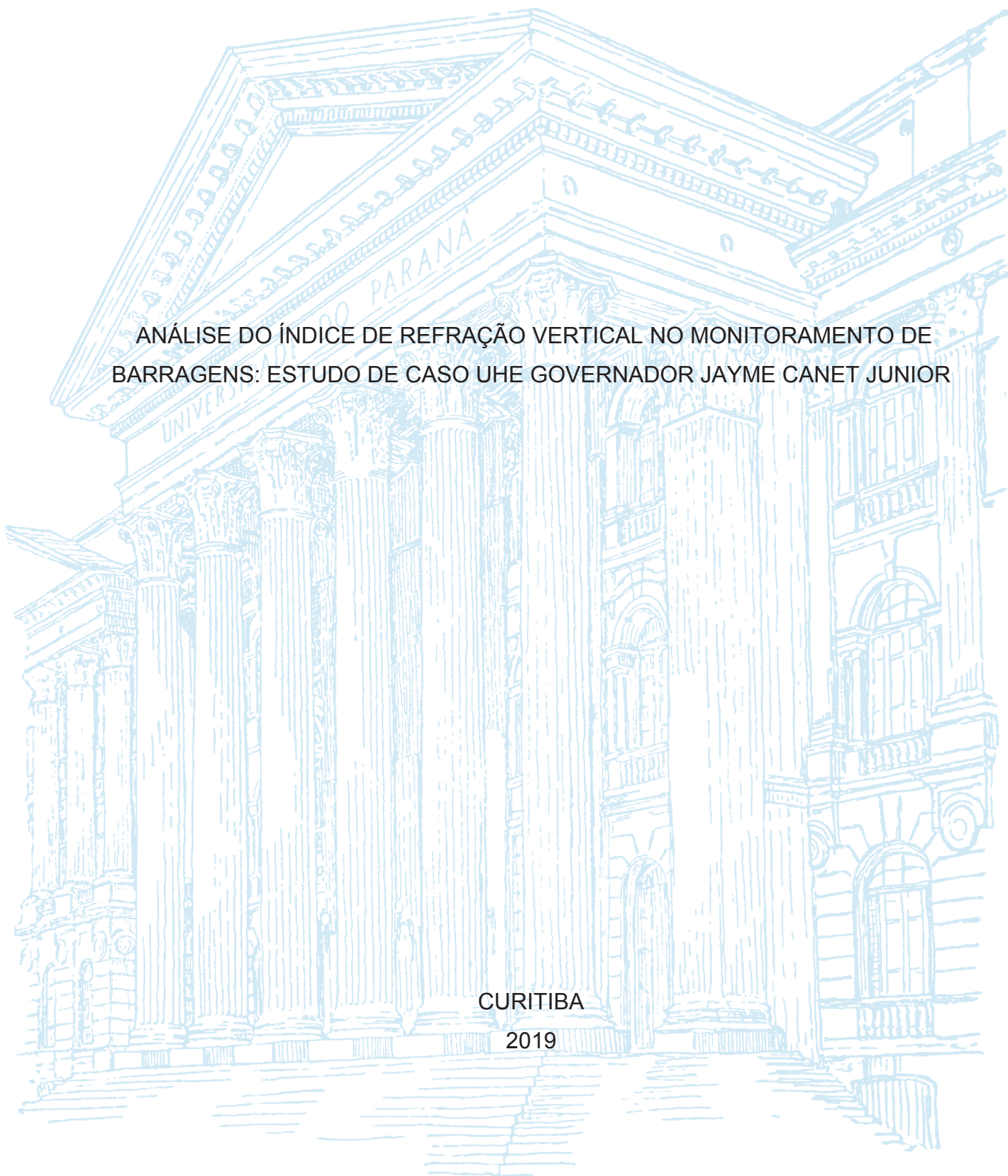
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DAYANE WIGGERS

ANÁLISE DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL NO MONITORAMENTO DE
BARRAGENS: ESTUDO DE CASO UHE GOVERNADOR JAYME CANET JUNIOR

CURITIBA

2019



DAYANE WIGGERS

ANÁLISE DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL NO MONITORAMENTO DE
BARRAGENS: ESTUDO DE CASO UHE GOVERNADOR JAYME CANET JUNIOR

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luis Faggion.
Coorientador: Prof. Dr. Wander da Cruz.

CURITIBA

2019

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

W655a

Wiggers, Dayane

Análise do índice de refração vertical no monitoramento de barragens: estudo de caso UHE governador Jayme Canet Junior [recurso eletrônico] / Dayane Wiggers. – Curitiba, 2019.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2019.

Orientador: Pedro Luis Faggion. Coorientador: Wander da Cruz.

1. Usinas hidrelétricas. 2. Barragens de concreto. 3. Ondas eletromagnéticas. 4. Turbulência Atmosférica. 5. Nivelamento. I. Universidade Federal do Paraná. II. Faggion, Pedro Luis. III. Cruz, Wander da. IV. Título.

CDD: 627.8

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **DAYANE WIGGERS** intitulada: **ANÁLISE DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL NO MONITORAMENTO DE BARRAGENS: ESTUDO DE CASO UHE GOVERNADOR JAYME CANET JUNIOR**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

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

CURITIBA, 22 de Novembro de 2019.

WANDER DA CRUZ

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

IRINEU DA SILVA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO/SÃO CARLOS)

LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado à oportunidade de estar aqui, a minha família, minha mãe Lurdes, irmã Juliana, que sempre me apoiaram e incentivaram a buscar novos conhecimentos e desafios, ao meu orientador Prof. Dr. Pedro Luis Faggion, pela paciência e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho e ao meu coorientador Wander da Cruz pela ajuda e apoio durante esse processo, aos professores Prof. Dr. Luís Augusto Koenig Veiga, Prof. Dr. Wilson Alcântara Soares e Prof. Dr. Irineu da Silva, pelas contribuições e direcionamentos desta pesquisa.

A Profa. Dra Érica pela ajuda, meus colegas e amigos da pós-graduação Samir, Mari, Mario, Andrea, Suzana, Carla, Ruy, Ilich, Andreas, Felipe, Samir, Allan, Túlio, Sergio que me ajudaram em tantos momentos de desespero. Aos pais do professor Wander, pela hospitalidade e gentileza em nos receber em sua casa durante os levantamentos de campo.

A Universidade Federal do Paraná (UFPR), através do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG), por disponibilizar o Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) e o Laboratório de Geodésica Aplicado a Engenharia (GEENG), bem como todos os equipamentos e instalações constantes nestes locais, a Copel pela parceria e disponibilização do espaço para o estudo.

A todos os professores e alunos do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“O sucesso não consiste em não errar, mas em não cometer os mesmos equívocos mais de uma vez.” (GEORGE BERNARD SHAW).

RESUMO

Desde os experimentos de Brocks (1950), sabe-se que o coeficiente de refração varia entre -5 e 15, dependendo da altura acima do solo e das condições meteorológicas do local, logo quando se realiza o monitoramento de barragens utilizando estação total, suas medições são influenciadas por variações no índice de refração que conseqüentemente introduzem um erro nas mesmas. Normalmente correções devido a esse efeito são realizadas utilizando um valor de índice de refração, que foi determinado por Gauss em 1826, cujo valor é 0,13, mas nem sempre deve ser utilizado como uma boa aproximação, portanto a sua determinação para cada região é importante. O presente trabalho apresenta um estudo sobre o tema com a finalidade de avaliar seu comportamento nas proximidades da barragem da usina hidrelétrica Governador Jayme Canet Junior, localizada entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba, no estado do Paraná. Através de dados de nivelamento geométrico, método das visadas iguais, o qual minimiza os efeitos da refração atmosférica, determinou-se os desníveis entre os dois pilares de referência, nas margens direita (Pilar 01) e esquerda (Pilar 02) à montante da barragem, para os 17 marcos de superfície (MSU's) instalados na mureta de proteção e entre o Pilar 03, a jusante e Pilar 02, com precisão melhor do que 1mm por quilômetro. Posteriormente, utilizando uma estação total robotizada, com precisão nominal angular de 1" e linear de $\pm (1\text{mm} + 1,5\text{ppm})$, obteve-se os ângulos zenitais e as distâncias inclinadas, com a finalidade de determinar os mesmos desníveis, agora utilizando o conceito do nivelamento trigonométrico para lances longos. Em uma fase seguinte, utilizando os desníveis, obtidos através do nivelamento geométrico (adotado como referência), na equação de determinação dos desníveis através do nivelamento trigonométrico, foi possível isolar e calcular o índice de refração vertical (k). Utilizando este conceito, calculou-se o valor de k entre o Pilar 01 e todos os MSU's, entre o pilar 02 e todos os MSU's e entre o Pilar 03 e o Pilar 02. Com a média desses valores de k e o valor estabelecido por Gauss, foi possível determinar todos os desníveis e compara-los com os desníveis de referência obtidos através do nivelamento geométrico. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que entre pontos afastados de até 440 m, a média do k calculado é uma boa aproximação e para distâncias maiores que essa, o valor determinado por Gauss ou entre os pilares 01 e 02 apresenta resultados melhores.

Palavras-chave: Índice de refração vertical. Usina hidrelétrica. Nivelamento trigonométrico. Nivelamento geométrico.

ABSTRACT

Since the experiments by Brocks (1950) it is known that the refraction coefficient varies between -5 to 15 depending on height above ground and local meteorological conditions, in the dams monitoring processes using total stations, the data observed are influenced by variations in the refractive index, which consequently could introduce errors in the final results. Usually corrections due to this effect are made using a standard refractive index value, which was determined by Gauss in 1826, whose value is 0.13, but this should not always be used as a good approximation, so its determination for each region and local conditions are important. This research presents a study about the theme used in order to evaluate its behavior at Governador Jayme Canet Junior dam surroundings. This dam is located between the cities of Telêmaco Borba and Ortigueira, both from the state of Paraná in Brazil. Through geometric leveling data and using differential leveling, which is not influenced by atmospheric refraction, the slopes between two reference pillars were determined. The pillars were located on the right (pillar 01) and left (pillar 02) dam margins, between them there are 17 surface landmarks or object points (MSUs), installed at the dam boundary protection and between pillar 03 upstream dam and pillar 01 downstream dam, the difference in height was determined with accuracy better than of 1mm per kilometer. Subsequently, using a robotic total station with 1" of nominal angular accuracy and $\pm (1\text{mm} + 1.5\text{ppm})$ of linear accuracy it was measured both zenith angles and slope distances, in order to determine the same differences in height using the trigonometric leveling for long ranges. In a subsequent phase, using the differences in height obtained through differential leveling (adopted as a reference), in the equation of trigonometric leveling, it was possible to isolate and calculate the vertical refractive index (k). Using this concept, the k value was computed between pillar 01 and all the MSU's, as well as for Pillar 02 and all MSU's, and also between pillar 03 and Pillar 02. With average these values of k and with the value defined by Gauss, all the differences in height were determined and compared with the reference values obtained through the differential leveling. Analyzing the results obtained, between points up to 440 meters, the average of the calculated k is a good approximation, for longer distances, the value determined by Gauss or between the pillars 01 and 02 provide better results.

Keywords: vertical refractive index, dam, trigonometric, survey, differential leveling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – NIVELAMENTO GEOMÉTRICO	27
FIGURA 2 – ERRO COLIMAÇÃO NÍVEL.....	29
FIGURA 3 – SAPATAS	30
FIGURA 4 – PRINCÍPIO DO MÉTODO DE COMPARAÇÃO DE FASE	31
FIGURA 5 – OBTENÇÃO DO DESNÍVEL NO NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO	32
FIGURA 6 – INFLUÊNCIA DA CURVATURA E REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA NO NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO	34
FIGURA 7 – ERROS VERIFICADOS E AJUSTADOS ELETRONICAMENTE.....	37
FIGURA 8 – CURVATURA DO RAIOS NA ATMOSFERA	42
FIGURA 9 – CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS EM PPM (UMIDADE RELATIVA 60%)	46
FIGURA 10 – REFRAÇÃO VERTICAL	49
FIGURA 11 – LOCALIZAÇÃO USINA HIDRELÉTRICA GOVERNADOR JAYME CANET JUNIOR.....	50
FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DE TRABALHO	51
FIGURA 13 – SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL LEICA DNA03.....	52
FIGURA 14 – ESTAÇÃO TOTAL TS15.....	52
FIGURA 15 – PRISMA CIRCULAR GPR 111	53
FIGURA 16 – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA	53
FIGURA 17 – (A) BASE NIVELANTE FORA DE NÍVEL E OS PLANOS π E π' . (B) BASE NIVELANTE SENDO NIVELADA E O PLANO π . (C) BASE NIVELADA E OS PONTOS A, B E C PERTENCENTES AO PLANO π	54
FIGURA 18 – MEDIDA ALTURA DA BASE	54
FIGURA 19 – PONTOS ONDE FORAM REALIZADOS OS LEVANTAMENTOS	56
FIGURA 20 – SISTEMA DE CENTRAGEM FORÇADA (PILARES)	57
FIGURA 21 – PONTOS MONITORADOS.....	57
FIGURA 22 – MATERIALIZAÇÃO DOS PONTOS NA CRISTA.....	58
FIGURA 23 – INSTALAÇÃO ESTAÇÃO TOTAL NO PILAR.....	59
FIGURA 24 – REFERENCIAL DE NÍVEL UHE	60
FIGURA 25 – POSICIONAMENTO DA MIRA NOS PILARES	60

FIGURA 26 – POSICIONAMENTO DA MIRA NOS MSU'S	61
FIGURA 27 – MEDIDA ALTURA ROSCA NOS PONTOS MSU'S	61
FIGURA 28 – CADERNETA DE CAMPO NIVELAMENTO	66
FIGURA 29 – DESNÍVEL REDUZIDO A BASE DA ROSCA.....	70
FIGURA 30 – MONTAGEM DO PRISMA NO PILAR.....	72

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – VARIAÇÃO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS AO LONGO DO LEVANTAMENTO.....	62
GRÁFICO 2 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL A PARTIR DO PILAR 01.....	76
GRÁFICO 3 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL A PARTIR DO PILAR 02.....	79
GRÁFICO 4 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$ E K ENTRE PILAR 01 E PILAR 02)	83
GRÁFICO 5 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$ E K ENTRE PILAR 01 E PILAR 02)	85
GRÁFICO 6 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMETRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	92
GRÁFICO 7 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	94
GRÁFICO 8 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	96
GRÁFICO 9 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	98
GRÁFICO 10 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	100
GRÁFICO 11 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	102

GRÁFICO 12 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	104
GRÁFICO 13 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	106
GRÁFICO 14 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	108
GRÁFICO 15 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	110
GRÁFICO 16 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	112
GRÁFICO 17 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	114
GRÁFICO 18 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	116
GRÁFICO 19 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	118
GRÁFICO 20 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	120
GRÁFICO 21 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	122
GRÁFICO 22 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	124

GRÁFICO 23 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	126
GRÁFICO 24 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	128
GRÁFICO 25 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	130
GRÁFICO 26 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	132
GRÁFICO 27 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)	134

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS CONSTITUINTES DA ATMOSFERA SECA.....	38
TABELA 2 – DADOS BRUTOS ESTAÇÃO TS15	64
TABELA 3 – DESNÍVEL GEOMÉTRICO ENTRE PILAR 02 E PILAR 03	67
TABELA 4 – DESNÍVEIS GEOMÉTRICO ENTRE PILAR 01 E PILAR 02	68
TABELA 5 – ALTURA DA ROSCA (H_r).....	69
TABELA 6 – ALTURA DO INSTRUMENTO E SINAL	72
TABELA 7 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL CALCULADO A PARTIR DO PILAR 01 (1/2)	74
TABELA 8 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL CALCULADO A PARTIR DO PILAR 01 (2/2)	75
TABELA 9 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL CALCULADO A PARTIR DO PILAR 02 (1/2)	77
TABELA 10 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL CALCULADO A PARTIR DO PILAR 02 (2/2)	78
TABELA 11 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL CALCULADO A PARTIR DO PILAR 03.....	80
TABELA 12 – 1º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$ E K ENTRE PILAR 01 E PILAR 02)].....	82
TABELA 13 – 1º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$ E K ENTRE PILAR 01 E PILAR 02)].....	84
TABELA 14 – 2º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)].....	91
TABELA 15 – 3º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)].....	93

TABELA 16 – 4º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO})].....	95
TABELA 17 – 5º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO})].....	97
TABELA 18 – 6º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO})].....	99
TABELA 19 – 7º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO})].....	101
TABELA 20 – 9º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO})].....	103
TABELA 21 – 10º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO})].....	105
TABELA 22 – 11º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO})].....	107
TABELA 23 – 12º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO})].....	109
TABELA 24 – 14º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E	

	NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO}).....	111
TABELA 25	– 2º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO}).....	113
TABELA 26	– 3º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO}).....	115
TABELA 27	– 4º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO}).....	117
TABELA 28	– 5º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO}).....	119
TABELA 29	– 6º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO}).....	121
TABELA 30	– 7º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO}).....	123
TABELA 31	– 9º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO}).....	125
TABELA 32	– 10º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO}).....	127

TABELA 33 – 11º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO})].....	129
TABELA 34 – 12º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO})].....	131
TABELA 35 – 14º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE K=0,13, K = K _{MÉDIO})].....	133

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ATR [®]	- Reconhecimento automático de alvos
COPEL	- Companhia Paranaense de Energia
EDM	- Medidor Eletrônico de Distâncias
k	- Índice de refração vertical
k'	- Média da Distância Nivelada e Contra Nivelada em quilômetros
GEENG	- Laboratório de Geodésica Aplicado a Engenharia
LAIG	- Laboratório de Instrumentação Geodésica
PD	- Pontaria Direta
PI	- Pontaria Inversa
PPGCG	- Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
RN	- Referência de nível
SGB	- Sistema Geodésico Brasileiro
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UHE	- Usina Hidrelétrica de Energia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVOS	22
1.1.1 Objetivo geral	22
1.1.2 Objetivos específicos.....	22
1.2 JUSTIFICATIVA	23
2 REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1 MONITORAMENTO GEODÉSICO DE BARRAGENS	25
2.2 LEVANTAMENTOS ALTIMÉTRICOS	26
2.2.1 Nivelamento Geométrico	27
2.2.1.1 Fontes de erros associados ao nivelamento geométrico.....	28
2.2.2 Nivelamento trigonométrico.....	30
2.2.3 Fontes de erro associados ao nivelamento trigonométrico	36
2.3 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS ATRAVÉS DA ATMOSFERA.....	38
2.3.1 Turbulência Atmosférica.....	39
2.3.2 Índice de Refração	40
2.3.2.1 Efeitos da Refração na medida da distância	41
2.3.2.2 Correções Básicas nas Observações de Distâncias	43
2.3.2.3 Efeito da Refração na curvatura da onda eletromagnética	46
2.3.2.4 Refração Horizontal e Vertical	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	50
3.2 METODOLOGIA.....	50
3.2.1 Equipamentos Utilizados	51
3.2.2 Preparação para Levantamento de Campo.....	54
3.2.3 Levantamento de Campo	55
3.2.3.1 Nivelamento trigonométrico	55
3.2.3.2 Nivelamento geométrico	59
3.2.4 Processamento dos dados	62
4 RESULTADOS	73
5 CONCLUSÃO	86
REFERÊNCIAS	88

APÊNDICE 1 – DADOS DAS DEMAIS CAMPANHAS	91
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de estruturas tem sido objeto de grande pesquisa nacional e internacional e tem como objetivo obter informações quantificadas sobre o comportamento das estruturas, apresentando indicadores sobre o aparecimento ou progresso de danos estruturais e abordagens para identificar e diagnosticar a natureza do dano (AUWERAER; PEETERS, 2003).

O controle dessas estruturas, que podem ser naturais como, por exemplo, cavernas, ou artificiais como túneis, muros de contenção e barragens, utiliza técnicas geodésicas que dão subsídios para diagnosticar possíveis deslocamentos na estrutura, durante a sua construção e/ou ao longo do tempo (LIENHART, 2017), com o objetivo de prever uma possível falha e a partir disso disparar alguma ação de manutenção ou evacuação, a fim de evitar desastres.

Diante desse cenário, técnicas de monitoramento e análise de deformações geodésicas foram sendo desenvolvidas e atualmente devido a modernizações e evolução dos equipamentos de aquisição de dados, diversas técnicas estão disponíveis para realizar essa análise (PALAZZO; SANTOS FILHO; MOREIRA, 2005 e IBGE, 2017).

No âmbito dos levantamentos geodésicos vários métodos são utilizados para o monitoramento de grandes estruturas. Para levantamentos altimétricos os métodos mais utilizados são o nivelamento geométrico e trigonométrico (MOREIRA, 2003).

Porém, mesmo com todo o avanço tecnológico, todas as mensurações apresentam discrepâncias. Independente do tipo de medição ou instrumento utilizado, ela nunca será exata e sempre existirão erros associados (GHILANI; WOLF 2012). Logo, para analisar as possíveis fontes de erros sistemáticos, é preciso compreender o funcionamento dos equipamentos e as condições ambientais do caminho que a onda eletromagnética percorre entre o equipamento e o ponto de interesse.

Segundo IBGE (2017) para evitar a ocorrência e propagação de erros sistemáticos alguns cuidados precisam ser tomados na execução de um nivelamento geométrico (conforme detalhado no item 2.2.1.1.). Já, quando se utiliza o nivelamento trigonométrico, esse cuidado deve ser ainda maior, pois na baixa atmosfera existem influências na propagação da onda eletromagnética, provocando erros na determinação de distâncias. Isso ocorre em função da modificação da

temperatura, pressão e umidade, que provocam variações na densidade da atmosfera o que afeta diretamente a velocidade de propagação e o comprimento de onda, logo poderão ocorrer variações no tempo de deslocamento e curvatura desse feixe (TORGE, 2001).

Essa variação é expressa pelo índice de refração que é determinado em função do comprimento da onda eletromagnética e das condições ambientais do meio (BRUNNER, 1984). Normalmente correções devido a esse efeito são realizadas utilizando um valor de índice de refração que foi determinado por Gauss em 1826 que é 0,13, mas esse valor nem sempre pode ser utilizado como uma boa aproximação, portanto a sua determinação para cada região é importante.

Conforme experimentos realizados por Brocks em 1950, foi possível verificar que esse índice varia, dependendo da altura acima do solo e das condições meteorológicas do local. Desta forma, o estudo do índice de refração vertical no monitoramento da Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) Governador Jayme Canet Junior mostrou-se relevante quando se utiliza estação total, pois estas são influenciadas por esse efeito e conseqüentemente erros são introduzidos às medidas. Essa variação do índice de refração pode ser decomposta nos eixos vertical e horizontal. Esta pesquisa abordará o efeito do índice de refração nos desníveis, ou seja, o índice de refração vertical.

A área de estudo foi escolhida pela proximidade da equipe de pesquisadores vinculados ao grupo de Geodésia aplicada à engenharia, da Universidade Federal do Paraná (UFPR), que já desenvolve atividades de pesquisa no monitoramento de barragens, há um longo período de tempo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar e analisar o índice de refração vertical no monitoramento da barragem Governador Jayme Canet Junior.

1.1.2 Objetivos específicos

- Selecionar modelos para correção dos efeitos da refração atmosférica nas observações realizadas com estação total;
- Calcular e analisar o índice de refração vertical para cada ponto situado na crista do barramento a partir de dados de nivelamento geométrico e trigonométrico;
- Determinar os desníveis a partir da média do índice de refração vertical calculado;
- Determinar desníveis com índice de refração vertical determinado por Gauss.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo da refração está relacionado ao fato de que a refração atmosférica é a principal fonte de erro nas medições geodésicas (HENNES, 2002, INGENSAND, 2008). Ela não visa apenas medir e modelar seus efeitos, mas também contribui para uma melhor compreensão dos processos físicos envolvidos, como distribuição de temperatura e transferência de calor na atmosfera (GEIGER et al., 2009). Portanto, diversos pesquisadores (SCHAAL, 1995; TORGE, 2001, HIRT et al., 2010; REDOVNIKOVI et al., 2013; BOCKEM et al., 2000; RUGER, 1996, YUEQUIAN et al., 2017) estudam esse problema, indicando equações para estimar este efeito, mas para isso normalmente é necessário o levantamento de um número suficiente de gradientes de temperatura com alta precisão, o que nem sempre é possível na prática (REDOVNIKOVI et al., 2013).

Nesse contexto, analisar como as condições climáticas podem influenciar nas medidas geodésicas é importante. Estudar o comportamento da temperatura, pressão e umidade ao longo dos levantamentos geodésicos, aplicados ao monitoramento de barragens, é importante, pois eles podem alterar a velocidade e a direção da onda eletromagnética.

Buscando avaliar este efeito, esta pesquisa fundamenta-se no cálculo do índice de refração vertical, utilizando o desnível entre os pontos de interesse obtidos por meio do nivelamento geométrico de primeira ordem (método visadas iguais), o qual minimiza os efeitos da refração atmosférica. A partir deles e de dados de nivelamento trigonométrico é possível encontrar qual o valor do índice de refração vertical para cada leitura realizada.

Outros métodos para determinação do índice de refração também podem ser utilizados, como o de visadas recíprocas, que não será explorado neste trabalho, mas pode ser estudado em pesquisas futuras.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MONITORAMENTO GEODÉSICO DE BARRAGENS

A origem da utilização barragens se perde na história, existem vestígios dessas obras em vários períodos egípcios, helênicos, romanos; geralmente associados à finalidade de abastecimento público de água potável e, em algumas vezes, em obras de irrigação (GUERRA, 1996).

Para monitorar essas estruturas, em 1853, inicia-se a utilização de medições topográficas, na barragem em Cantaria, na França, construída entre 1830 e 1838. Desde o início do enchimento de seu reservatório inúmeros problemas foram surgindo, sendo assim, as medições topográficas tornavam-se frequentes, com o objetivo de observar deslocamentos na crista (SILVEIRA, 2006).

No Brasil, a partir de 1950, construiu-se um grande numero de usinas hidrelétricas, empregando-se estruturas cada vez maiores, e situadas em locais com grande diversidade e complexidade geológica. Isso exigiu projetos mais elaborados e maior atenção às condições de segurança (SILVEIRA, 2006).

Diante dessa preocupação, o monitoramento e análise de deformações geodésicas tornaram-se cada dia mais importantes e atualmente devido a modernizações e evolução dos equipamentos de aquisição de dados, diversas técnicas estão disponíveis (PALAZZO; SANTOS FILHO; MOREIRA, 2005 e IBGE, 2017).

Para monitorar e mensurar estes deslocamentos duas metodologias independentes podem ser aplicadas (LUTES et al., 2001):

- Baseada nos métodos físicos: com instrumentos específicos, entre eles, extensômetros, inclinômetros, fios de prumo ou pêndulos, que promovem medidas de pontos específicos;
- Baseada no método geodésico: utilizam levantamentos terrestres, posicionamento por satélites, levantamentos fotogramétricos, que envolvem a determinação das coordenadas de pontos de interesse engastados na estrutura.

No âmbito dos levantamentos geodésicos, diversos métodos são utilizados para o monitoramento de grandes estruturas, entre eles estão o posicionamento por

satélites, nivelamento geométrico de primeira ordem, nivelamento trigonométrico, levantamento gravimétrico, irradiações, triangulações e trilaterações (Moreira, 2003).

2.2 LEVANTAMENTOS ALTIMÉTRICOS

O conhecimento da altitude é imprescindível para projetar, implantar e executar obras de engenharia. Dependendo da área em estudo, utilizam-se métodos de medições convenientes à extensão da área, o objetivo da operação, a característica do que se quer nivelar, a precisão requerida, o tempo gasto, os custos envolvidos e os equipamentos disponíveis (Moreira, 2003).

No Brasil, existem atualmente dois referenciais altimétricos, localizados na cidade de Imbituba e Santana, sendo ambos definidos e materializados por meio do método clássico, isto é, a partir de um valor de nível médio do mar calculado a partir de dados da estação maregráfica e propagado por toda a região por meio do nivelamento geométrico de alta precisão (IBGE, 2017).

O nivelamento em sua definição mais simples tem a função de determinar desníveis entre pontos selecionados. Há vários métodos para a obtenção de desníveis e que envolvem o emprego de vários tipos de instrumentação. (GOMES, 2006)

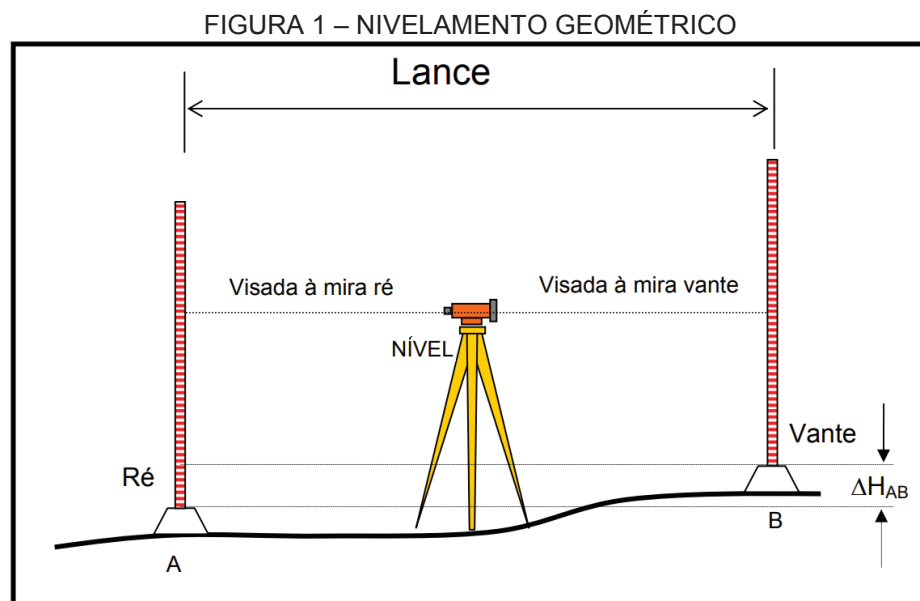
Os métodos utilizados para realizar levantamentos altimétricos podem ser assim classificados (GOMES, 2006):

- Nivelamento Geométrico: É o método usado nos levantamentos altimétricos de alta precisão. Esta metodologia consiste em realizar observações de distâncias verticais através de um nível, utilizado para proporcionar uma linha de visada horizontal sobre miras posicionadas verticalmente em pontos de interesse (GEMIN, 2017).
- Nivelamento Trigonométrico: Baseia-se em relações trigonométricas. É menos preciso que o geométrico e podem fornecer apoio altimétrico para os trabalhos topográficos convencionais.
- Nivelamento Barométrico: Baseia-se na relação inversamente proporcional entre pressão atmosférica e altitude. É o de menor precisão, usado em regiões onde é impossível utilizar os métodos acima.

2.2.1 Nivelamento Geométrico

O nivelamento geométrico é a metodologia mais utilizada em levantamentos altimétricos de alta precisão, segundo as especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) (IBGE, 2017). No SGB, os pontos cujas altitudes foram determinadas a partir de nivelamento geométrico são denominados referência de nível (RN).

Conforme FIGURA 1, os pontos identificados por A e B são os pontos de interesse, onde será possível determinar o desnível entre eles. As réguas em vermelho tracejado ilustram as miras que devem ser posicionadas verticalmente acima do ponto, com a ajuda de níveis esféricos. A distância entre essas duas miras é chamado de lance. Ao centro do lance, o equipamento denominado nível é posicionado com auxílio de um tripé e então, a partir dele, é possível realizar visadas a mira de ré e a mira de vante para que seja possível determinar o desnível descrito como ΔH_{AB} .



Fonte: Adaptado Veiga et al. (2012).

Os níveis são equipamentos classificados de acordo com seu funcionamento e precisão e podem ser denominados de níveis ópticos mecânicos ou níveis automáticos (ópticos ou digitais). Embora sejam diferentes em termos de construção, todos possuem basicamente dois componentes comuns: (a) uma luneta com sistema de lentes para criar uma linha de visada e permitir que a leitura seja

realizada sobre uma mira; e (b) um sistema para orientar a linha de visada em um plano horizontal, por meio de níveis de bolha tubular ou compensadores automáticos (GHILANI; WOLF, 2012).

Os níveis digitais são classificados como automáticos, pois utilizam um compensador para se auto nivelar após uma calagem aproximada com um nível de bolha circular. Este instrumento permite obter leituras ópticas, mas foi projetado para operar empregando o processamento digital de imagens (GHILANI; WOLF, 2012).

Para que o instrumento realize leituras automáticas e armazene tais informações, além da mira ser gravada em código de barras, o instrumento deve ser composto por um arranjo linear de sensores CCD (*Charge-Coupled Device*), que capturam a imagem da porção visualizada da mira e a compara com uma imagem padrão, gravada na memória do instrumento. A partir de um método de correlação de imagens, o processador interno do instrumento encontra a melhor correlação e indica o valor da leitura de forma digital (SILVA; SEGANTINE, 2015).

2.2.1.1 Fontes de erros associados ao nivelamento geométrico

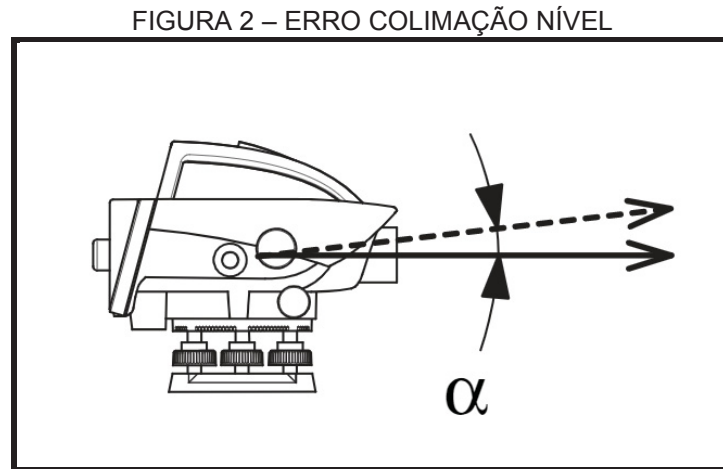
Independente do tipo de medição, ela nunca será exata, sempre existirão erros associados, logo haverá uma diferença entre o valor observado e seu valor verdadeiro. Sendo assim, pode-se afirmar que, nenhuma observação é correta, toda observação contém erros (GHILANI; Wolf (2012).

Os erros nas medidas, segundo Ghilani e Wolf (2012), podem ser provenientes de três fontes; erros naturais, instrumentais e pessoais, e podem ser classificados como sistemáticos e aleatórios. Os erros sistemáticos são provenientes do “sistema de medição” isso inclui o ambiente, o instrumento e o observador. Se as condições do sistema permanecem constantes, o erro também permanecerá constante. Já os erros aleatórios, ou erros acidentais, obedecem as leis da probabilidade, pois não existe uma maneira absoluta de computar ou eliminá-los, mas podem ser estimados.

Os erros instrumentais associados ao nível podem ser (GOMES, 2006):

- Erro de verticalidade do eixo principal: quando o nível tubular ou no caso do digital, o compensador (que é composto por um sistema de pendulo), não está perfeitamente horizontalizado. Logo o eixo principal do instrumento não coincide com a vertical;

- Erro de colimação: é o ângulo (α), formado pela falta de paralelismo entre a linha de visada real e a linha horizontal ideal FIGURA 2.



FONTE: Leica geosystems (2015).

Segundo IBGE (2017) para evitar a ocorrência e propagação de erros sistemáticos alguns cuidados precisam ser tomados na execução do nivelamento:

- Adotar o comprimento das visadas de ré e vante aproximadamente iguais, de modo a minimizar os efeitos de curvatura da Terra e da refração atmosférica;
- Utilizar visadas de até 60m, no nivelamento geométrico duplo;
- Para minimizar os efeitos da reverberação, as leituras mínimas nas miras deverão situar-se acima de 50 cm;
- Empregar o método de leitura da mira ré, vante, vante, ré para o cálculo do desnível, sem movimentar as miras dos pontos;
- As miras deverão ser utilizadas aos pares, tomando-se o cuidado de alterná-las a ré e vante, de modo que a mira posicionada no ponto de partida (lida a ré) seja posicionada no ponto de chegada (lida a vante). Com isso elimina-se o erro de índice das miras;
- As miras devem ser colocadas sobre chapas ou pinos e no caminhamento, sobre sapatas (FIGURA 3), nunca diretamente sobre o solo;
- Para evitar o movimento da mira, causado pelo vento, as leituras devem ser realizadas no limite máximo de 2,5 metros.

Cabe ressaltar, que o IBGE utiliza desde 1990 o valor de $3 \text{ mm}\sqrt{k'}$ (k' é a média da distância nivelada e contra nivelada em quilômetros) para o controle da qualidade do fechamento das seções de nivelamento geométrico de primeira ordem.

FIGURA 3 – SAPATAS



Fonte: Autora (2019).

2.2.2 Nivelamento trigonométrico

A evolução da medição de distância durante os últimos 50 anos contribuiu para a melhoria deste processo. A medição de distância, utilizando ondas eletromagnéticas, permitiu a integração dos medidores eletrônicos de distância (EDM) e teodolitos eletrônicos, resultando em estações totais compactas (LAMBROU; PANTAZIS, 2010).

As Estações Totais são instrumentos muito utilizados em topografia e geodésia, pois são equipamentos leves, precisos, de manuseio prático e que facilitam os trabalhos de levantamento de campo (GOMES, 2006). São equipamentos destinados à medição de ângulos verticais, direções horizontais e distâncias inclinadas. Os principais componentes deste instrumento são um círculo horizontal e um vertical, graduados, um telescópio capaz de girar em torno dos eixos e um mecanismo para a leitura dos círculos (que podem ser ópticos e eletrônicos ou digitais) e um medidor eletrônico de distância (TORGE, 2001).

Este dispositivo para a medição da distância é composto por um oscilador e transmissor, um receptor, um medidor de fase ou pulso, um microprocessador e um detector (TORGE, 2001).

Os círculos horizontal e vertical de uma estação total tem a leitura controlada por um microprocessador, que realiza uma varredura óptico-eletrônica e subsequente interpolação (micrômetro eletrônico). Já o nivelamento do instrumento é realizado por níveis tubulares ou níveis eletrônicos e um compensador que pode ser simples (apenas um eixo) ou duplo (dois eixos) (TORGE, 2001).

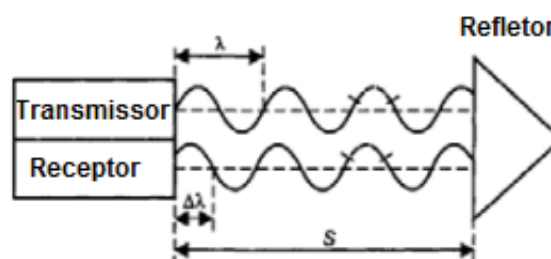
A medição da distância é realizada por meio do cálculo do tempo percorrido pela onda eletromagnética, ao longo do percurso. Esta medida pode ser realizada utilizando dois métodos, o pulso ou comparação de fases. Para o método de pulso, o transmissor emite um pulso que é refletido no alvo e captado no receptor. Um temporizador eletrônico mede o tempo (Δt) que o sinal requer para viajar até o ponto de interesse e voltar. Esse ponto situa-se a uma distância (s) que depende da velocidade da onda eletromagnética neste meio, chamada de $v(s)$, conforme equação (1) (TORGE, 2001):

$$s = \frac{v(s)}{2} \Delta t \quad (1)$$

Para melhorar a precisão deste método, podem ser utilizados pulsos de laser curto, contagem eletrônica com um oscilador de alta frequência, ou fazendo médias de várias medidas individuais (TORGE, 2001).

Para o método de comparação de fase, uma onda eletromagnética portadora de alta frequência é enviada pelo transmissor e modulada continuamente (modulação de amplitude ou frequência) (FIGURA 4). A medição da distância é dada pelo número inteiro de comprimentos de onda (λ), mais uma parte residual que representa uma subdivisão desta onda ($\Delta\lambda$), que é o deslocamento de fase encontrado entre o sinal transmitido e o recebido (TORGE, 2001).

FIGURA 4 – PRINCÍPIO DO MÉTODO DE COMPARAÇÃO DE FASE



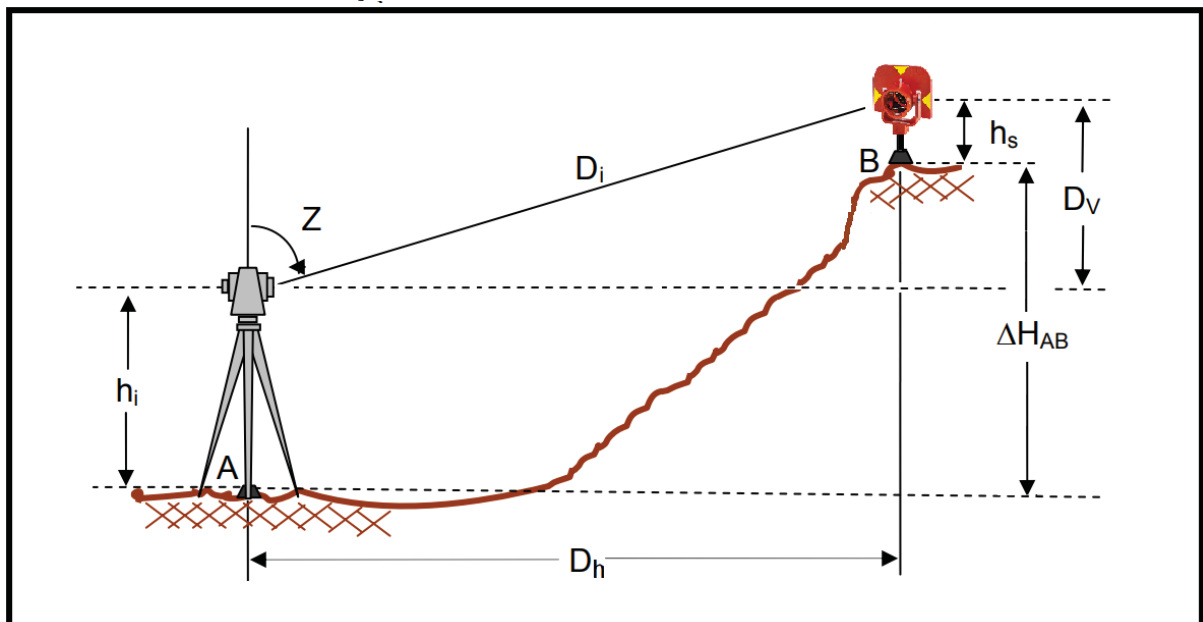
FONTE: Adaptado Torge (2001).

Onde:

- S: Distância;
- λ : Comprimento de onda;
- $\Delta\lambda$: Parte residual do comprimento de onda.

Compreendendo o funcionamento de uma estação total, é possível realizar o nivelamento trigonométrico, que nada mais é, que a diferença de altura entre pontos de interesse, só que obtida através de relações trigonométricas, entre ângulos e distâncias medidos (MOREIRA, 2003). Na FIGURA 5 um exemplo de nivelamento trigonométrico com visada unilateral, mostra qual é o ângulo zenital (Z), medido no plano que contém o eixo vertical e o ponto observado, a distância inclinada (D_i), entre o instrumento e o ponto de interesse. Os pontos A e B são os pontos onde se deseja encontrar o desnível, h_i e h_s são respectivamente a altura do instrumento e a altura do sinal.

FIGURA 5 – OBTENÇÃO DO DESNÍVEL NO NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO



Fonte: Adaptado Gomes (2006).

Onde:

- A e B – Pontos de interesse;
- h_i – Altura do instrumento;
- h_s – Altura do sinal (Prisma);
- D_i – Distância inclinada do instrumento ao alvo;

- Z – Ângulo zenital;
- ΔH_{AB} – Desnível de A para B;
- D_v – Componente de distância inclinada no eixo vertical ou distância vertical;
- D_h – Componente da distância inclinada no plano horizontal ou distância horizontal.

A partir dos dados da distância inclinada (D_i), ângulo zenital (Z), altura do instrumento (h_i) e altura do sinal (h_s) é possível determinar o desnível entre os pontos A e B. De acordo com a FIGURA 5, por trigonometria é possível encontrar o valor do desnível, conforme equações (2) e (3) (KAHMEN; FAIG, 1988);

$$h_i + D_v = \Delta H_{AB} + h_s \quad (2)$$

$$\Delta H_{AB} = h_i - h_s + D_v \quad (3)$$

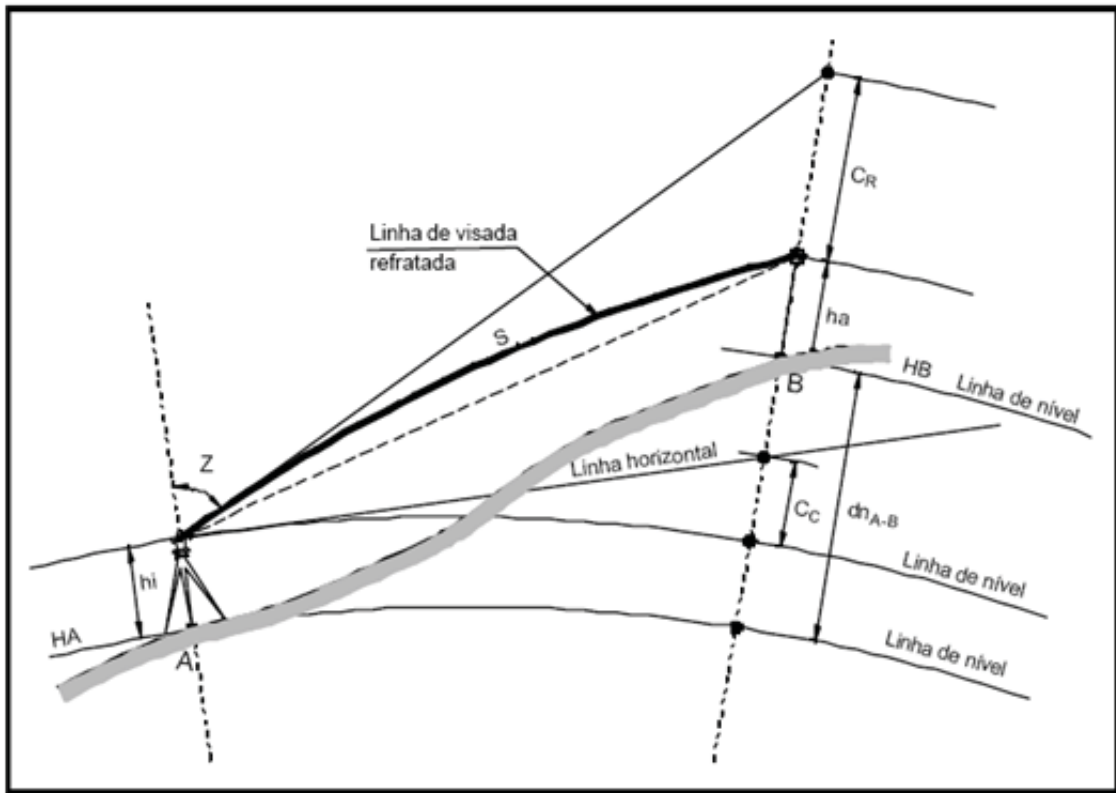
Para determinar a distância vertical é necessário decompor a distância inclinada, conforme equações (4) e (5), onde D_v e D_h são respectivamente as componentes da distância no eixo vertical e da distância no plano horizontal:

$$D_v = D_i \cos Z \quad (4)$$

$$D_h = D_i \sin Z \quad (5)$$

A equação (3) só é válida em pequenas distâncias, pois neste caso a curvatura da terra não influencia significativamente o valor do desnível, nem o efeito da refração, no ângulo zenital. Para lances longos, visadas com distâncias maiores que 100m, entre a estação total e o alvo, esses efeitos precisam ser considerados (GEMAEL, 1987). Conforme FIGURA 6.

FIGURA 6 – INFLUÊNCIA DA CURVATURA E REFRAÇÃO ATMOSFÉRICA NO NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO



Fonte: Moreira (2003).

Para corrigir o efeito da curvatura da terra, demonstrada em (JORDAN, 1974), um termo é adicionado à equação (3), conforme equação (6):

$$C_c = \frac{D_h^2}{2R} \quad (6)$$

- D_h – Distância horizontal do instrumento ao alvo;
- R – Raio da terra;
- C_c – Efeito devido à curvatura da terra.

Para corrigir o efeito da refração outro termo pode ser adicionado à equação (3):

$$C_R = \frac{kD_h^2}{2R} \quad (7)$$

- C_R – Correção devido ao efeito da refração;
- D_h – Distância horizontal do instrumento ao alvo;
- R – Raio da terra;
- k – Coeficiente de refração ou índice de refração horizontal.

Rearranjando a equação (3) e incluindo os termos correspondentes ao efeito da curvatura da terra (6) e a correção devido à refração atmosférica (7), o desnível trigonométrico pode ser descrito, conforme equação (8):

$$\Delta H_{AB} = h_i - h_s + D_v + \frac{D_h^2}{2R} - \frac{kD_h^2}{2R} \quad (8)$$

O termo referente à curvatura precisa ser adicionado ao valor do desnível, pois ele causa um desvio do alvo para baixo, já a correção devido ao efeito da refração deve ser subtraída, pois se o valor do índice de refração é positivo, a imagem do alvo é deslocada para cima, logo é preciso corrigir esse deslocamento.

Ou:

$$\Delta H_{AB} = h_i - h_s + D_v + \frac{D_h^2}{2R} (1 - k) \quad (9)$$

Onde:

- ΔH_{AB} – Desnível de A para B;
- h_i – Altura do instrumento;
- h_s – Altura do sinal (Prisma);
- D_v – Componente de distância inclinada no eixo vertical;
- D_h – Componente da distância inclinada no plano horizontal;
- R – Raio da terra;

- k – Coeficiente de refração.

2.2.3 Fontes de erro associados ao nivelamento trigonométrico

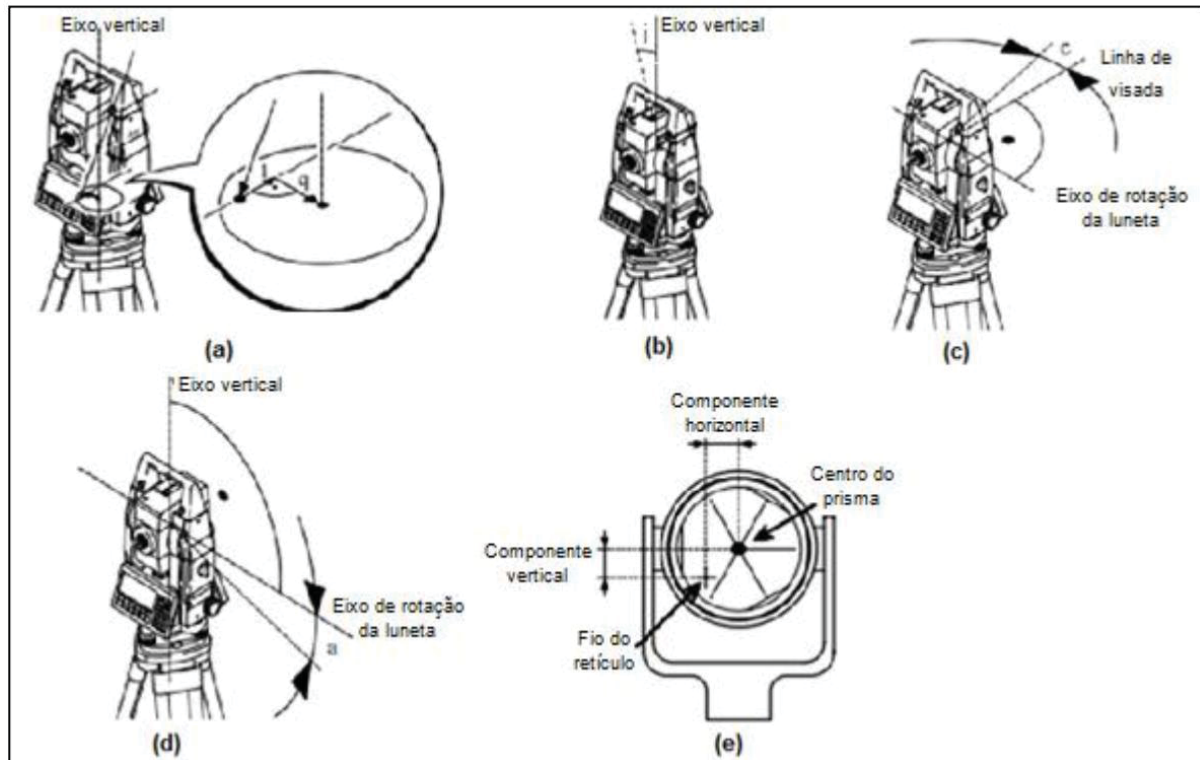
Os chamados erros instrumentais, muitas vezes originam-se na própria fase de fabricação do equipamento ou ao longo do tempo de uso. Muitas vezes devido à falta de manutenção do equipamento (KAHMEN; FAIG 1988). Por essa razão, existe a recomendação dos fabricantes para que sejam realizados o ajuste e a verificação dos equipamentos periodicamente.

Os erros instrumentais associados à estação total podem ser (LEICA GEOSYSTEMS, 2015):

- Erro de índice do compensador: este erro corresponde à determinação do centro da bolha usada no nivelamento do instrumento e pode ocorrer no eixo longitudinal e transversal (l, t) (FIGURA 7 – a);
- Erro de índice vertical: corresponde ao erro do ponto zero do círculo graduado vertical, em relação ao eixo vertical do instrumento (FIGURA 7 – b);
- Erro de verticalidade do eixo principal: quando o nível tubular ou no caso do digital, o sistema de pendulo não está perfeitamente horizontalizado, logo o eixo principal do instrumento não coincide com a vertical;
- Erro de colimação: causado pela falta de perpendicularidade entre a linha de visada ou de colimação e o eixo secundário (FIGURA 7 – c);
- Inclinação do eixo secundário: devido ao desvio causado pela falta de perpendicularidade entre o eixo principal e o eixo secundário (FIGURA 7 – d);
- Erro de zero no ATR¹: corresponde a não coincidência da pontaria com o centro do prisma. Este origina variações na linha de visada tanto na direção horizontal, quanto vertical (FIGURA 7 – e).

¹ É uma função de reconhecimento automático de alvos (ATR®), um sistema de detecção do prisma com maior rapidez e uma menor influência do operador.

FIGURA 7 – ERROS VERIFICADOS E AJUSTADOS ELETRONICAMENTE



FONTE: Adaptado Leica Geosystems (2015).

Para evitar a ocorrência e propagação de erros sistemáticos alguns cuidados precisam ser tomados na execução de um levantamento utilizando estação total:

- Diferenças de temperatura entre o instrumento e o ambiente de trabalho resultam em mudanças na característica do instrumento, em particular do compensador. Logo, faz-se necessário o equilíbrio térmico entre o instrumento e o ambiente antes do início das medições (DZIERZEGA; SCHERRER, 2003).
- Verificar e ajustar o equipamento periodicamente. Segundo Leica Geosystems (2015), essa verificação pode ser efetuada em campo, por meio de procedimentos e configurações específicas, nela o equipamento realiza leituras e a partir desses valores estima alguns erros instrumentais e então estes são armazenados na memória do instrumento e automaticamente compensam os valores medidos, nas próximas observações realizadas.

2.3 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS ATRAVÉS DA ATMOSFERA

Com pouquíssimas exceções, as medições geodésicas utilizam ondas eletromagnéticas para medir direções horizontais, ângulos verticais e distâncias (BRUNNER, 1984). Independente de qual parâmetro será mensurado, as medições dependem principalmente de ondas eletromagnéticas e, portanto, são influenciadas pelas variações das condições atmosféricas. Essas variações se devem a mudanças nas características e composição da atmosfera ao longo do caminho percorrido pela onda.

A atmosfera é constituída por diferentes gases que estão agregados à superfície terrestre pela atração da gravidade. Na análise da composição do ar é conveniente suprimir o vapor d'água exatamente porque sua concentração varia bastante, alterando as proporções dos demais constituintes. Quando se desumidifica o ar, obtém-se o chamado "ar seco" (SILVA, 2009). O ar seco, em volume é composto em mais de 99% de nitrogênio e oxigênio. Observações mostram que esses gases são misturados em porções constantes até aproximadamente 100 km de altitude. Conforme TABELA 1.

TABELA 1 – PRINCIPAIS CONSTITUINTES DA ATMOSFERA SECA

Componente	Volume % (ar seco)
Nitrogênio (N ₂)	78,08
Oxigênio (O ₂)	20,95
Argônio (Ar)	0,93
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,037
Neônio (Ne)	0,0018
Hélio (He)	0,0005
Ozônio (O ₃)	0,00006
Hidrogênio (H)	0,00005
Criptônio (Kr)	0,00011
Xenônio (Xe)	0,00009
Metano (CH ₄)	0,00017

FONTE: Adaptada de Barry e Chorley (2013).

A taxa de transparência da atmosfera depende de numerosas variáveis, como por exemplo: comprimento de onda, distância, temperatura, pressão, mistura gasosa, chuva, neve, poeira, aerossóis e do tamanho das partículas de todos esses constituintes (RUGER, 1996).

2.3.1 Turbulência Atmosférica

A turbulência atmosférica é denominada como a instabilidade das condições ambientais e tem três principais fontes: o fluxo de troca de calor entre o solo e o ar, velocidade do vento e presença de obstáculos sobre a superfície do solo. Ela é muito intensa próxima à superfície, diminuindo gradualmente até uma determinada altura (SCHAAL, 1995).

As variações da temperatura do ar, próximas ao solo, são provocadas pelo aquecimento ou resfriamento do solo. Esse fluxo de calor gera um gradiente vertical da temperatura, provocado pela própria ação da gravidade. Esse fluxo de calor e, conseqüentemente, movimentação dessas massas de ar, procura uma situação chamada equilíbrio adiabático, em que mesmo havendo um gradiente vertical de temperatura, não há troca de calor entre as camadas (SCHAAL, 1995).

Segundo Schaal (1995), o fluxo de calor turbulento é um processo muito complexo, seu estudo requer uma instrumentação elaborada, pois depende da radiação solar incidente, da absorção de calor pelo solo, da velocidade do vento e da rugosidade ou ondulação do solo.

Essa rugosidade está associada aos elementos que cobrem o solo e pode variar de centímetros, em um solo pavimentado, a metros, em um solo com a presença de árvores, arbustos ou mesmo construções (PRIESTLEY, 1974).

Segundo Schaal (1995), quando uma massa de ar é deslocada adiabaticamente para um ponto mais elevado acontece uma expansão, em função da diminuição da pressão e conseqüentemente uma diminuição da temperatura. Logo três situações podem ocorrer:

- **A massa de ar permanece com a mesma temperatura**, nesse caso, os dois locais possuem a mesma temperatura. Esse estado é chamado de estado neutro, o qual predomina no amanhecer, anoitecer e por períodos prolongados de céu bem encoberto por nuvens;
- **A massa de ar adquire temperatura maior que a temperatura do novo local**, esse caso ocorre quando nas camadas mais baixas a temperatura é maior, existe um gradiente de temperatura negativo. Esse estado é nomeado de estado instável, o qual predomina durante o período diurno com elevada insolação.

- **A massa de ar adquire temperatura menor que a temperatura do novo local**, essa situação ocorre quando a temperatura potencial no ponto mais baixo e menor que no ponto mais alto, ou seja, o gradiente da temperatura potencial é positivo. Chamado de estado estável, ele acontece predominantemente durante o período noturno com céu claro.

Os diferentes estados de turbulência provocam perturbações no índice de refração e, por consequência, nas medições eletrônicas de distâncias e na trajetória da linha de visada.

2.3.2 Índice de Refração

A maioria dos processos climáticos situam-se nas camadas mais próxima ao solo (Troposfera). Efeitos da distribuição do solo, oceano e vegetação ocasionam turbulências atmosféricas e consequentemente variações na temperatura, pressão e umidade. Essas mudanças produzem anomalias no índice de refração (TORGE, 2001).

Segundo Brunner (1984), os efeitos da refração são um problema muito antigo. Em 1826 Gauss derivou um valor de 0,13 para o coeficiente de refração das medições do ângulo vertical na rede geodésica de Hannover, e desde então muitas pesquisas foram realizadas, mais muito pouco desses trabalhos resultou em novos métodos práticos ou em novos instrumentos, tanto é que este valor é utilizado como uma boa aproximação até os dias de hoje.

Entender como o índice de refração se modifica é relevante, pois a maioria das medições geodésicas utilizam ondas eletromagnéticas e consequentemente são influenciadas por variações na temperatura, pressão e umidade. De acordo com a finalidade das medições e o comprimento de onda utilizado, correções precisam ser aplicadas, levando em conta os efeitos do meio, entre o instrumento e os pontos de interesse, pois esse meio altera a velocidade, a intensidade, a frequência e a direção da onda eletromagnética (BRUNNER, 1984).

Diferentes métodos foram desenvolvidos para eliminar ou reduzir os efeitos da refração atmosférica nas medições geodésicas. Estes incluem *design* de instrumentos, metodologia de observação e o uso de modelos atmosféricos baseados em dados coletados na superfície da Terra e no espaço (TORGE, 2001).

Esses dados podem ser obtidos por meio de medições meteorológicas, geralmente acompanhadas por alguma forma de modelagem matemática (BRUNNER, 1984).

2.3.2.1 Efeitos da Refração na medida da distância

Segundo o princípio de Fermat, também conhecido como princípio do menor tempo, uma onda eletromagnética ao percorrer um caminho entre dois pontos, o faz de forma que o tempo gasto, sob efeito da refração, seja mínimo, o que equivale a dizer também que é o menor percurso óptico. Lembrando que o conceito de percurso óptico é igual ao produto entre a distância percorrida e o índice de refração local, conforme expresso pela equação (10) (HECHT, 1991):

$$PO = \int_c n(s) ds \quad (10)$$

Onde:

- PO – Percurso óptico;
- $n(s)$ – Índice de refração, que é função da posição;
- $\int_c ds$ – Integral do caminho ao longo de uma trajetória;
- ds – Elemento infinitesimal de comprimento.

O índice de refração n pode ser relacionado com a velocidade $v(s)$ de acordo com o meio que ela percorre e pode ser escrito conforme a equação (11) (TORGE, 2001):

$$n(s) = \frac{c}{v(s)} \quad (11)$$

Onde:

- $n(s)$ – Índice de refração, que é função da posição;
- c é a velocidade da luz no vácuo (299 792 458 m/s);
- $v(s)$ velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio.

Dependendo do meio que a onda eletromagnética percorre o índice de refração varia (BRUNNER, 1984).

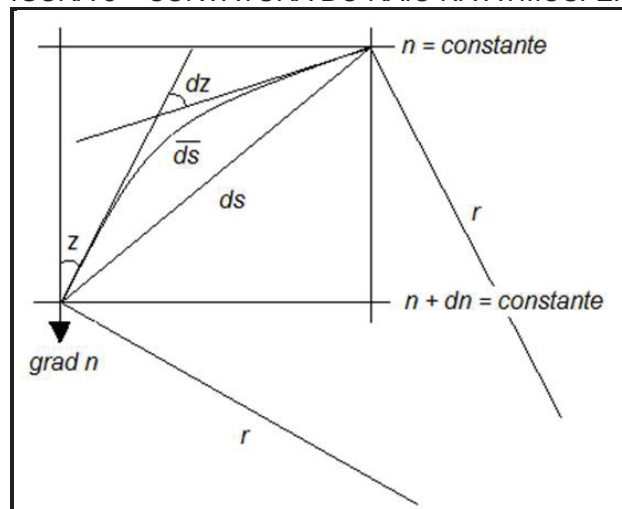
Definindo:

$$n(s) ds = \overline{ds} \quad (12)$$

Onde \overline{ds} é o comprimento real do caminho.

Resolver as equações (11) e (12) requer o conhecimento de n ao longo do caminho. Quando uma onda eletromagnética passa através de uma região de diferentes índices de refração, a trajetória da frente de onda se desvia da linha reta. Este fato ocorre devido as diferentes velocidades ao longo da frente da onda eletromagnética (TORGE, 2001). A FIGURA 8 demonstra como uma onda eletromagnética se comporta em um meio que possui um gradiente vertical do índice de refração, e como é a curvatura desse feixe ao longo do caminho.

FIGURA 8 – CURVATURA DO RAIOS NA ATMOSFERA



FONTE: Adaptada Torge (2001).

De acordo com a FIGURA 8, se existem camadas com diferentes índices de refração, a frente de onda sofrera um desvio, logo a trajetória apresentará uma curvatura, que pode ser côncava ou convexa, dependendo do gradiente do índice de refração (TORGE, 2001). Por exemplo, de acordo com Schaal (1995), em seu trabalho realizado na base USP, durante o período diurno a linha de visada apresentou uma curvatura côncava, implicando um aparente rebaixamento do alvo, como apresentado na FIGURA 6. Durante o período noturno apresenta curvatura convexa com raio de curvatura menor que o valor determinado por Gauss ($k=0,13$).

Todo esse efeito tem relação com a turbulência atmosférica e conseqüentemente com as variações de temperatura, press

O efeito da refração na distância é dado pela diferença entre o comprimento real do caminho \overline{ds} e o segmento de reta ds . Essa diferença de comprimento se deve ao maior tempo de viagem na atmosfera e ao efeito de curvatura da onda eletromagnética (TORGE, 2001).

2.3.2.2 Correções Básicas nas Observações de Distâncias

Conforme já mencionado, as medições eletrônicas de distância devem ser calculadas utilizando o índice de refração ao longo de todo o caminho. Isso poderia envolver a medição de temperatura, pressão e umidade em todo o percurso, para então encontrar o valor do índice de refração ao longo de todo o trajeto. Mas na prática, métodos simplificados baseados em medições de ponto específicos são geralmente adotados (RUGER, 1996).

Por esta razão, utilizam-se observações meteorológicas tomadas em um ou em ambos os terminais de uma linha, a qual pode representar muito bem o índice de refração. Para distâncias até uma centena de metros normalmente é medido parâmetros atmosféricos apenas no instrumento. Já para trajetos entre algumas centenas de metros a alguns quilômetros, ou quando for necessário maior rigor nas medidas, as condições meteorológicas são verificadas nos extremos da linha e a média pode ser usada para corrigir a distância medida. Como resultado disso, as variações de temperatura, pressão e umidade ao longo da linha são ignoradas e pequenos erros são introduzidos no processo devido a não linearidade das equações do índice de refração (RUGER, 1996).

Um das principais correções é a primeira correção da velocidade, seu equacionamento provém do rearranjo das equações (1) e (11), o qual determina a distância como:

$$s = \frac{c}{n(s)} \frac{\Delta t}{2} \quad (13)$$

Onde:

- s – Distância;

- c – Velocidade da luz no vácuo;
- Δt – Tempo de deslocamento da onda eletromagnética;
- $n(s)$ – Índice de refração ao longo do caminho.

Neste caso a distância ainda depende do índice de refração ao longo do caminho. Os fabricantes dos equipamentos estabelecem correções para um índice de refração fixo, chamado de índice de refração de referência (n_{ref}). Este valor é definido, conforme parâmetros ambientais específicos definidos em laboratório e a partir desses dados a medida de distância é corrigida, no próprio equipamento.

No entanto se as medições foram realizadas em condições ambientais distintas dessas, há necessidade de correção. Conforme equação (14), para obter o comprimento do caminho da onda exibido no equipamento, o valor $n(s)$ é substituído pelo valor do índice de refração de referência (n_{ref}).

$$s' = \frac{c}{n_{ref}} \frac{\Delta t}{2} \quad (14)$$

Onde:

- n_{ref} – Índice de refração de referência;
- c – Velocidade da luz no vácuo;
- s' – Distância medida pelo equipamento utilizando a correção devido à n_{ref} ;
- Δt – Tempo de deslocamento da onda eletromagnética.

Isolando a velocidade da luz no vácuo para as equações (13) e (14) pode-se escrever uma equação que se ajusta a variação das condições meteorológicas de referência, com as do momento da coleta, determinando uma distância corrigida, com a aplicação da primeira correção de velocidade, conforme equação (15):

$$s = \left(\frac{n_{ref}}{n} \right) s' \quad (15)$$

Onde:

- S – Distância aplicando a primeira correção de velocidade;
- s' – Distância medida pelo equipamento utilizando a correção devido a n_{ref} .

As primeiras correções de velocidade para medidores de distâncias eletromagnéticas são geralmente dadas em função de um K' , que é descrito como ($K' = s - s'$).

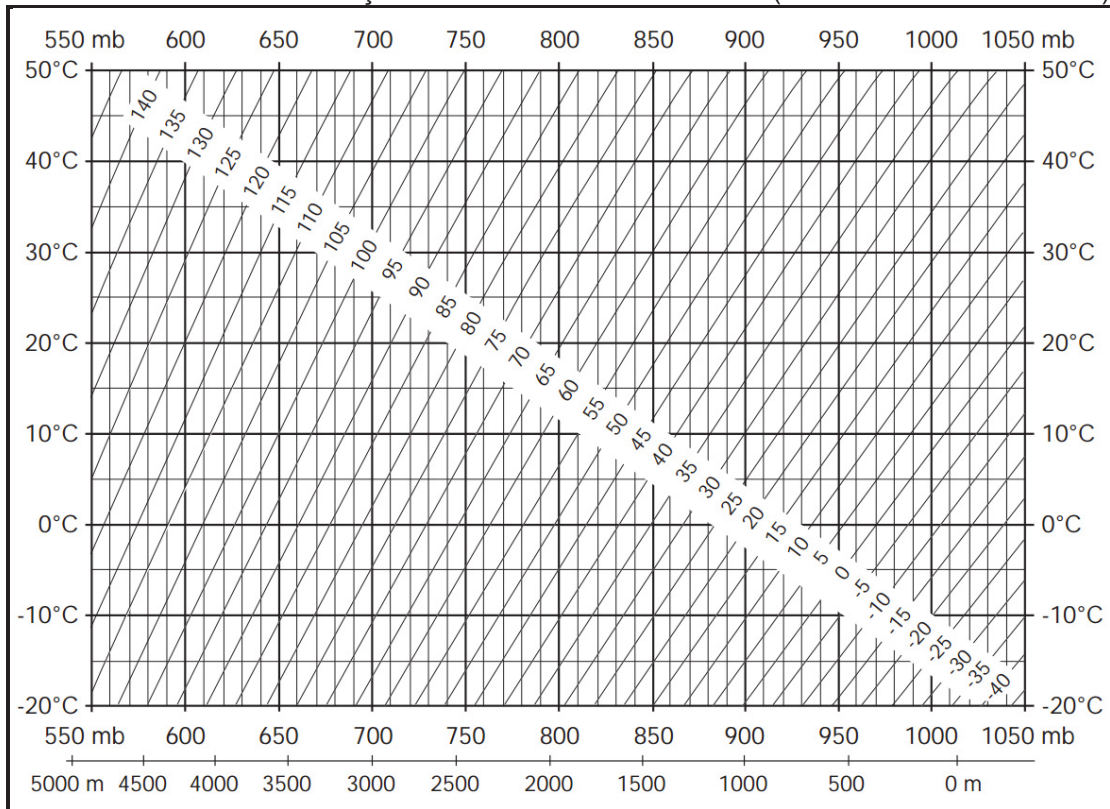
Essa função depende do fabricante do equipamento, mas serão derivadas da equação (16), onde os fatores C e D variam de acordo com o fabricante:

$$K' = \left[C \frac{D}{273,15+t} + \frac{11,27e}{273,15+t} 11,27e \right] 10^{-6} s' \quad (16)$$

Rüeger (1996), afirma que é possível corrigir estes erros também através da utilização do ábaco (FIGURA 9) ou da fórmula que acompanham o manual do equipamento (Equação 17), neste caso, as informações necessárias são a temperatura, pressão e umidade relativa, ou então através de fórmulas adotadas pela IUGG (União Internacional de Geodésia e Geofísica).

Em estudo de caso realizado por Veiga et al. (2012) demonstrou-se que a diferença entre os valores da correção obtida com o ábaco e com a equação disponível no manual do equipamento são inferiores ao milímetro, sendo assim, optou-se por utilizar a formulação que consta no manual da estação total TS15 (LEICA GEOSYSTEMS, 2015) (Equação 17):

FIGURA 9 – CORREÇÕES ATMOSFÉRICAS EM PPM (UMIDADE RELATIVA 60%)



FONTE: Leica geosystems (2015).

$$\Delta D_1 = 286,34 - \left[\frac{0,29525p}{1+\alpha t} - \frac{4,126 \cdot 10^{-4} h}{1+\alpha t} \cdot 10^x \right] \quad (17)$$

Onde:

- ΔD_1 – Correção atmosférica em PPM;
- p – Pressão em mbar ou hPa;
- t – Temperatura em °C;
- h – Umidade do ar em porcentagem;
- $\alpha = 1/273,15$;
- $x = \left(\frac{7,5 t}{237,3+t} \right) + 0,7857$

2.3.2.3 Efeito da Refração na curvatura da onda eletromagnética

O efeito de refração na curvatura pode ser estimado assumindo que a densidade do ar é variável. A lei de Snell descreve a flexão do raio ao passar por

camadas com índice de refração diferentes, que corresponde ao princípio de Fermat (TORGE, 2001):

$$n \operatorname{sen} z = \text{constante} \quad (18)$$

Onde:

z é o ângulo zenital.

Diferenciando a equação (18) tem-se:

$$\operatorname{sen} z \, dn + n \cos z \, dz = 0 \quad (19)$$

Com:

$$dn = (\operatorname{grad} n) \, ds = |\operatorname{grad} n| \cos z \, ds \quad (20)$$

Onde:

- dn – Valor da variação infinitesimal do índice de refração;
- ds – Elemento infinitesimal de comprimento;
- $\operatorname{grad} n$ – Gradiente do índice de refração;
- z – Ângulo zenital.

Obtendo a curvatura

$$\frac{1}{r} = \frac{dz}{ds} = -\frac{|\operatorname{grad} n|}{n} \operatorname{sen} z \quad (21)$$

Onde r é o raio de curvatura do feixe.

Ao separar o componente horizontal e vertical do gradiente de n , é possível obter a curvatura do raio projetada nos planos horizontal e vertical. Os efeitos correspondentes nos ângulos horizontal e vertical são chamados de refração horizontal (lateral) e vertical, respectivamente (TORGE, 2001).

2.3.2.4 Refração Horizontal e Vertical

O ângulo de refração depende do coeficiente de refração e, portanto, das condições atmosféricas ao longo do caminho. A principal fonte de erro da medição dos ângulos é a turbulência atmosférica, por isso a necessidade de se conhecer principalmente o gradiente vertical de temperatura (TORGE, 2001).

A refração horizontal é de uma a duas ordens de grandeza menor que a refração vertical. Se não for considerado o efeito da curvatura horizontal a equação pode ser simplificada de acordo com a equação (22).

$$\frac{1}{r} = -\frac{1}{n} \frac{dn}{dh} \operatorname{sen} z \quad (22)$$

Onde:

- r – raio de curvatura do feixe
- dn – Valor da variação infinitesimal do índice de refração;
- dh – Valor da variação infinitesimal da altura;
- z – Ângulo zenital.

Em vez de $1/r$, o coeficiente de refração k é frequentemente usado. É definido como a razão entre o raio da terra R e o raio de curvatura r . De acordo com equação (23), tem-se:

$$k = \frac{R}{r} = -R \frac{dn}{dh} \quad (23)$$

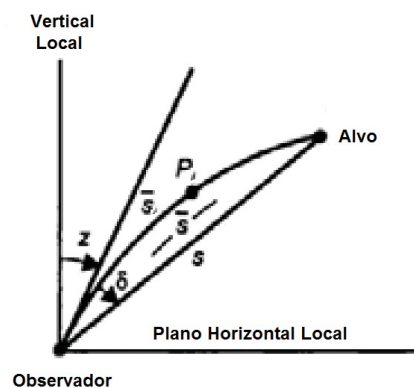
Onde:

- k – Coeficiente de refração ou índice de refração vertical;
- R – Raio da terra;
- r – raio de curvatura do feixe;
- dn – Valor da variação infinitesimal do índice de refração;
- dh – Valor da variação infinitesimal da altura;

O ângulo de refração vertical δ é o efeito da refração nos ângulos zenitais observados (FIGURA 10). Resulta da integração de $1/r$, e dn/dh ao longo do caminho:

$$\delta = \frac{1}{s} \int_0^s (s - s_i) \frac{dn}{dh} ds \quad (24)$$

FIGURA 10 – REFRAÇÃO VERTICAL



FONTE: Adaptado Torge (2001).

O gradiente vertical local de n é considerado de acordo com a distância do observador, valores de distâncias mais próximas recebem um peso maior. Para um arco esférico ($r = \text{constante}$), e considerando as equações (23) e (24) (TORGE, 2001):

$$\delta = \frac{k}{2R} s \quad (25)$$

Onde

- δ – Ângulo de refração vertical;
- k – coeficiente de refração;
- R – Raio da terra;
- s – Distância.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na Usina Hidrelétrica Governador Jayme Canet Júnior, anteriormente chamada de Usina Hidrelétrica Mauá, entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba, no estado do Paraná, a aproximadamente 300 km da capital paranaense, Curitiba (FIGURA 11). A barragem fica na região do Salto Mauá, no rio Tibagi, 600 metros a montante da já existente Usina Presidente Vargas. Pertencentes ao Consórcio Energético Cruzeiro do Sul, constituído em parte pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e pela Eletrosul Centrais Elétricas S/A, duas estatais do setor elétrico (COPEL, 2018).

FIGURA 11 – LOCALIZAÇÃO USINA HIDRELÉTRICA GOVERNADOR JAYME CANET JUNIOR



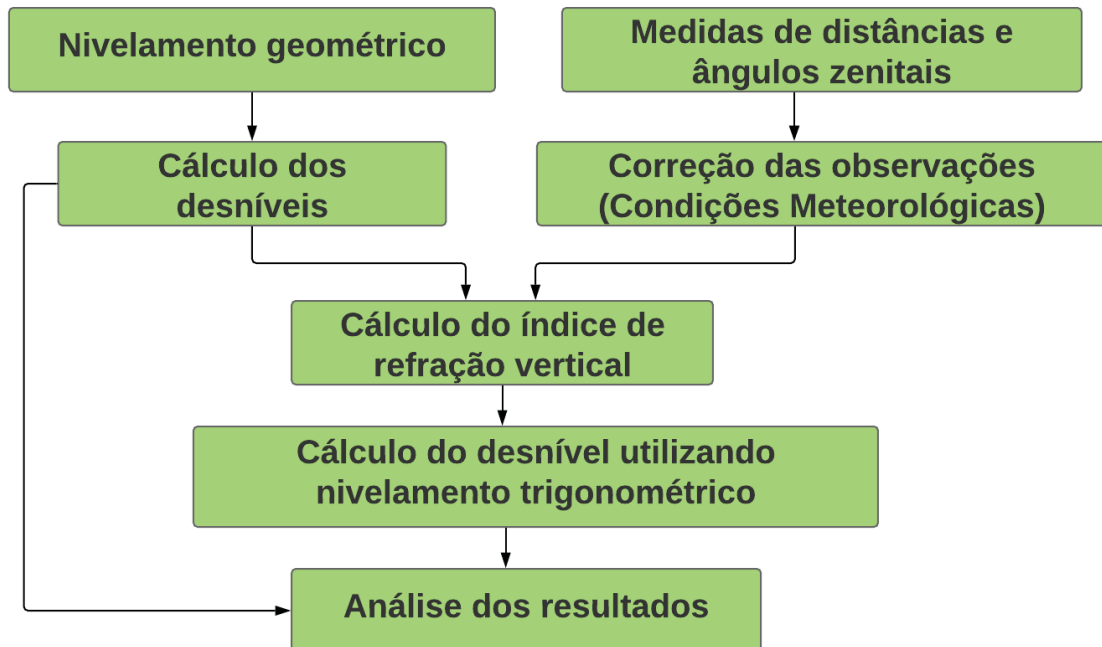
FONTE: SIGUEL (2013).

3.2 METODOLOGIA

Um fluxograma com a metodologia aplicada no desenvolvimento deste trabalho é apresentado na FIGURA 12. Todas as etapas serão seguidas visando

calcular e analisar o efeito da refração atmosférica no eixo vertical, para a determinação dos desníveis da barragem da Usina Hidrelétrica.

FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DE TRABALHO

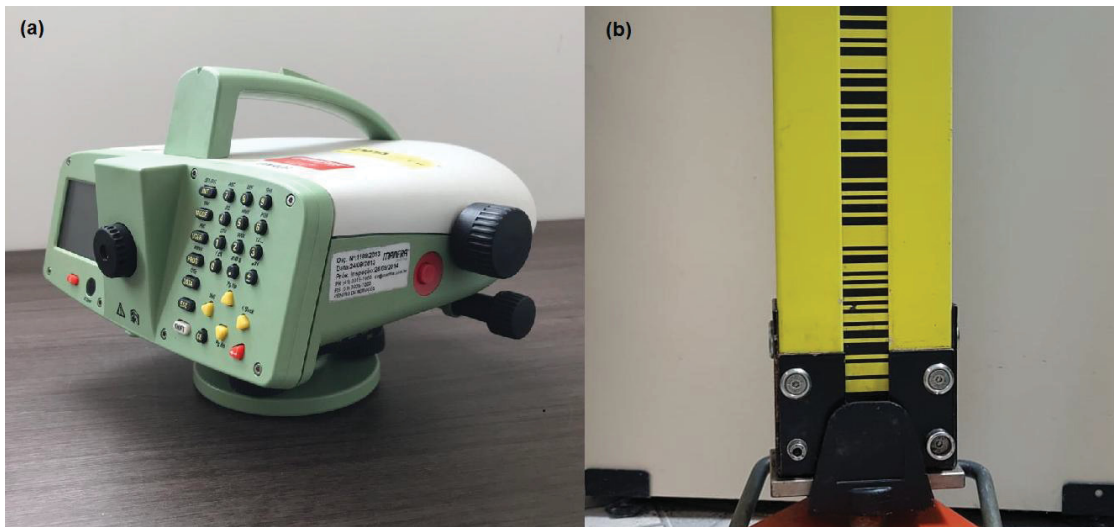


FONTE: Autora (2019).

3.2.1 Equipamentos Utilizados

Os dados de nivelamento geométrico foram obtidos com o nível digital Leica DNA03 (FIGURA 13 (a)), capaz de realizar medições eletronicamente com um desvio padrão de $\pm 0,3$ mm/km para duplo nivelamento, quando utiliza a mira de ínvar gravada em código de barras (FIGURA 13 (b)). Este equipamento é considerado adequado para levantamentos de primeira ordem e trabalhos de alta precisão, tendo alcance entre 1,8 m a 110 m para medições eletrônicas. Opera entre -40°C a 70°C e possui sensibilidade do nível esférico de $8'/2$ mm (LEICA GEOSYSTEMS, 2006).

FIGURA 13 – SISTEMA DE NIVELAMENTO DIGITAL LEICA DNA03



FONTE: Autora (2019).

Juntamente com o conjunto de nível e mira, faz-se necessário durante o caminhamento à utilização de sapatas, de modo a garantir que o mesmo ponto seja ocupado na leitura de ré e vante. Conforme FIGURA 3.

Para o levantamento das direções horizontais, ângulos verticais e distâncias inclinadas, utilizou-se a Estação Total TS15, conforme FIGURA 14, ela possui a capacidade de realizar leituras de forma automática, através da função de reconhecimento automático de alvos (ATR®), um sistema de detecção do prisma.

FIGURA 14 – ESTAÇÃO TOTAL TS15



FONTE: Autora (2019).

As principais características técnicas deste instrumento são:

- Precisão da medida angular: 1”;
- Precisão na medida da distância: 1 mm + 1,5 ppm (LEICA GEOSYSTEMS, 2015).

Juntamente com a estação total, utilizam-se prismas (FIGURA 15), modelo GPR111, que auxiliam a visualização de todos os pontos situados na crista da barragem, que estão localizados a montante do barramento, conforme FIGURA 21.

FIGURA 15 – PRISMA CIRCULAR GPR 111



FONTE: Autora (2019).

As medições de temperatura, pressão atmosférica e umidade foram efetivadas por uma estação meteorológica portátil, denominada Data Logger, cuja precisão na medida da pressão é 0,25%, da temperatura é de 1 °C e de umidade relativa 5% (FIGURA 16).

FIGURA 16 – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA



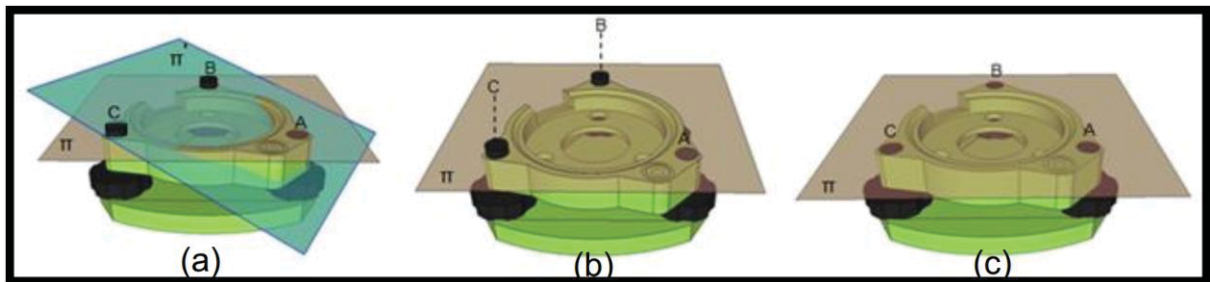
FONTE: Autora (2018).

3.2.2 Preparação para Levantamento de Campo

Para minimização de erros grosseiros na coleta dos dados, utilizaram-se bases com alturas fixas, onde um dos parafusos calantes foi travado, de forma que ao realizar o nivelamento, utilizam-se apenas dois parafusos e a altura do plano horizontal fica definida em função da posição do parafuso fixo.

Na FIGURA 17(a) é possível verificar que o parafuso calante (A) está travado e pertence a um plano π' , formado por (A), (B) e (C) que estão desnivelados entre si. Na FIGURA 17(b) movimenta-se os parafusos (B) e (C) de forma que os três pontos (A), (B) e (C) formem um novo plano π , conforme FIGURA 17(c) onde os três pontos pertencem ao mesmo plano e estão nivelados entre si.

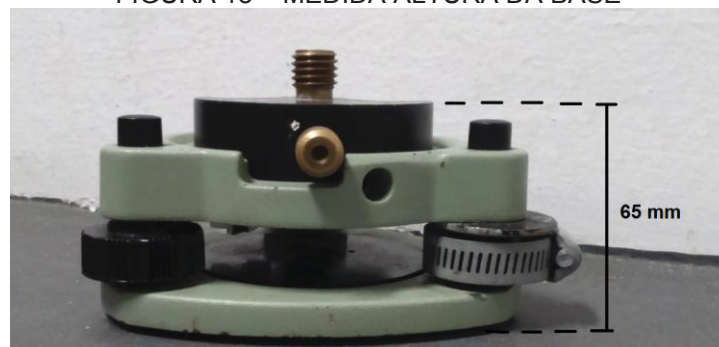
FIGURA 17 – (A) BASE NIVELANTE FORA DE NÍVEL E OS PLANOS π E π' . (B) BASE NIVELANTE SENDO NIVELADA E O PLANO π . (C) BASE NIVELADA E OS PONTOS A, B E C PERTENCENTES AO PLANO π



FONTE: Siguel (2013).

Para garantir a altura fixa do conjunto de bases nivelantes, abraçadeiras foram instaladas para impedir o acesso a um dos parafusos (FIGURA 18), realiza-se esse procedimento de forma que todas as bases estejam com a mesma altura. Uma vez fixos, verifica-se a altura das bases com o auxílio de um paquímetro (FIGURA 18).

FIGURA 18 – MEDIDA ALTURA DA BASE



FONTE: Autora (2019).

Além da fixação da altura das bases, antes da coleta dos dados na usina, a estação total TS15 foi verificada e possíveis erros instrumentais foram corrigidos.

Estes erros são os seguintes (LEICA GEOSYSTEMS, 2015):

- Erro de índice do compensador;
- Erro de índice vertical;
- Erro de colimação;
- Erro de inclinação do eixo secundário;
- Erro do ATR® para as direções horizontal e ângulos vertical.

3.2.3 Levantamento de Campo

3.2.3.1 Nivelamento trigonométrico

O levantamento foi realizado no dia 11 de julho de 2019 e iniciou-se posicionando a estação total em três pontos diferentes, conforme FIGURA 19, dois deles a montante do barramento e um a jusante. O marco denominado Pilar 01 situa-se na margem direita, o marco Pilar 02, situado também a montante, na margem esquerda e o Pilar 03 encontra-se a jusante do barramento.

Esses pontos são materializados por meio de pilares da rede geodésica de monitoramento, que foram construídos antes mesmo da finalização da construção da barragem. Para garantir a estabilidade, os pilares foram construídos de forma que sua fundação alcance as rochas da região.

FIGURA 19 – PONTOS ONDE FORAM REALIZADOS OS LEVANTAMENTOS

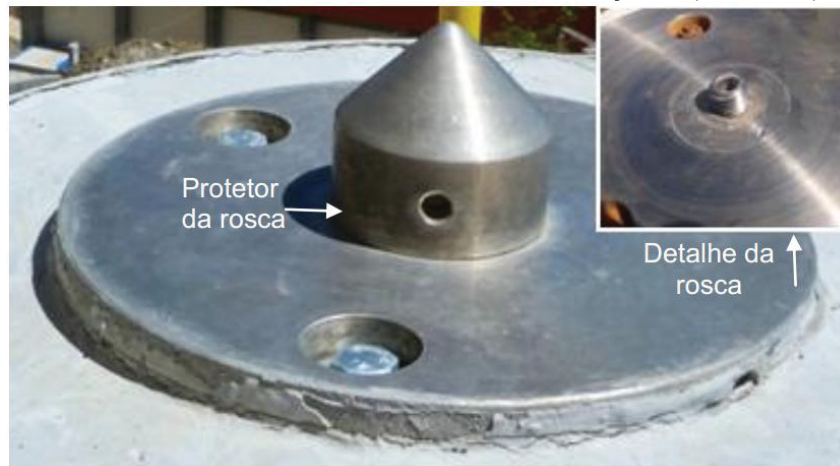


FONTE: Adaptado Google Earth (2019).

Todos os pilares são dotados de um sistema de centragem forçada que serve para materializar os pontos de referência, onde existe uma rosca padrão 5/8" compatível com equipamentos geodésicos. De forma a garantir a reocupação das mesmas posições em épocas diferentes de monitoramento. De acordo com Nadal (2000), a estimativa da repetibilidade na reocupação é da ordem do décimo de milímetro.

Conforme FIGURA 20 o dispositivo consiste em uma placa circular de alumínio que é fixada sobre o Pilar por meio de parafusos. No centro desta placa há uma rosca que permite a fixação do instrumento utilizado para as observações.

FIGURA 20 – SISTEMA DE CENTRAGEM FORÇADA (PILARES)



FONTE: Siguel (2012).

Para realizar o levantamento foi necessário identificar todos os pontos que seriam monitorados e então a partir desses dados, elaborar um croqui organizando a sequência de trabalho.

Os pontos monitorados da crista são identificados conforme FIGURA 21, e seguem a sequência de nomenclatura, ponto 01, MSU 01 (marco de superfície 01), ponto 02, MSU 02 e assim por diante, da direita para a esquerda até o MSU 17.

FIGURA 21 – PONTOS MONITORADOS



FONTE: Adaptado Google Earth (2019).

Todos os pontos situados na crista foram ocupados com o auxílio do prisma e pinos, como na FIGURA 22.

FIGURA 22 – MATERIALIZAÇÃO DOS PONTOS NA CRISTA



FONTE: Autora (2019).

Após todos os prismas estarem instalados nos 17 pontos, realizaram-se seis séries de leituras, em pontaria direta e inversa da luneta (PD, PI), o primeiro como forma de orientação para o sistema de reconhecimento automático de alvos e os demais de forma automática pelo equipamento TS15.

O levantamento dos pontos materializados pelos prismas consiste em instalar a estação Total TS15 no Pilar 01 (FIGURA 23) realizar a orientação inicial no Pilar 02 e na sequência em todos os 17 pontos situados na crista. O mesmo foi realizado com o equipamento instalado no Pilar 02, com a orientação feita no Pilar 01 e na sequência os 17 pontos MSU's localizados na crista.

FIGURA 23 – INSTALAÇÃO ESTAÇÃO TOTAL NO PILAR



FONTE: Autora (2019).

Todas as informações foram gravadas automaticamente pelo equipamento. Ressalta-se que como a estação total em conjunto com a base e os prismas e seus pinos possuem alturas fixas (Conforme descrito na TABELA 6) não foi necessário medir suas respectivas alturas em campo.

3.2.3.2 Nivelamento geométrico

O nivelamento geométrico foi executado seguindo todas as recomendações contidas nas especificações e normas para levantamentos geodésicos do IBGE (item 2.2.1.1). A sequência de trabalho iniciou-se no Pilar 01, localizado na margem direita, á montante do barramento, com a mira de invar apoiada em cima do parafuso de centragem forçada, passando pelo referencial de nível (RN) 5, que está localizado ao lado do Pilar 01 (FIGURA 24) e então realizou-se o caminhamento até o Pilar 03, utilizando o método de leitura da mira ré, vante, vante, ré para o cálculo do desnível. Os pontos auxiliares foram materializados com o auxílio das sapatas, terminando novamenete com a mira apoiada em cima do parafuso de centragem forçada (FIGURA 25) do Pilar 03.

FIGURA 24 – REFERENCIAL DE NÍVEL UHE



FONTE: Autora (2019).

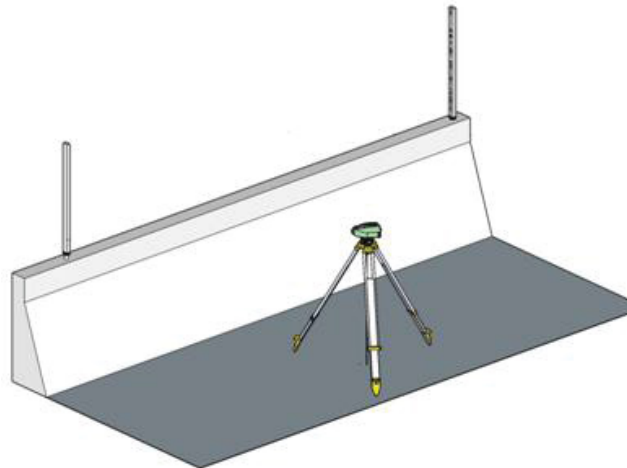
FIGURA 25 – POSICIONAMENTO DA MIRA NOS PILARES



FONTE: Autora (2019).

O nivelamento do Pilar 01 ao Pilar 02 foi realizado de forma que no caminhamento os pontos situados na crista fossem visados (Conforme FIGURA 26). Com isso foi possível calcular o desnível de forma independente do Pilar 01 para todos os 17 pontos MSU's localizados na crista do barramento.

FIGURA 26 – POSICIONAMENTO DA MIRA NOS MSU'S



FONTE: Veiga (2019).

Novamente esses pontos foram materializados em cima da rosca de centragem forçada, logo foi preciso medir a altura das roscas, de forma que todos os desníveis tivessem como referência a base da rosca. Conforme FIGURA 27 essas medidas foram realizadas com o auxílio de um paquímetro e constam na TABELA 5.

FIGURA 27 – MEDIDA ALTURA ROSCA NOS PONTOS MSU'S

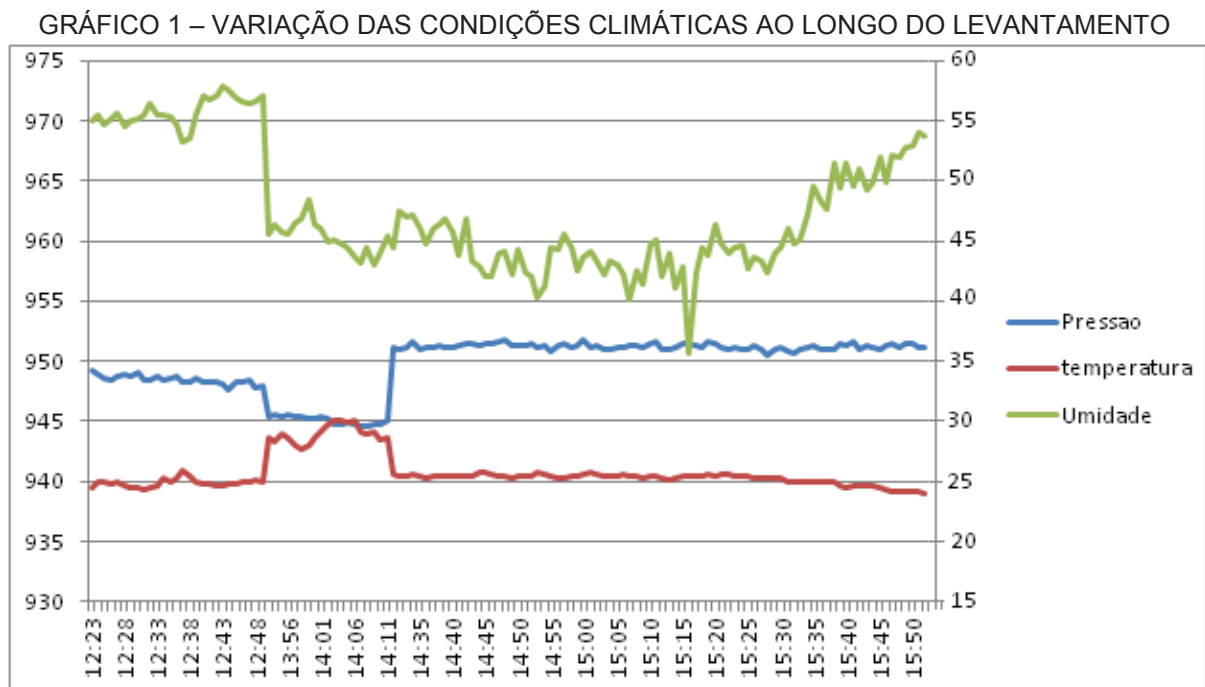


FONTE: Autora (2019).

3.2.4 Processamento dos dados

Após o levantamento de campo utilizando a estação total (nivelamento trigonométrico), os dados observados precisam ser transferidos para um computador, onde é possível visualizar as leituras realizadas das direções horizontais, dos ângulos zenitais, bem como das distâncias inclinadas que foram gravadas na memória do instrumento. Com o auxílio do software bloco de notas é possível abrir o arquivo, que tem formato TXT e organiza-lo em um software de edição de planilhas.

No mesmo instante da realização das medições com a estação total, efetuou-se o levantamento das condições atmosféricas, utilizando o equipamento Data Logger. Ele registra a temperatura, pressão e umidade relativa, com intervalos de um minuto. Conforme GRÁFICO 1 é possível verificar as variações dessas condições ao longo do levantamento, que nesse caso corresponde ao dia 11 de julho de 2019.



FONTE: Autora (2019)

Observando o GRÁFICO 1 é possível verificar as variações dessas condições atmosféricas durante o levantamento, por exemplo, a pressão varia de 944,7 á 951,7 mbar, já a temperatura que tem a maior contribuição no efeito da refração, varia de 24°C á 30,1°C e a umidade fica entre 35,6 e 57,8 %. Essas

variações podem produzir correções da ordem de 35 ppm, logo podem corrigir a medida de distância nesse levantamento em aproximadamente 26mm.

Conhecendo as variações dos parâmetros atmosféricos é possível calcular as correções das distâncias. A primeira correção da velocidade dada pela equação (17), pode ser aplicada utilizando um editor de planilhas, através da correspondência do horário da realização do levantamento, com o horário na planilha de registro das condições atmosféricas.

Todas essas informações são organizadas em forma de tabela (conforme TABELA 2). São apresentados os dados a partir do Pilar 01, com as informações de direções horizontais (destacado em Azul) e ângulos zenitais (destacado em verde) e seus respectivos valores de desvio padrão. Os valores de distâncias inclinada bruta e o horário da realização das medidas identificados pela cor roxa. As condições ambientais registradas pelo equipamento, Data Logger correspondem às três colunas abaixo da indicação de parâmetros atmosféricos e ao final as distâncias corrigidas por meio da equação (17) (primeira velocidade) e os valores de desvio padrão dessas medidas na cor azul claro.

TABELA 2 – DADOS BRUTOS ESTAÇÃO TS15

Pontos	HZ					HV					Distância bruta				Par. atmosféricos				Distância corrigida			
	°	'	“	°	′	″	°	′	″	°	′	″	DI	HORA	Pres (mbar)	Temp (°C)	Umid	DI Corrigida (m)	Média (m)	Desvio Padrão (m)		
P2	9	40	53	89	9	12	270	50	47	89	9	12	757.893	12:38:54	949.2	24.5	55	757.9156	757.9162			
P2	189	40	53	270	50	47	89	9	12	270	50	48	757.894	12:48:17	948.8	24.7	55.5	757.9168				
P2	9	40	55	89	9	12	270	50	48	89	9	12	757.893	12:49:55	948.5	25.3	55.4	757.9163	757.9165			
P2	189	40	51	270	50	48	89	9	12	270	50	45	757.893	12:52:34	948.2	25.9	53.3	757.9167				
P2	9	40	54	89	9	12	270	50	45	89	9	14	757.893	12:52:44	948.2	25.9	53.3	757.9167	757.9164			
P2	189	40	52	270	50	45	89	9	14	270	50	49	757.893	12:55:22	948.3	24.8	57	757.9160		0.0002		
P2	9	40	50	89	9	14	270	50	49	89	9	13	757.893	12:58:11	948.1	24.7	57.8	757.9160	757.9160			
P2	189	40	56	270	50	49	89	9	13	270	50	49	757.893	12:58:20	948.1	24.7	57.8	757.9160				
P2	9	40	49	89	9	13	270	50	49	89	9	11	757.893	13:01:07	948.3	25	56.6	757.9161	757.9160			
P2	189	40	52	270	50	49	89	9	11	270	50	49	757.893	13:01:16	948.3	25	56.6	757.9161				
P2	9	40	52	89	9	11	270	50	49	89	9	11	757.893	13:04:00	947.9	25	57	757.9162	757.9162			
P2	189	40	51	270	50	49	89	9	11	270	50	49	757.893	13:04:00	947.9	25	57	757.9162				
MSU15	16	3	47	90	23	24	269	36	38	90	23	24	627.364	12:45:59	949	24.5	55.2	627.3827	627.3823			
MSU15	196	3	52	269	36	38	90	23	27	269	36	38	627.363	12:47:14	948.4	24.5	56.5	627.3818				
MSU15	16	3	51	90	23	27	269	36	33	90	23	27	627.363	12:51:03	948.7	25.2	54.6	627.3822	627.3827			
MSU15	196	3	59	269	36	33	90	23	27	269	36	33	627.364	12:51:29	948.7	25.2	54.6	627.3832				
MSU15	16	3	53	90	23	27	269	36	34	90	23	27	627.363	12:53:49	948.3	25.5	53.6	627.3824	627.3822			
MSU15	196	3	52	269	36	34	90	23	32	269	36	34	627.363	12:54:15	948.6	25	55.5	627.3821		0.0004		
MSU15	16	3	49	90	23	32	269	36	32	90	23	32	627.363	12:56:38	948.2	24.8	56.8	627.3820	627.3820			
MSU15	196	3	54	269	36	33	90	23	33	269	36	33	627.363	12:57:04	948.2	24.7	57.1	627.3820				
MSU15	16	3	58	90	23	27	269	36	35	90	23	27	627.363	12:59:30	947.7	24.8	57.5	627.3821	627.3821			
MSU15	196	3	51	269	36	35	90	23	30	269	36	35	627.363	12:59:55	947.7	24.8	57.5	627.3821				
MSU15	16	3	57	90	23	30	269	36	30	90	23	30	627.363	13:02:25	948.5	25	56.4	627.3821	627.3821			
MSU15	196	3	53	269	36	35	90	23	30	269	36	35	627.363	13:02:51	948.5	25	56.4	627.3821				

FONTE: Autora (2019).

Por meio desse conjunto de dados é possível verificar a existência de variações e nas direções horizontais e ângulos verticais entre um par conjugado (PD e PI) da mesma série, variações que vão de 4" à 12" e desvio padrão de 0,7" à 2,2".

Com as distâncias corrigidas o cálculo das projeções das distâncias horizontal e vertical pode ser realizado conforme equação (4) e (5) e em seguida é possível calcular as médias de todas as séries.

Para o nivelamento geométrico, os dados podem ser organizados em forma de caderneta de campo em um software de edição de planilhas (FIGURA 28), onde no cabeçalho encontram-se informações como a data de realização do levantamento, operador, equipamento utilizado e a linha (se é nivelamento ou contra nivelamento). Em seguida, na coluna destacada em preto seguem os dados dos pontos visados, por exemplo, do RN 05 até o Pilar 03, mas como eles são distantes, pontos auxiliares foram utilizados, seguindo as recomendações contidas no item 2.2.1.1. .

Na coluna destacada em azul é possível saber a distância ente o equipamento e a mira a ré e a vante. Na coluna destacada em vermelho é o valor que o equipamento mede na mira observada à ré e a vante. Logo o desnível entre os dois pontos será o valor medido em ré menos o valor medido em vante que corresponde à coluna destacada em verde. Após a montagem desta planilha o cálculo do desnível entre os pilares pode ser obtido por meio da soma de todos os desníveis entre esses pontos intermediários da linha de nivelamento e contra nivelamento.

FIGURA 28 – CADERNETA DE CAMPO NIVELAMENTO

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Projeto:	Nível: DNA03		Linha: Nivelamento				Projeto:	Nível: DNA03		Linha: contra nivelamento		
2	Município:	RN a RN: RN5 - P3						Município:	RN a RN: P3 - RN5				
3	Data: 11/07/2019	Operador: Wander						Data: 11/07/2019	Operador: Wander				
4	Ponto visado	Distância		Fio Nivelador		Desnível		Ponto visado	Distância		Fio Nivelador		Desnível
5	(Mira)	Ré	Vante	Ré	Vante	R - V		(Mira)	Ré	Vante	Ré	Vante	R - V
6	RN05							P3					
7		3.83	4.48	0.55837	2.5652	-2.00683			14.26	14	1.74887	0.45671	1.29216
8	AUX1							AUX1					
9	AUX1							AUX1					
10		19.68	19.62	1.05551	2.79633	-1.74082			11.34	11.32	2.56951	0.3599	2.20961
11	AUX2							AUX2					
12	AUX2							AUX2					
13		13.6	13.95	0.30945	2.79862	-2.48917			11.47	11.56	2.6486	0.30036	2.34824
14	AUX3							AUX3					
15	AUX3							AUX3					
16		14.2	13.9	0.43202	2.73357	-2.30155			12.22	12.71	2.80344	0.34309	2.46035
17	AUX4							AUX4					
18	AUX4							AUX4					
19		13.15	13.55	0.44054	2.71325	-2.27271			12.84	12.59	2.75122	0.4103	2.34092
20	AUX5							AUX5					
21	AUX5							AUX5					
22		13.86	12.96	0.29403	2.75529	-2.46126			13.14	13.57	2.67846	0.50004	2.17842
23	AUX6							AUX6					
24	AUX6							AUX6					
25		13.16	13.99	0.2848	2.87235	-2.58755			12.89	12.94	2.59907	0.45253	2.14654
26	AUX7							AUX7					

FONTE: Autora (2019).

Esse procedimento foi realizado em diversas campanhas e apresentam valores de erro cometido menores que os valores de erro permitido em todas as seções.

Após o cálculo dos desníveis geométricos, método visadas iguais (que nesse caso foi utilizado como referência ou padrão, por minimizar os efeitos da refração), uma planilha é organizada com os respectivos valores, conforme TABELA 3. Os desníveis entre o Pilar 03 e Pilar 02 foram realizados em junho de 2019 especificamente para esse trabalho. Na TABELA 4, são apresentados os desníveis entre os pilares 01 e 02 e os 17 pontos MSU's situados na crista do barramento. Esses dados de nivelamento geométrico de diversas campanhas, são provenientes de trabalhos realizados anteriormente pelo grupo de pesquisa, logo foram coletados em diversos períodos do ano e consequentemente em diferentes de estações do ano. Conforme descritos no QUADRO 1.

QUADRO 1 – CAMPANHAS REALIZADAS E PONTOS MONITORADOS

Campanhas	Data	Desnível
1º	30/03/2012	Pilar 01, todos os MSU's e Pilar 02
2º	06/06/2012	Pilar 01, todos os MSU's e Pilar 02
3º	17/07/2012	Pilar 01, todos os MSU's e Pilar 02
4º	09/08/2012	Pilar 01, todos os MSU's e Pilar 02
5º	04/09/2012	Pilar 01, todos os MSU's e Pilar 02
6º	08/11/2012	Pilar 01, todos os MSU's e Pilar 02
7º	25/06/2013	Pilar 01, todos os MSU's e Pilar 02
9º	31/03/2014	Pilar 01, todos os MSU's e Pilar 02
10º	10/09/2014	Pilar 01, todos os MSU's e Pilar 02
11º	17/12/2014	Pilar 01, todos os MSU's e Pilar 02
12º	30/03/2015	Pilar 01, todos os MSU's e Pilar 02
14º	28/10/2018	Pilar 01, todos os MSU's e Pilar 02
15º	11/07/2019	Pilar 01 e Pilar03

FONTE: Autora (2019).

TABELA 3 – DESNÍVEL GEOMÉTRICO ENTRE PILAR 02 E PILAR 03

Linha	1ª campanha - Jun/19
	Desnível (mm)
PILAR03 - PILAR02	65.878,850

FONTE: Autora (2019).

TABELA 4 – DESNÍVEIS GEOMÉTRICO ENTRE PILAR 01 E PILAR 02

Linha	Mar/12 (mm)	Jun/12 (mm)	Jul/12 (mm)	Ago/12 (mm)	Set/12 (mm)	Mar/12 (mm)	Jun/13 (mm)	Abril/14 (mm)	Set/14 (mm)	Dez/14 (mm)	Mar/15 (mm)	Out/18 (mm)
Pilar01 - RN05	-1259.645	-1259.765	-1259.780	-1259.805	-1259.845	-1259.730	-1259.695	-1259.700	-1259.900	-1259.600	-1259.850	-1259.810
RN05 - SMU01	-2844.590	-2844.320	-2844.550	-2844.145	-2844.335	-2844.070	-2844.050	-2844.450	-2844.200	-2844.000	-2844.250	-2844.485
MSU01 - MSU02	-3.525	-3.705	-3.910	-3.650	-3.555	-3.240	-3.840	-3.500	-4.050	-3.200	-3.350	-3.405
MSU02 - MSU03	-1.340	-1.510	-2.245	-2.360	-2.160	-1.305	-1.785	-2.300	-2.500	-2.300	-1.850	-2.675
MSU03 - MSU04	-1.900	-2.160	-2.495	-3.005	-2.995	-3.075	-3.215	-2.850	-3.400	-3.450	-3.400	-3.655
MSU04 - MSU05	1.725	1.800	1.520	1.445	1.375	1.015	1.135	1.200	2.100	2.500	0.800	0.770
MSU05 - MSU06	1.110	0.670	0.535	0.555	0.615	0.200	0.120	0.250	0.450	0.350	0.400	0.400
MSU06 - MSU07	-4.885	-5.210	-5.260	-5.170	-5.040	-4.910	-4.950	-5.650	-5.350	-5.500	-6.800	-5.650
MSU07 - MSU08	0.445	0.225	0.475	0.340	0.510	0.905	0.760	0.600	0.450	0.550	0.750	0.660
MSU08 - MSU09	-0.330	-0.720	-0.885	-0.765	-0.715	-1.120	-1.990	-1.750	-1.950	-2.000	-2.600	-2.595
MSU09 - MSU10	4.240	4.390	4.350	4.495	4.435	3.885	3.705	3.450	3.450	3.150	3.300	3.420
MSU10 - MSU11	3.845	3.610	3.675	3.410	3.405	3.470	3.390	3.500	3.400	3.350	3.500	3.600
MSU11 - MSU12	-3.655	-3.125	-3.125	-3.285	-3.450	-3.410	-2.615	-2.900	-1.450	-2.350	-2.550	-1.470
MSU12 - MSU13	-0.825	-0.645	-0.485	-0.635	-0.655	-1.005	-0.915	-0.650	-0.600	-1.200	-0.900	-0.290
MSU13 - MSU14	5.215	5.575	5.980	5.605	5.515	5.005	5.190	6.200	6.050	7.800	6.450	6.815
MSU14 - MSU15	-2.860	-2.410	-2.065	-1.710	-1.755	-2.205	-1.920	-1.300	-1.450	-1.350	-1.550	-1.910
MSU15 - MSU16	1.830	2.300	2.450	2.395	2.420	2.325	2.475	2.450	2.500	2.800	2.800	3.125
MSU16 - MSU17	-2.150	-2.235	-2.040	-2.055	-2.100	-2.155	-1.945	-2.200	-1.950	-2.150	-1.850	-1.755
MSU17 - Pilar02	15403.89	15403.47	15404.23	15403.21	15403.19	15403.09	15402.59	15403.50	15403.65	15397.45	15403.55	15403.61
Pilar01 – Pilar02	11296.59	11296.23	11296.37	11294.87	11294.86	11293.67	11292.44	11293.90	11295.25	11290.85	11292.60	11294.70

FONTE: Autora (2019).

Após calcular todos os desníveis geométricos é preciso reduzi-los a base da rosca, logo todas as roscas foram medidas com o auxílio de um paquímetro (FIGURA 27) e organizados em forma de tabela (TABELA 5).

TABELA 5 – ALTURA DA ROSCA (H_r)

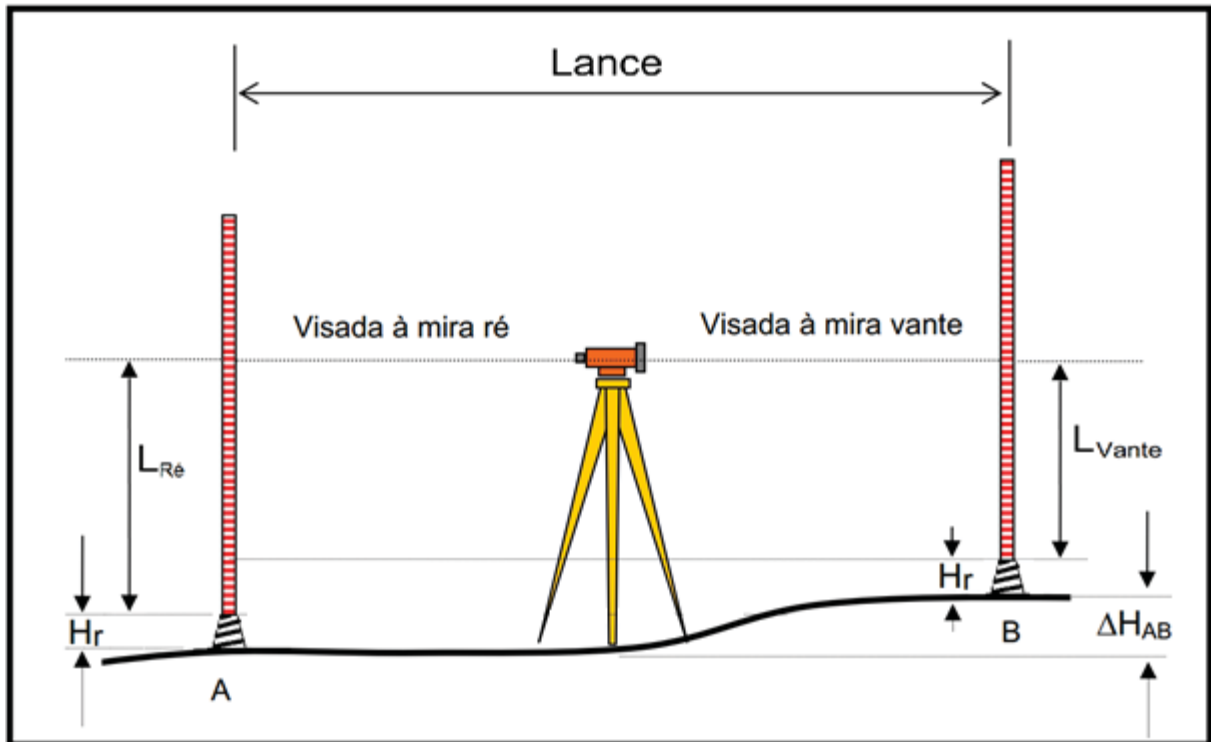
Pinos	(mm)
Pilar 01	10.98
MSU01	14.01
MSU02	14.06
MSU03	13.27
MSU04	13.70
MSU05	13.78
MSU06	13.43
MSU07	13.98
MSU08	13.38
MSU09	11.00
MSU10	14.53
MSU11	14.17
MSU12	13.35
MSU13	13.80
MSU14	13.55
MSU15	13.96
MSU16	14.09
MSU17	13.48
Pilar 02	10.86
Pilar 03	10.83

FONTE: Autora (2019).

Conhecendo os desníveis e a altura das roscas é possível corrigi-los com a soma e subtração da altura das respectivas roscas pertencentes ao lance em questão, conforme FIGURA 29, o valor do desnível reduzido à base da rosca será:

$$\Delta H_{AB \text{ reduzido}} = L_{r\acute{e}} + H_{r \acute{e}} - L_{Vante} - H_{r Vante} \quad (26)$$

FIGURA 29 – DESNÍVEL REDUZIDO A BASE DA ROSCA



Fonte: Adaptado Veiga et al. (2012).

Os valores dos desníveis agora reduzidos a base da rosca, podem ser aplicados na equação (8), proveniente do nivelamento trigonométrico. A partir dos dados de altura do instrumento, altura do sinal e distância inclinada é possível reescrevê-la de forma que o índice de refração vertical seja encontrado conforme equação (27).

$$\Delta H_{AB} = h_i - h_s + D_v + \frac{D_h^2}{2R} - \frac{kD_h^2}{2R} \quad (827)$$

É possível isolar k:

$$\frac{kD_h^2}{2R} = -\Delta H_{AB} + h_i - h_s + D_v + \frac{D_h^2}{2R}$$

$$kD_h^2 = (2R)\left[-\Delta H_{AB} + h_i - h_s + D_v + \frac{D_h^2}{2R}\right]$$

$$k = \frac{(-2R\Delta H_{AB} + 2Rh_i - 2Rh_s + 2RD_v + D_h^2)}{D_h^2} \quad (287)$$

Onde:

- ΔH_{AB} – Desnível de A para B proveniente do nivelamento geométrico, conforme equação (26);
- h_i – Altura do instrumento (estação total +base);
- h_s – Altura do sinal (Prisma + pino);
- D_v – Componente de distância inclinada no eixo vertical, proveniente do nivelamento trigonométrico;
- D_h – Componente da distância inclinada no plano horizontal proveniente do nivelamento trigonométrico;
- R – Raio da terra (6400000 m);
- k – Coeficiente de refração.

Para encontrar o valor de k utilizando as equações (27) é necessário conhecer as alturas do instrumento e do sinal (prisma). Neste levantamento conforme já mencionado, utilizou-se bases com altura fixa, logo a altura do instrumento permaneceu constante em todos os pilares (FIGURA 23). A altura do sinal (prisma) nos pontos situados na crista, nomeados como MSU's são todos iguais e fixos de acordo com a FIGURA 22, mas quando os prismas eram instalados nos pilares utilizavam a base (FIGURA 30), logo possuem uma altura diferente dos demais prismas, conforme TABELA 6.

FIGURA 30 – MONTAGEM DO PRISMA NO PILAR



FONTE: Autora (2019).

TABELA 6 – ALTURA DO INSTRUMENTO E SINAL

	(mm)
hi	236.7
Hs MSU's	112.98
hs Pilar	177.98

FONTE: Autora (2019).

4 RESULTADOS

A partir dos cálculos utilizando a equação (27) é possível descobrir os valores para o índice de refração vertical para todas as visadas separadamente e essas foram calculados para diversas campanhas, sendo possível avaliar a variação do índice de refração vertical ao longo do tempo. Esses valores são apresentados nas TABELA 7 e TABELA 8 para os levantamentos a partir do Pilar 01 e TABELA 9 e TABELA 10 para os levantamentos a partir do Pilar 02 e para o Pilar 03, como só existe uma campanha foi apresentado na TABELA 11.

As tabelas foram organizadas de forma que o valor do índice de refração vertical fosse para cada linha de visada de forma individual, por exemplo, do Pilar 01 para o ponto MSU 01, do Pilar um para o ponto MSU 02 e assim sucessivamente, depois o mesmo foi realizado para as medidas a partir do Pilar 02, ao final uma média desse índice de refração vertical foi apresentado para cada campanha, de forma que esse valor possa ser utilizado no cálculo dos desníveis trigonométricos.

TABELA 7 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL CALCULADO A PARTIR DO PILAR 01 (1/2)

Linha	1ª campanha - Mar/12	2ª campanha - Jun/12	3ª campanha - Jul/12	4ª campanha - Ago/12	5ª campanha - Set/12	6ª campanha - Nov/12
	k calculado	k calculado	k calculado	k calculado	k calculado	k calculado
PILAR01 - MSU01	-3.40	-3.72	-3.20	-4.02	-3.52	-4.34
PILAR01 - MSU02	-2.06	-2.04	-1.68	-2.19	-2.08	-2.64
PILAR01 - MSU03	-1.75	-1.65	-1.05	-1.32	-1.35	-2.12
PILAR01 - MSU04	-1.52	-1.36	-0.85	-0.86	-0.88	-1.38
PILAR01 - MSU05	-1.26	-1.17	-0.72	-0.71	-0.71	-0.98
PILAR01 - MSU06	-1.01	-0.87	-0.52	-0.52	-0.53	-0.65
PILAR01 - MSU07	-0.89	-0.73	-0.46	-0.46	-0.49	-0.60
PILAR01 - MSU08	-0.54	-0.40	-0.22	-0.21	-0.24	-0.37
PILAR01 - MSU09	-0.52	-0.37	-0.22	-0.22	-0.26	-0.32
PILAR01 - MSU10	-0.67	-0.55	-0.41	-0.43	-0.45	-0.47
PILAR01 - MSU11	-0.63	-0.51	-0.38	-0.38	-0.40	-0.42
PILAR01 - MSU12	-0.24	-0.18	-0.08	-0.07	-0.08	-0.10
PILAR01 - MSU13	-0.28	-0.23	-0.15	-0.13	-0.14	-0.14
PILAR01 - MSU14	-0.14	-0.11	-0.07	-0.04	-0.04	-0.02
PILAR01 - MSU15	-0.11	-0.10	-0.07	-0.05	-0.06	-0.03
PILAR01 - MSU16	0.10	0.09	0.12	0.13	0.13	0.16
PILAR01 - MSU17	0.02	0.02	0.04	0.05	0.05	0.08
PILAR01 - PILAR02	0.12	0.13	0.13	0.16	0.16	0.19
Média	-0.82	-0.76	-0.54	-0.63	-0.61	-0.79

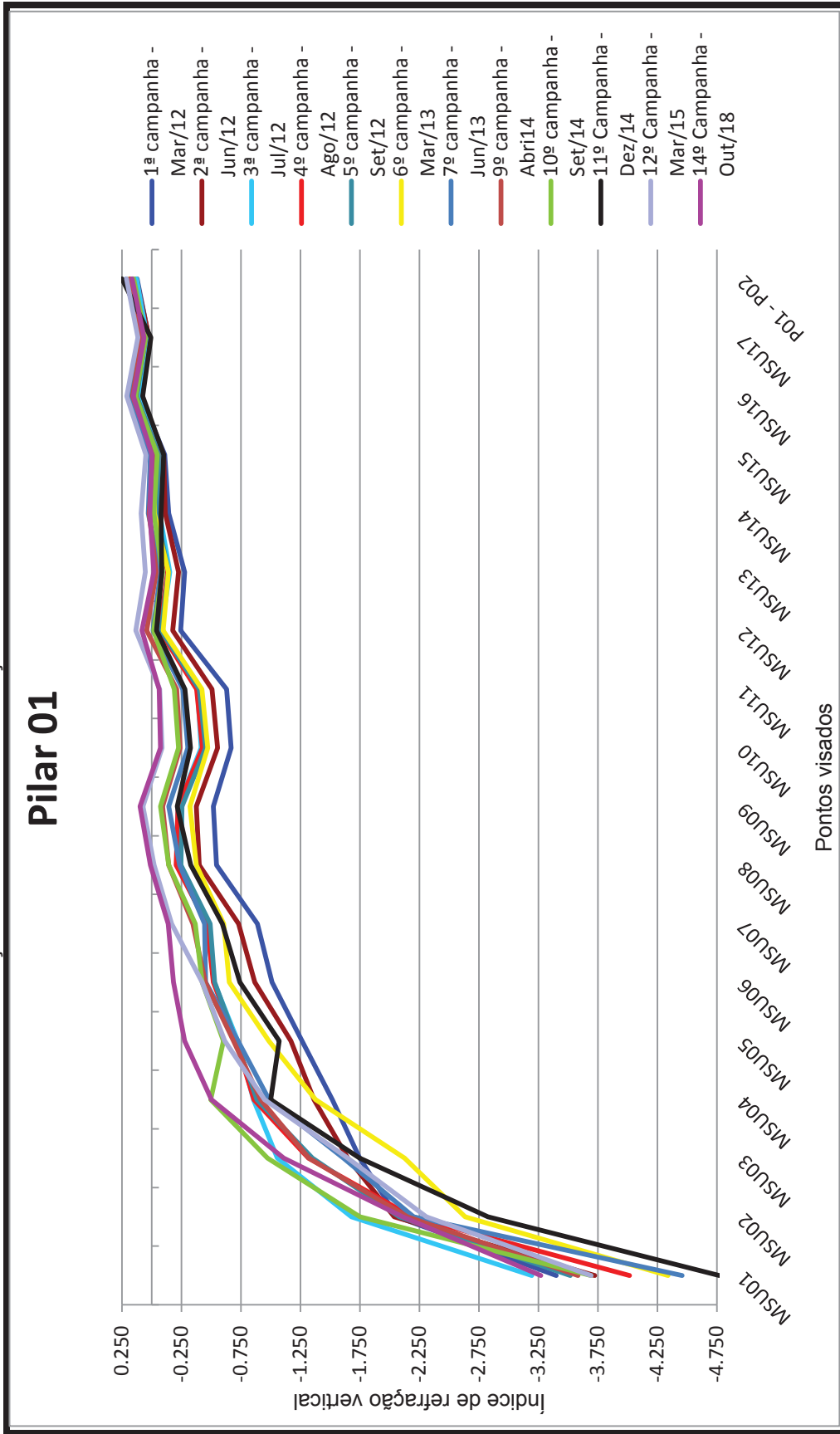
FONTE: Autora (2019).

TABELA 8 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL CALCULADO A PARTIR DO PILAR 01 (2/2)

Linha	7º campanha - jun/13	9º campanha - Abri/14	10º campanha - Set/14	11º Campanha - Dez/14	12º Campanha - Mar/15	14º Campanha - Out/18
	k calculado	k calculado	k calculado	k calculado	k calculado	k calculado
PILAR01 - MSU01	-4.46	-3.58	-3.69	-4.77	-3.69	-3.27
PILAR01 - MSU02	-2.20	-2.15	-1.75	-2.83	-2.31	-2.11
PILAR01 - MSU03	-1.61	-1.32	-0.97	-1.75	-1.65	-1.11
PILAR01 - MSU04	-0.99	-0.92	-0.50	-1.00	-0.95	-0.50
PILAR01 - MSU05	-0.73	-0.69	-0.60	-1.07	-0.61	-0.28
PILAR01 - MSU06	-0.45	-0.45	-0.42	-0.74	-0.42	-0.18
PILAR01 - MSU07	-0.44	-0.35	-0.37	-0.59	-0.17	-0.14
PILAR01 - MSU08	-0.24	-0.14	-0.14	-0.33	-0.02	0.01
PILAR01 - MSU09	-0.14	-0.09	-0.07	-0.21	0.07	0.10
PILAR01 - MSU10	-0.30	-0.24	-0.23	-0.33	-0.09	-0.07
PILAR01 - MSU11	-0.26	-0.21	-0.19	-0.28	-0.07	-0.06
PILAR01 - MSU12	-0.01	0.04	-0.02	-0.04	0.14	0.08
PILAR01 - MSU13	-0.07	-0.04	-0.09	-0.08	0.05	-0.02
PILAR01 - MSU14	0.03	0.02	-0.02	-0.08	0.09	0.01
PILAR01 - MSU15	0.01	-0.02	-0.05	-0.10	0.05	0.00
PILAR01 - MSU16	0.18	0.16	0.13	0.08	0.21	0.15
PILAR01 - MSU17	0.10	0.08	0.05	0.01	0.12	0.07
PILAR01 - PILAR02	0.21	0.18	0.15	0.25	0.21	0.16
Média	-0.63	-0.54	-0.49	-0.77	-0.50	-0.40

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 2 – VARIACÃO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL A PARTIR DO PILAR 01



FONTE: Autora (2019).

TABELA 9 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL CALCULADO A PARTIR DO PILAR 02 (1/2)

Linha	1ª campanha- Mar/12	2ª campanha - Jun/12	3ª campanha - Jul/12	4ª campanha - Ago/12	5ª campanha - Set/12	6ª campanha - nov/12
	k calculado	k calculado	k calculado	k calculado	k calculado	k calculado
PILAR02 - PILAR01	0.03	0.02	0.03	-0.01	-0.01	-0.03
PILAR02 - MSU01	0.12	0.11	0.12	0.07	0.08	0.04
PILAR02 - MSU02	0.07	0.07	0.08	0.03	0.03	-0.02
PILAR02 - MSU03	-0.12	-0.13	-0.09	-0.15	-0.15	-0.23
PILAR02 - MSU04	-0.14	-0.14	-0.08	-0.13	-0.13	-0.23
PILAR02 - MSU05	-0.19	-0.19	-0.11	-0.17	-0.17	-0.26
PILAR02 - MSU06	-0.18	-0.15	-0.06	-0.13	-0.13	-0.22
PILAR02 - MSU07*						
PILAR02 - MSU08	-0.65	-0.58	-0.46	-0.55	-0.58	-0.74
PILAR02 - MSU09	-0.92	-0.80	-0.62	-0.75	-0.79	-0.96
PILAR02 - MSU10	-1.20	-1.07	-0.86	-1.03	-1.07	-1.22
PILAR02 - MSU11	-1.02	-0.85	-0.63	-0.78	-0.82	-1.00
PILAR02 - MSU12	-1.60	-1.44	-1.11	-1.32	-1.35	-1.61
PILAR02 - MSU13	-1.96	-1.79	-1.37	-1.62	-1.66	-1.93
PILAR02 - MSU14	-2.55	-2.40	-1.89	-2.15	-2.18	-2.43
PILAR02 - MSU15	-2.19	-2.21	-1.59	-2.20	-2.23	-2.37
PILAR02 - MSU16	-2.76	-3.23	-2.34	-3.30	-3.37	-3.51
PILAR02 - MSU17*						
Média	-0.85	-0.83	-0.61	-0.81	-0.81	-0.94

FONTE: Autora (2019).

*A partir do Pilar 02 não foi possível realizar a leitura nos pontos MSU 07 e MSU 17

TABELA 10 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL CALCULADO A PARTIR DO PILAR 02 (2/2)

Linha	7º campanha - jun/13	9º campanha - Abr/14	10º campanha - Set/14	11º Campanha - Dez/14	12º Campanha - Mar/15	14º Campanha - Out/18
	k calculado	k calculado	k calculado	k calculado	k calculado	k calculado
PILAR02 - PILAR01	-0.06	-0.03	0.00	-0.10	-0.06	-0.01
PILAR02 - MSU01	0.01	0.05	0.08	-0.03	0.02	0.08
PILAR02 - MSU02	-0.03	0.00	0.05	-0.09	-0.03	0.03
PILAR02 - MSU03	-0.24	-0.18	-0.12	-0.29	-0.24	-0.14
PILAR02 - MSU04	-0.23	-0.17	-0.08	-0.28	-0.22	-0.10
PILAR02 - MSU05	-0.27	-0.20	-0.13	-0.38	-0.24	-0.10
PILAR02 - MSU06	-0.22	-0.15	-0.08	-0.38	-0.21	-0.04
PILAR02 - MSU07*						
PILAR02 - MSU08	-0.74	-0.58	-0.49	-0.90	-0.59	-0.43
PILAR02 - MSU09	-0.88	-0.70	-0.57	-1.09	-0.64	-0.43
PILAR02 - MSU10	-1.10	-0.86	-0.71	-1.30	-0.78	-0.55
PILAR02 - MSU11	-0.86	-0.61	-0.42	-1.07	-0.51	-0.27
PILAR02 - MSU12	-1.54	-1.12	-1.09	-1.89	-1.04	-0.85
PILAR02 - MSU13	-1.86	-1.35	-1.31	-2.27	-1.18	-1.07
PILAR02 - MSU14	-2.38	-1.94	-1.83	-3.94	-1.76	-1.72
PILAR02 - MSU15	-2.44	-2.09	-1.84	-5.25	-1.67	-1.40
PILAR02 - MSU16	-3.79	-3.17	-2.80	-8.78	-2.80	-2.66
PILAR02 - MSU17*						
Média	-0.94	-0.74	-0.63	-1.58	-0.68	-0.54

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 3 – VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL A PARTIR DO PILAR 02

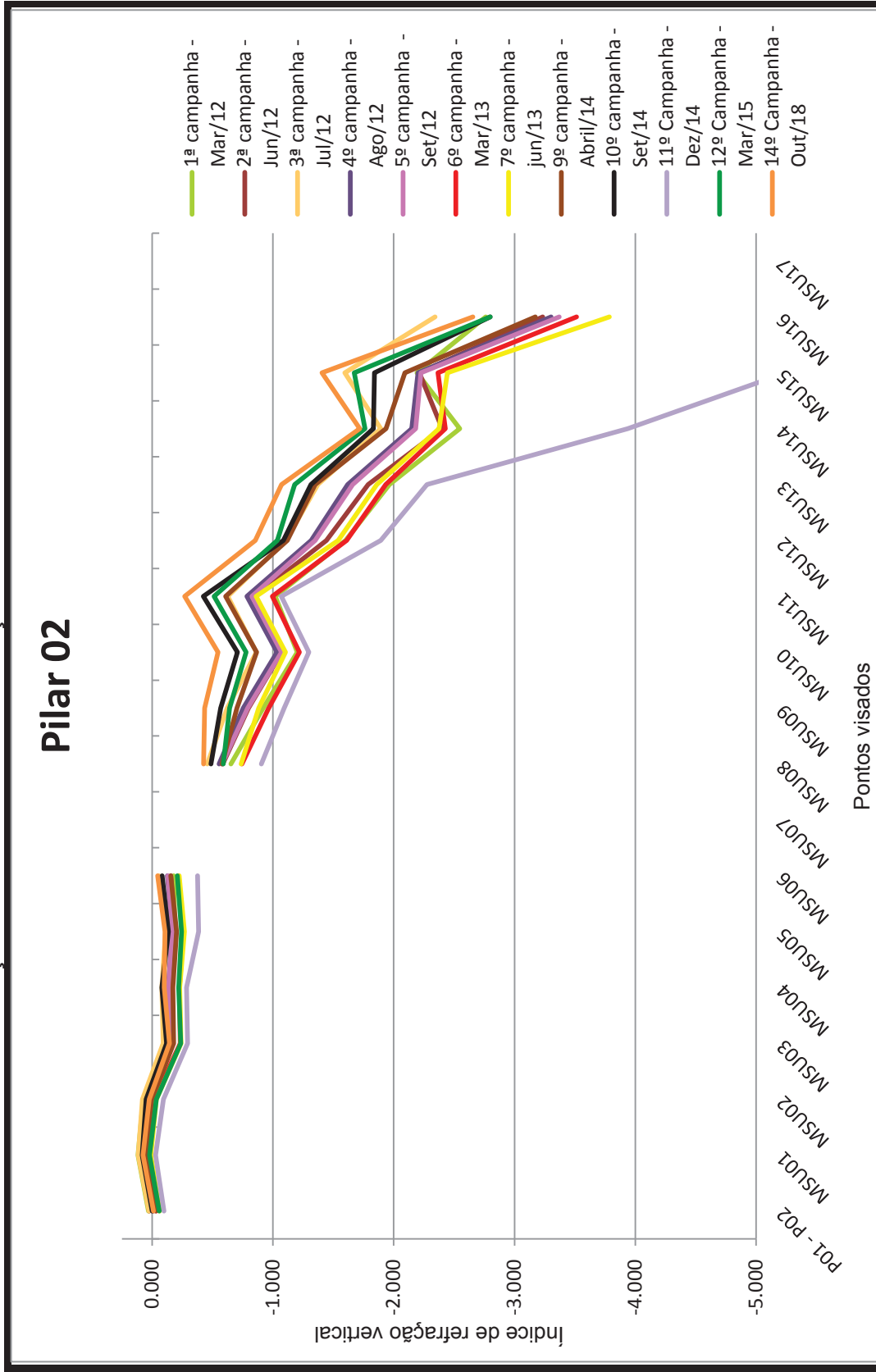


TABELA 11 – ÍNDICE DE REFRAÇÃO VERTICAL CALCULADO A PARTIR DO PILAR 03

	K Calculado
PILAR02-PILAR03	0.187248

FONTE: Autora (2019).

Existem dados de nivelamento geométrico entre os pilares 01 e 02 de diversas campanhas, logo foram calculados índices de refração em diversos períodos do ano, conseqüentemente em diferentes de estações do ano. Analisando os valores de k encontrados, pode-se perceber variações ao longo das estações e também um comportamento similar para cada linha de visada. Pontos mais próximos apresentam valores de índice de refração vertical em torno de -3 e conforme essas distâncias aumentam esses valores crescem e ficam próximos de zero.

Uma possível explicação para esse comportamento seria devido a configuração da região onde foi realizado o estudo, pois existem grandes áreas com água represada e também áreas construídas, que apresentam superfícies de concreto, logo a onda eletromagnética do instrumento percorre um meio que está sob efeitos da turbulência atmosférica e conseqüentemente sujeito a variações do índice de refração ao longo desse caminho.

A partir dos valores de k calculados e o determinado por Gauss é possível determinar os desníveis trigonométricos [Utilizando a equação (9)].

Os valores de nivelamento foram separados por campanhas de modo que seja possível comparar os valores de desnível, provenientes do nivelamento geométrico, (que nesse caso serviu como referência ou padrão, por não ter influência do índice de refração vertical na sua determinação): (a) com os desníveis oriundos do nivelamento trigonométrico com o índice de refração vertical (k) igual ao valor médio apresentado nas tabelas: TABELA 7, TABELA 8, TABELA 9 e TABELA 10; (b) com os desníveis trigonométricos calculados a partir de k igual a 0,13 descrito por Gauss (c) com os desníveis trigonométricos oriundos da média do índice de refração entre o Pilar 01 e o Pilar 02.

Na tabela identificada por TABELA 12, estão os dados referentes a primeira campanha a partir do Pilar 01 e na TABELA 13 os dados referentes a primeira campanha a partir do Pilar 02, os demais dados estão apresentados nas tabelas de TABELA 14, a TABELA 35, presentes nos apêndices.

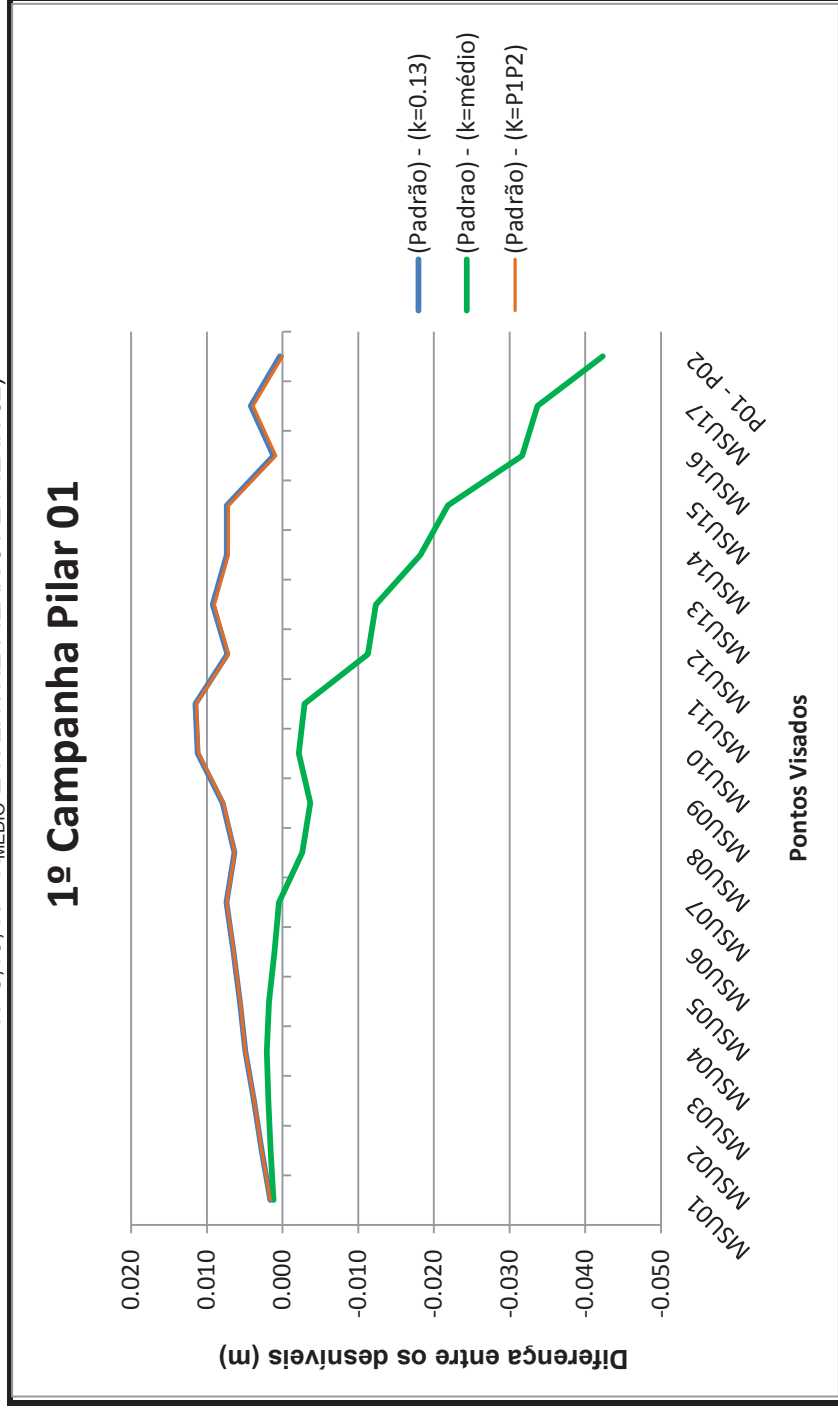
Nas tabelas onde o nivelamento trigonométrico foi realizado a partir do Pilar 02 não existem dados para o ponto MSU 07 e MSU 17, pois nesses pontos não foi possível a visualização do prisma.

TABELA 12 – 1º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$ E K ENTRE PILAR 01 E PILAR 02)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k = médio$)(m)	Desnível ($K=P1-P2$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$) (m)	(Padrão) - ($k=médio$) (m)	(Padrão)-(K=P1P2) (m)
PILAR01 - MSU01	-4.11824	-4.11988	-4.11944	-4.11987	0.00163	0.00119	0.00163
PILAR01 - MSU02	-4.12182	-4.12457	-4.12337	-4.12456	0.00275	0.00155	0.00274
PILAR01 - MSU03	-4.12237	-4.12612	-4.12422	-4.12611	0.00375	0.00185	0.00374
PILAR01 - MSU04	-4.12470	-4.12961	-4.12678	-4.12959	0.00491	0.00208	0.00489
PILAR01 - MSU05	-4.12305	-4.12868	-4.12484	-4.12865	0.00563	0.00178	0.00560
PILAR01 - MSU06	-4.12159	-4.12806	-4.12267	-4.12802	0.00647	0.00107	0.00642
PILAR01 - MSU07	-4.12703	-4.13444	-4.12751	-4.13438	0.00741	0.00048	0.00735
PILAR01 - MSU08	-4.12598	-4.13235	-4.12336	-4.13227	0.00636	-0.00261	0.00629
PILAR01 - MSU09	-4.12393	-4.13183	-4.12025	-4.13173	0.00789	-0.00368	0.00780
PILAR01 - MSU10	-4.12322	-4.13442	-4.12105	-4.13431	0.01120	-0.00216	0.01109
PILAR01 - MSU11	-4.11902	-4.13051	-4.11610	-4.13039	0.01149	-0.00291	0.01137
PILAR01 - MSU12	-4.12185	-4.12914	-4.11059	-4.12899	0.00729	-0.01126	0.00714
PILAR01 - MSU13	-4.12313	-4.13234	-4.11078	-4.13216	0.00921	-0.01234	0.00903
PILAR01 - MSU14	-4.11766	-4.12501	-4.09947	-4.12480	0.00734	-0.01819	0.00713
PILAR01 - MSU15	-4.12093	-4.12831	-4.09907	-4.12807	0.00738	-0.02186	0.00714
PILAR01 - MSU16	-4.11923	-4.12041	-4.08759	-4.12015	0.00118	-0.03163	0.00091
PILAR01 - MSU17	-4.12077	-4.12496	-4.08710	-4.12465	0.00418	-0.03367	0.00388
PILAR01 - PILAR02	11.29659	11.29624	11.33892	11.29659	0.00034	-0.04232	0.00000

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 4 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{\text{MÉDIO}}$ E K ENTRE PILAR 01 E PILAR 02)



FONTE: Autora (2019).

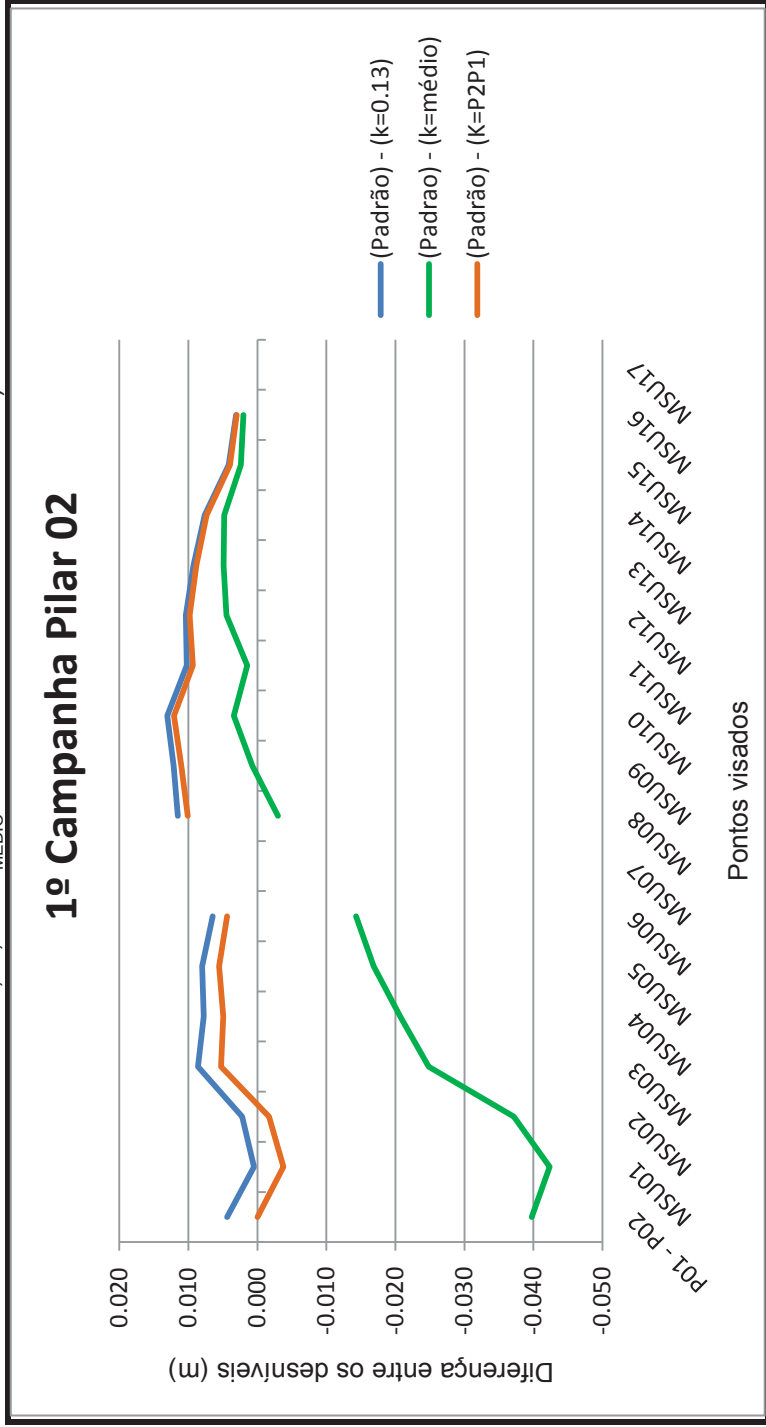
Avaliando o GRÁFICO 4 é possível perceber que o comportamento da diferença dos desníveis, quando utiliza-se $k=0,13$ e k igual ao valor obtido entre o Pilar 01 e 02, é semelhante, ocorrendo uma sobreposição na representação. Já, quando se utiliza o valor médio de k , a diferença aumenta conforme a distância entre os pontos aumenta.

TABELA 13 – 1º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$ E K ENTRE PILAR 01 E PILAR 02)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{MÉDIO}$)(m)	Desnível ($K=P1-P2$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$) (m)	(Padrão) - ($k=MÉDIO$) (m)	(Padrão)-(K=P1P2) (m)
PILAR01-PILAR02	-11.29659	-11.30100	-11.25684	-11.296595	0.00440	-0.03974	0.00000
PILAR02 - MSU01	-15.41484	-15.41534	-15.37249	-15.41107	0.00050	-0.04234	-0.00376
PILAR02 - MSU02	-15.41841	-15.42064	-15.38124	-15.41671	0.00223	-0.03716	-0.00169
PILAR02 - MSU03	-15.41896	-15.42758	-15.39415	-15.42424	0.00861	-0.02480	0.00528
PILAR02 - MSU04	-15.42129	-15.42908	-15.40062	-15.42624	0.00779	-0.02067	0.00495
PILAR02 - MSU05	-15.41965	-15.42767	-15.40280	-15.42519	0.00802	-0.01684	0.00554
PILAR02 - MSU06	-15.41819	-15.42466	-15.40387	-15.42259	0.00647	-0.01431	0.00440
PILAR02 - MSU07*	-15.42362						
PILAR02 - MSU08	-15.42258	-15.43411	-15.41959	-15.43267	0.01153	-0.00298	0.01009
PILAR02 - MSU09	-15.42053	-15.43266	-15.42126	-15.43153	0.01213	0.00073	0.01100
PILAR02 - MSU10	-15.41982	-15.43288	-15.42322	-15.43191	0.01306	0.00340	0.01209
PILAR02 - MSU11	-15.41561	-15.42584	-15.41707	-15.42496	0.01022	0.00145	0.00935
PILAR02 - MSU12	-15.41845	-15.42884	-15.42293	-15.42825	0.01039	0.00448	0.00980
PILAR02 - MSU13	-15.41972	-15.42900	-15.42464	-15.42856	0.00927	0.00491	0.00884
PILAR02 - MSU14	-15.41426	-15.42188	-15.41908	-15.42160	0.00762	0.00482	0.00734
PILAR02 - MSU15	-15.41753	-15.42168	-15.41992	-15.42151	0.00415	0.00239	0.00398
PILAR02 - MSU16	-15.41583	-15.41892	-15.41787	-15.41882	0.00309	0.00204	0.00299
PILAR02 - MSU17*	-15.41737						

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 5 – VARIACÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$ E K ENTRE PILAR 01 E PILAR 02)



FONTE: Autora (2019).

Como é possível observar através do GRÁFICO 5, o comportamento das diferenças dos desníveis é semelhante aos do GRÁFICO 4.

Os gráficos das demais campanhas estão apresentados nos apêndices.

5 CONCLUSÃO

A partir das equações (7), (9) e (25) foi possível encontrar a equação (27) utilizada na determinação do índice de refração vertical para cada conjunto de pontos visados, situados na crista da Barragem.

Com dados dos desníveis por meio do nivelamento geométrico e com as medições de ângulo zenital e distâncias inclinadas (obtidos com a estação total) foi possível encontrar os valores do índice de refração vertical para conjunto de pontos visados, que apresentam um comportamento muito semelhante em todas as campanhas.

Quando os pontos estão mais próximos o índice de refração fica em torno de -3 e conforme a distância entre os pontos aumenta esse índice vai diminuindo até ficar entre 0,12 a 0,25 quando medido a partir do Pilar 01 e entre -0,10 e 0,03 a partir do Pilar 02. No Pilar 03 como não é possível visada dos pontos MSU's o índice de refração vertical calculado é aproximadamente 0,19 (entre os pilares 02 e 03). Esses valores são compatíveis com os encontrados por Brocks (1950), que variam entre -5 á 15, dependendo da configuração do meio e das condições atmosféricas.

Para avaliar o comportamento do k encontrado, calculou-se uma média de todos esses valores para cada campanha, (conforme apresentado nas TABELA 7 á TABELA 11) e a partir desse valor foi possível realizar o cálculo do desnível trigonométrico.

O valor de k determinado por Gauss (0,13), também foi utilizado para o cálculo do desnível trigonométrico, com essas duas informações foi possível verificar quais são as diferenças de desníveis pelos três métodos (geométrico, trigonométrico utilizando o valor de k =médio e trigonométrico utilizando o valor determinado por Gauss).

Analisando as diferenças dos desníveis calculados a partir dos três métodos pode-se perceber que o desnível trigonométrico através da média do k calculado apresenta valores melhores para pontos com distâncias até 440 m, para distâncias maiores que esta o valor de $k=0,13$ representa uma boa aproximação.

Recomenda-se para trabalhos futuros que mais estudos sejam realizados na UHE Governador Jayme Canet Junior, de forma que seja possível avaliar a região a jusante, onde o meio percorrido pela onda eletromagnética do instrumento é

diferente da região a montante do barramento, portanto o índice de refração nessa região provavelmente se comporte de forma diferente.

REFERÊNCIAS

- AUWERAER, H. V. D.; PEETERS, B. International research projects on structural health monitoring: An overview. **Structural Health Monitoring**, v. 2, n. 4, p. 341–358, 2003.
- BARRY, R.G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. 9 ed. Rio Grande Do Sul: Bookman, 2013.
- BROCKS, K. Die Lichtstrahl krümmung in Bodennähe. **Deutsche Hydrographische Zeitschrift** 3, 1950.
- BÖCKEM, B. et al. Refraction Influence Analysis and Investigations on Automated elimination of Refraction Effects on Geodetic Measurements. **Paper XVI IMEKO World Congress**, 2000.
- BRUNNER, F. K. **Geodetic Refraction: Effects of Electromagnetic Wave Propagation Through the Atmosphere**. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
- BRUNNER, F. K.; KUKUVEC, A. Utility of geodetic refraction. 5th Int. Conf. on Engineering Surveying – INGENEO 2011, Brijuni, Croatia (2011): CD – 12 p
- COPEL - Companhia Paranaense de Energia. Geração. 2016. Disponível em: <http://www.consorciocezairodosul.com.br/a-usina>. Acesso em: 20 out. 2018.
- DZIERZEGA, A.; SCHERRER, R. **Measuring with electronic total station**. Survey Review, v. 37, n. 287, janeiro de 2003.
- GEMIN, A. R. S. **Desenvolvimento de um Sistema de calibração Horizontal para Sistemas de Nivelamento Digitais**. 2017. 134 pag. Tese (doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- GEIGER, R., ARON, R. H., TODHUNTER, P. **The Climate Near the Ground**. 7 ed. Rowman and Littlefield, 2009.
- GEMAEL, C. **Introdução a Geodésia geométrica** – Primeira parte - Curso de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 1987.
- GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Elementary Surveying: an introduction to geomatics**. 13. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2012.
- GOMES, J. P. DETERMINAÇÃO DE DESNÍVEIS DE PRECISÃO UTILIZANDO. , 2006. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/5773/Jorge;jsessionid=844BEB6D1350E99F397DF146BA2083BC?sequence=1>>. .
- GUERRA, M. O. **Qualidade como fator de melhoria da performance de auscultação e monitoramento de Barragens**. 1996. 191 f. Dissertação (mestrado

em Qualidade)- Instituto de Matemática, estatística e ciência da computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 1996.

HECHT, E. **Óptica**. 1 ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1991.

HENNES, M. Zum Refraktionseinfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und Instrumentenentwicklung. *Flurbereinigung. Bodenordnung*, 2, 73–86. 2002.

HIRT, C. et al. Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements. **Journal of Geophysical Research**, vol 115, D21102, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro, 2017.

INGENSAND, H. Concepts and solutions to overcome the refraction problem in terrestrial precision measurement, *Geod. Kartogr.*, 34(2), 61–65. 2008.

JORDAN, D. W. **Tratado general de topografía. Volume I**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, S.A, 1974.

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

LAMBROU, E.; PANTAZIS, G. **Evaluation of the Credibility of Reflectorless Distance Measurement**. *JOURNAL OF SURVEYING ENGINEERING*. Vol 136, n 4, 167-171, 2010.

LEICA GEOSYSTEMS. Leica DNA03 / DNA10. User Manual, versão 2.0, inglês. 2006.

LEICA GEOSYSTEMS. Leica TS15. Manual de operação, versão 3.0, espanhol. 2015.

LIENHART, W. Geotechnical monitoring using total stations and laser scanners: critical aspects and solutions. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, vol 7, pag 315-324, 2017.

LUTES, J. A.; CHRZANOWKI, A.; BASTIN, G.; WHITAKER, C. 'Dimons' software for automatic data collection and automatic deformation analysis. The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements. 2001.

MOREIRA, A. S. B. **Nivelamento trigonométrico e nivelamento geométrico classe IIN da NBR 13.33: limites e condições de compatibilidade**. 2003. 103 pag. Dissertação (mestrado engenharia civil: transportes)- Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

NADAL, C. A. **Método da inserção óptica tridimensional aplicado à engenharia de precisão**. 2000. 116 pag. Tese - Universidade Federal do Paraná, Curitiba,

2000.

PALAZZO, D. R., SANTOS FILHO, M. L., MOREIRA, A. A Utilização de Técnicas Geodesicas no Monitoramento de Estruturas Pré-Moldadas. In: 1° Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado, São Carlos, 2005.

REDOVNIKOVI, L. et al. Influence of lateral refraction on measured horizontal directions. **Survey Review**. v. 45, n. 331, 2013.

RUGER, J. M. **Electronic Distance Measurement: An introduction**. 4 ed. Berlin: Springer, 1996.

SCHAAL, R. E. **Efeitos da Refração na Atmosfera em Observações Geodésicas Próximas ao solo**. 1995. 120 p. Dissertação (mestrado em engenharia) - Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 1995.

SIGUEL, A. R. **Monitoramento da Barragem da Usina Hidrelétrica Mauá Utilizando irradiação Tridimensional**. 2013. 171 p. Dissertação (mestrado em ciências geodésicas) - Pós-graduação em ciências geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SILVA, I. da; SEGATINE, P. C.L. **Topografia para Engenharia: Teoria e Prática de Geomática**. 1. Ed. Editora Elsevier, 2015.

SILVEIRA, João F. A. **Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e entrocamento**. São Paulo: Oficina de textos, 2006.

SILVA, F. M. da. **Geografia Física II**. Natal: EDUFRN, 2009.

TORGE, W. **Geodesy**. 3 ed. Walter de Gruyter: Berlin, 2001.

VEIGA, L. A. K. et al. **Apostila Fundamentos de Topografia**. Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática. Curitiba, 2012.

WELSCH, W., HEUNECKE, O. Models and Terminology for the Analysis of Geodetic Monitoring Observations. **10th Fig International Symposium on Deformation Measurements**, Orange, 2001.

YUEQUIAN, S. et al. Inversion Method of Atmospheric Refraction Coefficient based on Trigonometric Leveling Network. *J. Surv. Eng.* 143, 1, 2017

APÊNDICE 1 – DADOS DAS DEMAIS CAMPANHAS

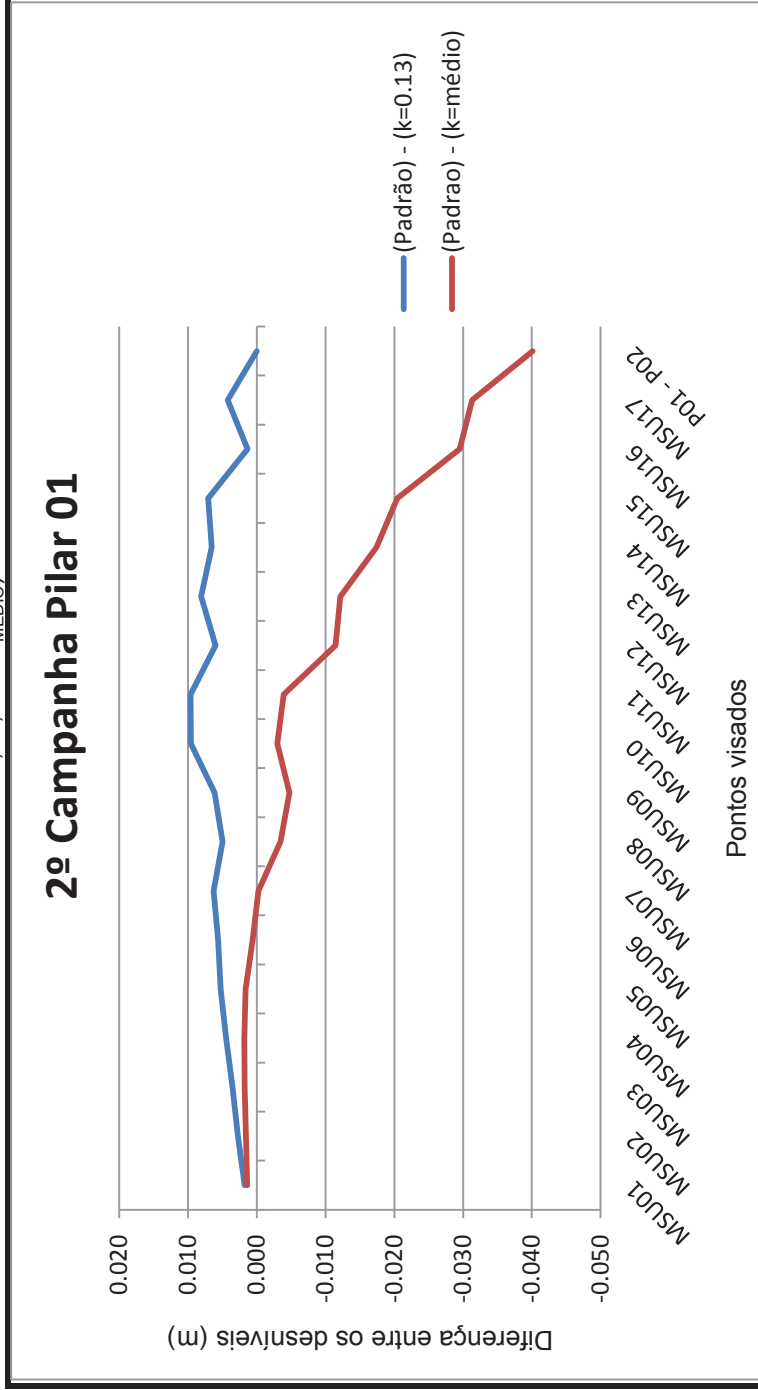
As tabelas a seguir não foram contempladas com os valores de desnível a partir do valor de k calculado entre Pilar 01 e Pilar 02, por apresentarem dados muito semelhantes, conforme mostrado nos GRÁFICOS 4 e 5.

TABELA 14 – 2ª CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$) (m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - MSU01	-4.118095	-4.119880	-4.119466	0.001785	0.001371
PILAR01 - MSU02	-4.121850	-4.124572	-4.123450	0.002722	0.001600
PILAR01 - MSU03	-4.122570	-4.126126	-4.124338	0.003556	0.001768
PILAR01 - MSU04	-4.125160	-4.129619	-4.126953	0.004459	0.001793
PILAR01 - MSU05	-4.123440	-4.128686	-4.125077	0.005246	0.001637
PILAR01 - MSU06	-4.122420	-4.128067	-4.123001	0.005647	0.000581
PILAR01 - MSU07	-4.128180	-4.134444	-4.127936	0.006264	-0.000244
PILAR01 - MSU08	-4.127355	-4.132350	-4.123911	0.004995	-0.003444
PILAR01 - MSU09	-4.125695	-4.131831	-4.120956	0.006136	-0.004739
PILAR01 - MSU10	-4.124835	-4.134427	-4.121868	0.009592	-0.002967
PILAR01 - MSU11	-4.120865	-4.130515	-4.116975	0.009650	-0.003890
PILAR01 - MSU12	-4.123170	-4.129149	-4.111716	0.005979	-0.011454
PILAR01 - MSU13	-4.124265	-4.132341	-4.112094	0.008076	-0.012171
PILAR01 - MSU14	-4.118440	-4.125011	-4.101019	0.006571	-0.017421
PILAR01 - MSU15	-4.121260	-4.128316	-4.100843	0.007056	-0.020417
PILAR01 - MSU16	-4.119090	-4.120418	-4.089586	0.001328	-0.029504
PILAR01 - MSU17	-4.120715	-4.124964	-4.089401	0.004249	-0.031314
PILAR01 - PILAR02	11.296235	11.361247	11.401336	-0.065012	-0.105101

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 6 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMETRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



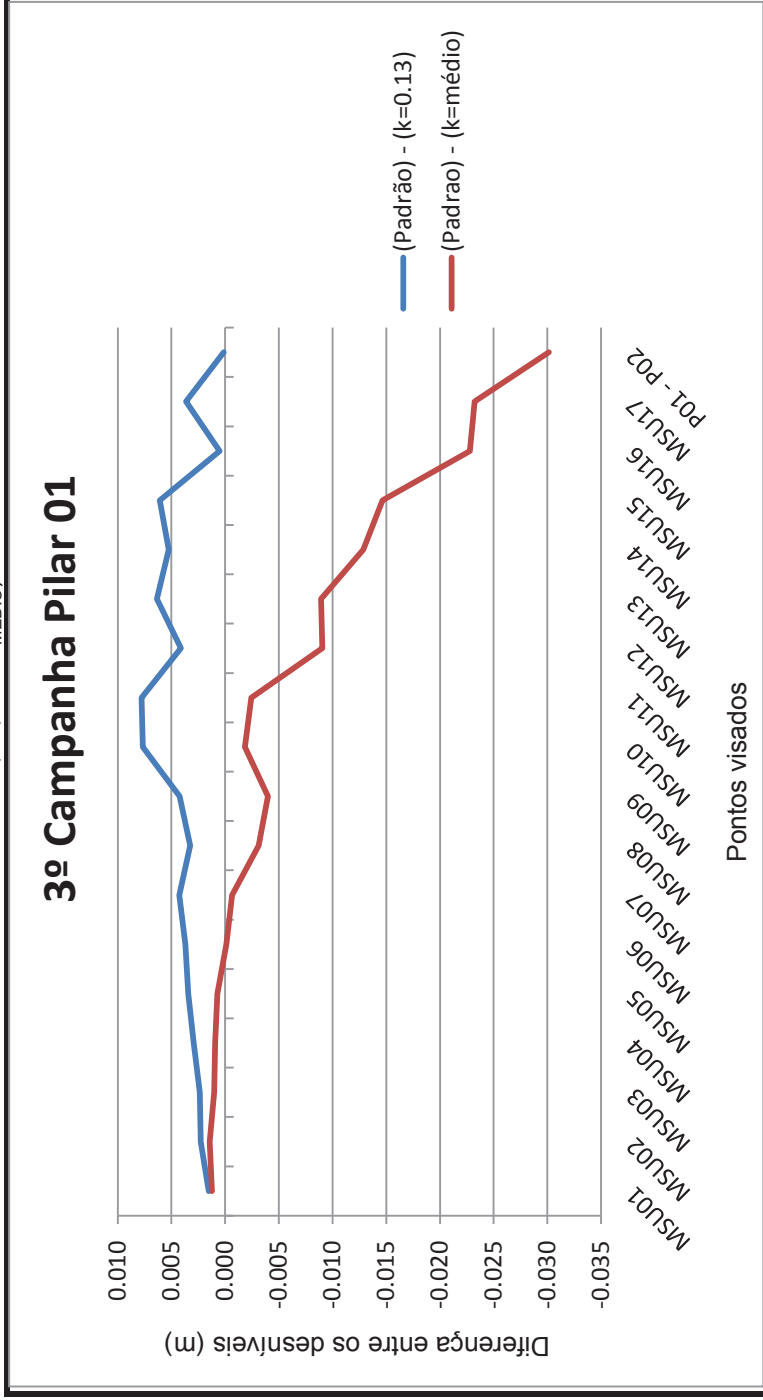
FONTE: Autora (2019).

TABELA 15 – 3º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - MSU01	-4.118340	-4.119880	-4.119568	0.001540	0.001228
PILAR01 - MSU02	-4.122300	-4.124572	-4.123725	0.002272	0.001425
PILAR01 - MSU03	-4.123755	-4.126126	-4.124776	0.002371	0.001021
PILAR01 - MSU04	-4.126680	-4.129619	-4.127605	0.002939	0.000925
PILAR01 - MSU05	-4.125240	-4.128686	-4.125961	0.003446	0.000721
PILAR01 - MSU06	-4.124355	-4.128067	-4.124241	0.003712	-0.000114
PILAR01 - MSU07	-4.130165	-4.134444	-4.129529	0.004279	-0.000636
PILAR01 - MSU08	-4.129090	-4.132350	-4.125978	0.003260	-0.003112
PILAR01 - MSU09	-4.127595	-4.131831	-4.123619	0.004236	-0.003976
PILAR01 - MSU10	-4.126775	-4.134427	-4.124943	0.007652	-0.001832
PILAR01 - MSU11	-4.122740	-4.130515	-4.120290	0.007775	-0.002450
PILAR01 - MSU12	-4.125045	-4.129149	-4.115984	0.004104	-0.009061
PILAR01 - MSU13	-4.125980	-4.132341	-4.117052	0.006361	-0.008928
PILAR01 - MSU14	-4.119750	-4.125011	-4.106894	0.005261	-0.012856
PILAR01 - MSU15	-4.122225	-4.128316	-4.107570	0.006091	-0.014655
PILAR01 - MSU16	-4.119905	-4.120418	-4.097136	0.000513	-0.022769
PILAR01 - MSU17	-4.121335	-4.124964	-4.098109	0.003629	-0.023226
PILAR01 - PILAR02	11.296375	11.296247	11.326520	0.000128	-0.030145

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 7 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



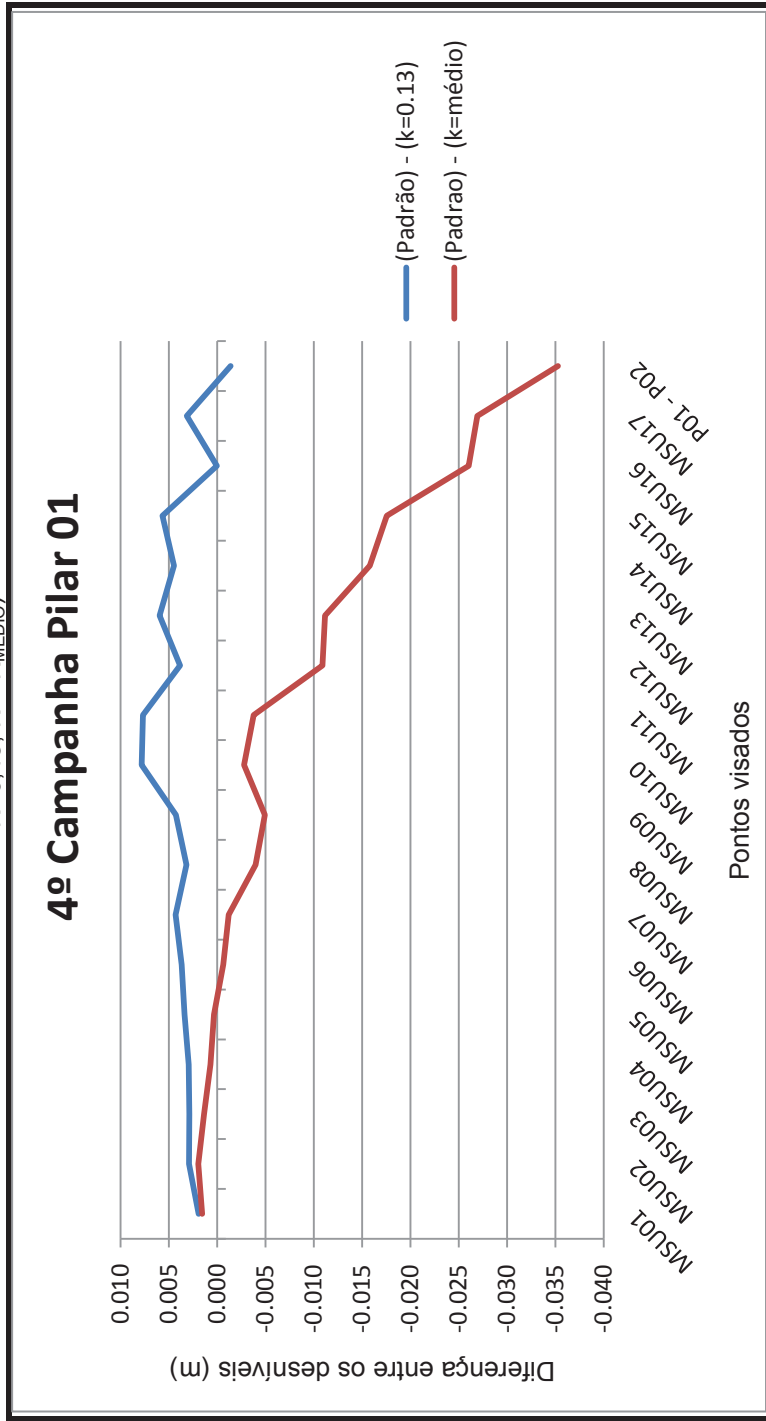
FONTE: Autora (2019).

TABELA 16 – 4º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - MSU01	-4.117960	-4.119880	-4.119530	0.001920	0.001570
PILAR01 - MSU02	-4.121660	-4.124572	-4.123624	0.002912	0.001964
PILAR01 - MSU03	-4.123230	-4.126126	-4.124614	0.002896	0.001384
PILAR01 - MSU04	-4.126665	-4.129619	-4.127365	0.002954	0.000700
PILAR01 - MSU05	-4.125300	-4.128686	-4.125635	0.003386	0.000335
PILAR01 - MSU06	-4.124395	-4.128067	-4.123784	0.003672	-0.000611
PILAR01 - MSU07	-4.130115	-4.134444	-4.128942	0.004329	-0.001173
PILAR01 - MSU08	-4.129175	-4.132350	-4.125215	0.003175	-0.003960
PILAR01 - MSU09	-4.127560	-4.131831	-4.122637	0.004271	-0.004923
PILAR01 - MSU10	-4.126595	-4.134427	-4.123809	0.007832	-0.002786
PILAR01 - MSU11	-4.122825	-4.130515	-4.119068	0.007690	-0.003757
PILAR01 - MSU12	-4.125290	-4.129149	-4.114410	0.003859	-0.010880
PILAR01 - MSU13	-4.126375	-4.132341	-4.115223	0.005966	-0.011152
PILAR01 - MSU14	-4.120520	-4.125011	-4.104727	0.004491	-0.015793
PILAR01 - MSU15	-4.122640	-4.128316	-4.105089	0.005676	-0.017551
PILAR01 - MSU16	-4.120375	-4.120418	-4.094352	0.000043	-0.026023
PILAR01 - MSU17	-4.121820	-4.124964	-4.094897	0.003144	-0.026923
PILAR01 - PILAR02	11.294875	11.296247	11.330139	-0.001372	-0.035264

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 8 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



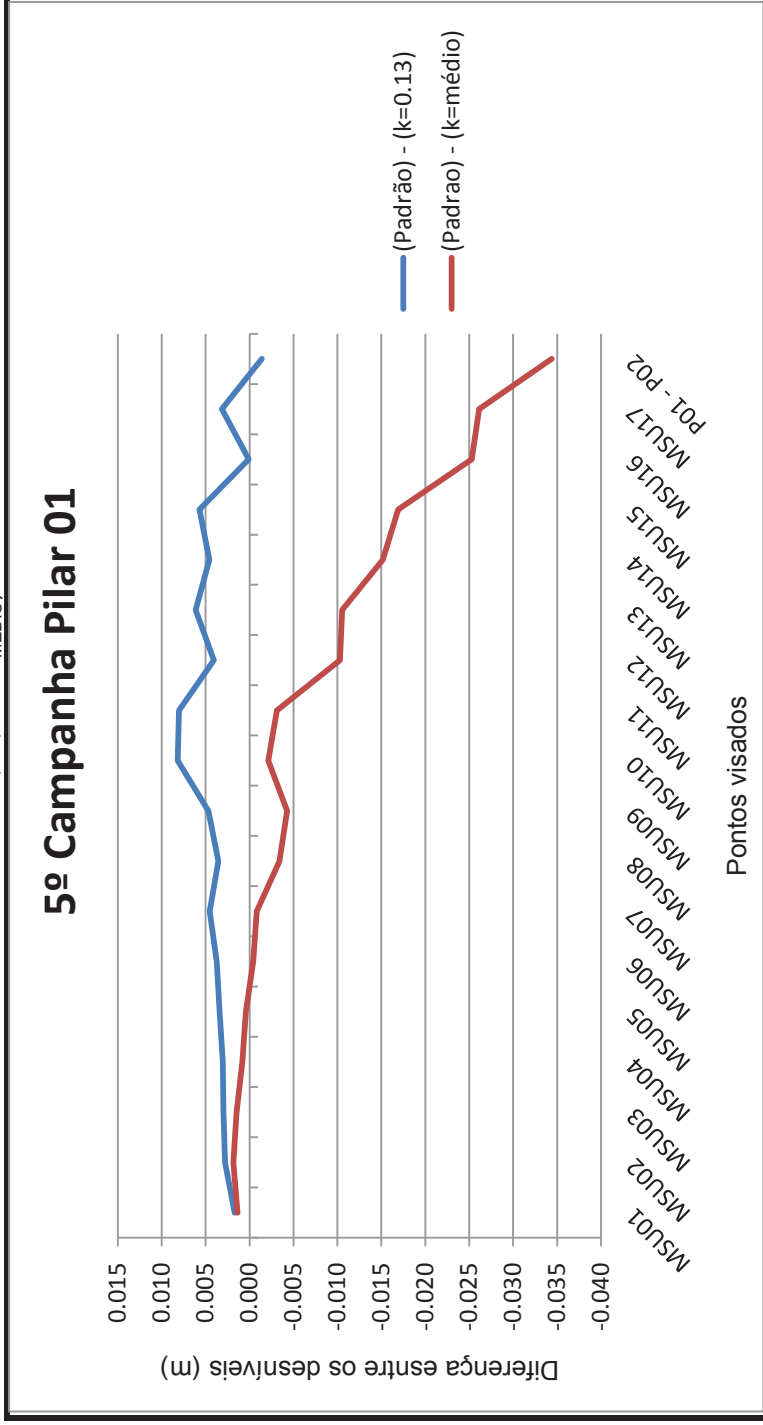
FONTE: Autora (2019).

TABELA 17 – 5º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - MSU01	-4.118190	-4.119880	-4.119540	0.001690	0.001350
PILAR01 - MSU02	-4.121795	-4.124572	-4.123649	0.002777	0.001854
PILAR01 - MSU03	-4.123165	-4.126126	-4.124655	0.002961	0.001490
PILAR01 - MSU04	-4.126590	-4.129619	-4.127425	0.003029	0.000835
PILAR01 - MSU05	-4.125295	-4.128686	-4.125716	0.003391	0.000421
PILAR01 - MSU06	-4.124330	-4.128067	-4.123899	0.003737	-0.000431
PILAR01 - MSU07	-4.129920	-4.134444	-4.129089	0.004524	-0.000831
PILAR01 - MSU08	-4.128810	-4.132350	-4.125406	0.003540	-0.003404
PILAR01 - MSU09	-4.127145	-4.131831	-4.122883	0.004686	-0.004262
PILAR01 - MSU10	-4.126240	-4.134427	-4.124093	0.008187	-0.002147
PILAR01 - MSU11	-4.122475	-4.130515	-4.119374	0.008040	-0.003101
PILAR01 - MSU12	-4.125105	-4.129149	-4.114805	0.004044	-0.010300
PILAR01 - MSU13	-4.126210	-4.132341	-4.115681	0.006131	-0.010529
PILAR01 - MSU14	-4.120445	-4.125011	-4.105270	0.004566	-0.015175
PILAR01 - MSU15	-4.122610	-4.128316	-4.105711	0.005706	-0.016899
PILAR01 - MSU16	-4.120320	-4.120418	-4.095049	0.000098	-0.025271
PILAR01 - MSU17	-4.121810	-4.124964	-4.095702	0.003154	-0.026108
PILAR01 - PILAR02	11.294860	11.296247	11.329232	-0.001387	-0.034372

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 9 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



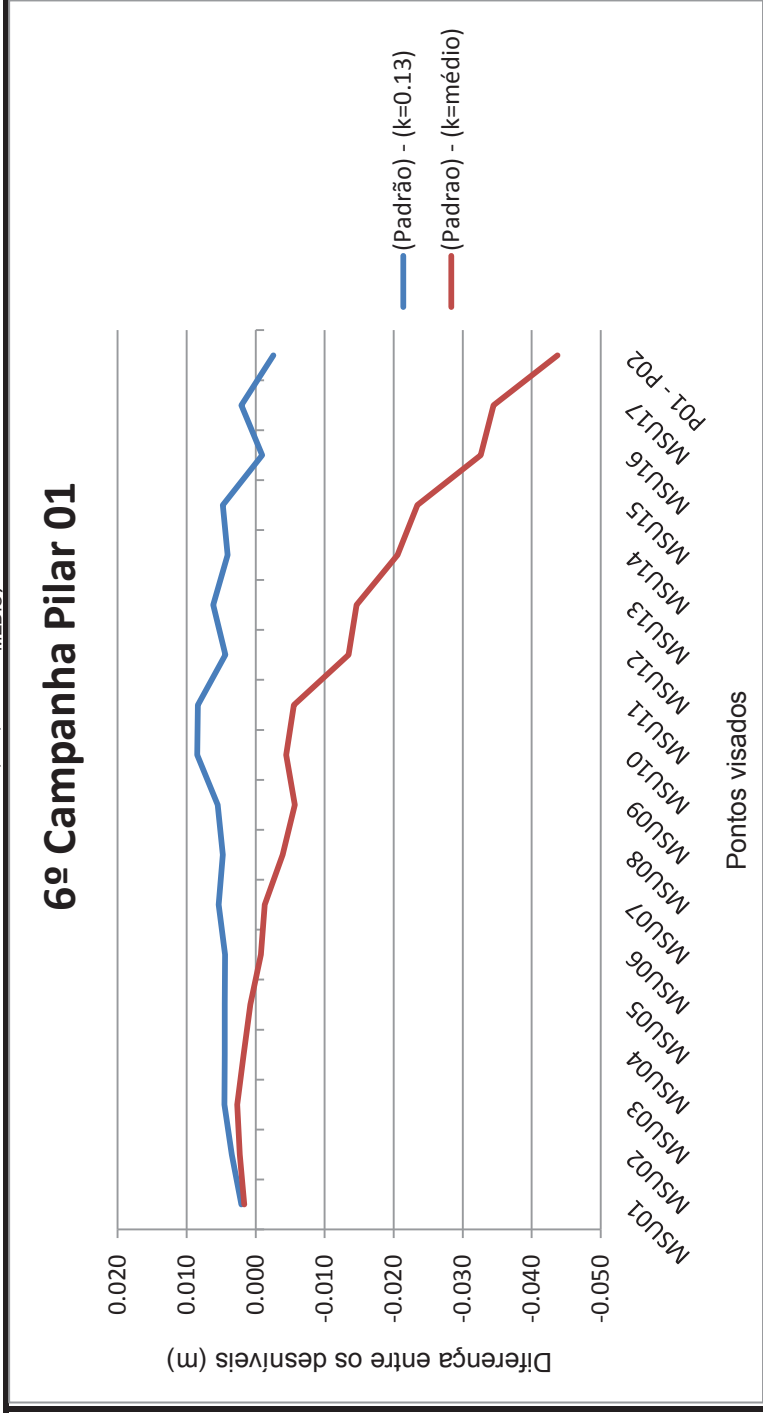
FONTE: Autora (2019).

TABELA 18 – 6º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - MSU01	-4.117810	-4.119880	-4.119455	0.002070	0.001645
PILAR01 - MSU02	-4.121100	-4.124572	-4.123421	0.003472	0.002321
PILAR01 - MSU03	-4.121615	-4.126126	-4.124291	0.004511	0.002676
PILAR01 - MSU04	-4.125120	-4.129619	-4.126882	0.004499	0.001762
PILAR01 - MSU05	-4.124185	-4.128686	-4.124981	0.004501	0.000796
PILAR01 - MSU06	-4.123635	-4.128067	-4.122867	0.004432	-0.000768
PILAR01 - MSU07	-4.129095	-4.134444	-4.127763	0.005349	-0.001332
PILAR01 - MSU08	-4.127590	-4.132350	-4.123687	0.004760	-0.003903
PILAR01 - MSU09	-4.126330	-4.131831	-4.120668	0.005501	-0.005662
PILAR01 - MSU10	-4.125975	-4.134427	-4.121535	0.008452	-0.004440
PILAR01 - MSU11	-4.122145	-4.130515	-4.116616	0.008370	-0.005529
PILAR01 - MSU12	-4.124735	-4.129149	-4.111254	0.004414	-0.013481
PILAR01 - MSU13	-4.126190	-4.132341	-4.111557	0.006151	-0.014633
PILAR01 - MSU14	-4.120935	-4.125011	-4.100383	0.004076	-0.020552
PILAR01 - MSU15	-4.123550	-4.128316	-4.100115	0.004766	-0.023435
PILAR01 - MSU16	-4.121355	-4.120418	-4.088769	-0.000937	-0.032586
PILAR01 - MSU17	-4.122900	-4.124964	-4.088458	0.002064	-0.034442
PILAR01 - PILAR02	11.293670	11.296247	11.337398	-0.002577	-0.043728

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 10 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



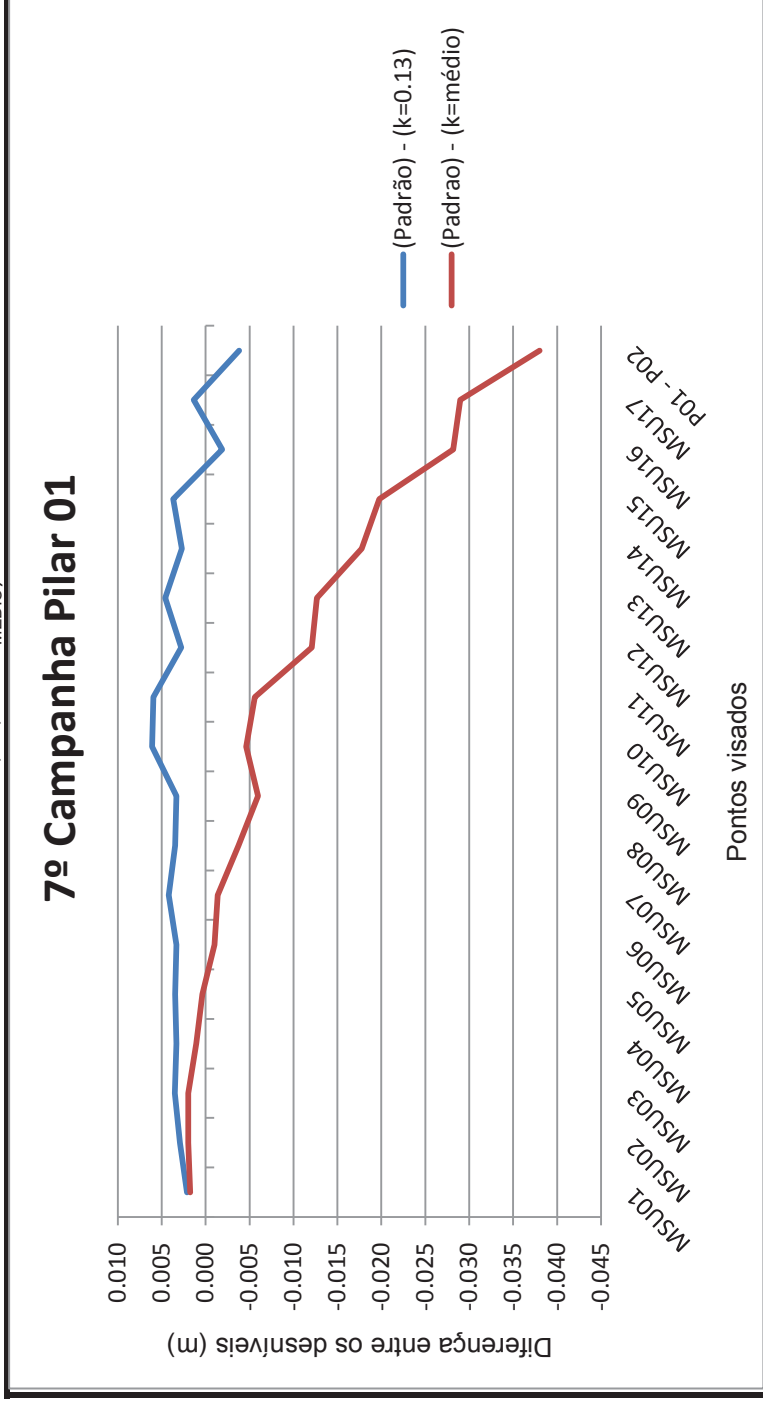
FONTE: Autora (2019).

TABELA 19 – 7º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - MSU01	-4.117755	-4.119880	-4.119527	0.002125	0.001772
PILAR01 - MSU02	-4.121645	-4.124572	-4.123616	0.002927	0.001971
PILAR01 - MSU03	-4.122640	-4.126126	-4.124601	0.003486	0.001961
PILAR01 - MSU04	-4.126285	-4.129619	-4.127345	0.003334	0.001060
PILAR01 - MSU05	-4.125230	-4.128686	-4.125608	0.003456	0.000378
PILAR01 - MSU06	-4.124760	-4.128067	-4.123747	0.003307	-0.001013
PILAR01 - MSU07	-4.130260	-4.134444	-4.128894	0.004184	-0.001366
PILAR01 - MSU08	-4.128900	-4.132350	-4.125153	0.003450	-0.003747
PILAR01 - MSU09	-4.128510	-4.131831	-4.122557	0.003321	-0.005953
PILAR01 - MSU10	-4.128335	-4.134427	-4.123717	0.006092	-0.004618
PILAR01 - MSU11	-4.124585	-4.130515	-4.118968	0.005930	-0.005617
PILAR01 - MSU12	-4.126380	-4.129149	-4.114282	0.002769	-0.012098
PILAR01 - MSU13	-4.127745	-4.132341	-4.115074	0.004596	-0.012671
PILAR01 - MSU14	-4.122305	-4.125011	-4.104551	0.002706	-0.017754
PILAR01 - MSU15	-4.124635	-4.128316	-4.104887	0.003681	-0.019748
PILAR01 - MSU16	-4.122290	-4.120418	-4.094125	-0.001872	-0.028165
PILAR01 - MSU17	-4.123625	-4.124964	-4.094636	0.001339	-0.028989
PILAR01 - PILAR02	11.292445	11.296247	11.330434	-0.003802	-0.037989

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 11 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



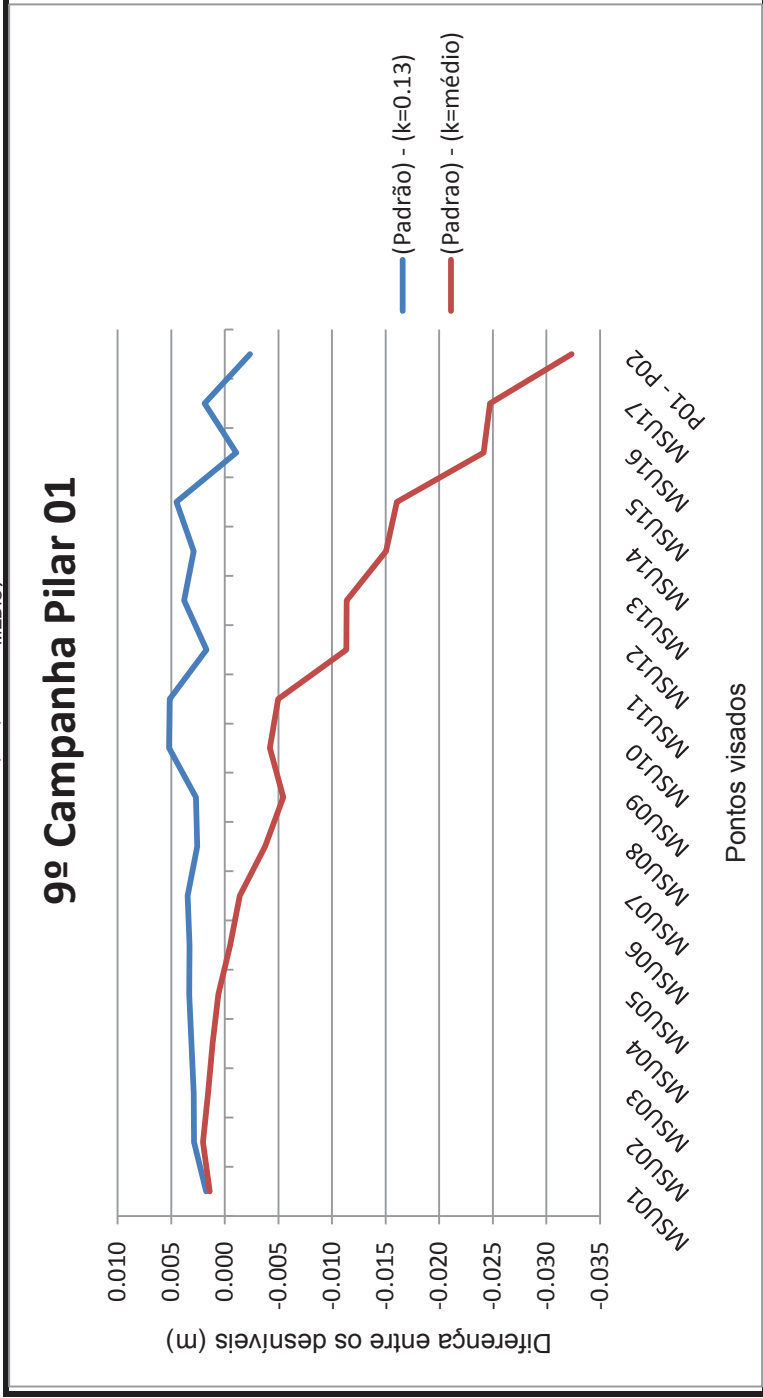
FONTE: Autora (2019).

TABELA 20 – 9º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - MSU01	-4.118160	-4.119880	-4.119570	0.001720	0.001410
PILAR01 - MSU02	-4.121710	-4.124572	-4.123732	0.002862	0.002022
PILAR01 - MSU03	-4.123220	-4.126126	-4.124787	0.002906	0.001567
PILAR01 - MSU04	-4.126500	-4.129619	-4.127623	0.003119	0.001123
PILAR01 - MSU05	-4.125380	-4.128686	-4.125984	0.003306	0.000604
PILAR01 - MSU06	-4.124780	-4.128067	-4.124274	0.003287	-0.000506
PILAR01 - MSU07	-4.130980	-4.134444	-4.129572	0.003464	-0.001408
PILAR01 - MSU08	-4.129780	-4.132350	-4.126033	0.002570	-0.003747
PILAR01 - MSU09	-4.129150	-4.131831	-4.123690	0.002681	-0.005460
PILAR01 - MSU10	-4.129230	-4.134427	-4.125025	0.005197	-0.004205
PILAR01 - MSU11	-4.125370	-4.130515	-4.120379	0.005145	-0.004991
PILAR01 - MSU12	-4.127450	-4.129149	-4.116098	0.001699	-0.011352
PILAR01 - MSU13	-4.128550	-4.132341	-4.117184	0.003791	-0.011366
PILAR01 - MSU14	-4.122100	-4.125011	-4.107050	0.002911	-0.015050
PILAR01 - MSU15	-4.123810	-4.128316	-4.107749	0.004506	-0.016061
PILAR01 - MSU16	-4.121490	-4.120418	-4.097337	-0.001072	-0.024153
PILAR01 - MSU17	-4.123080	-4.124964	-4.098341	0.001884	-0.024739
PILAR01 - PILAR02	11.293900	11.296247	11.326258	-0.002347	-0.032358

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 12 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



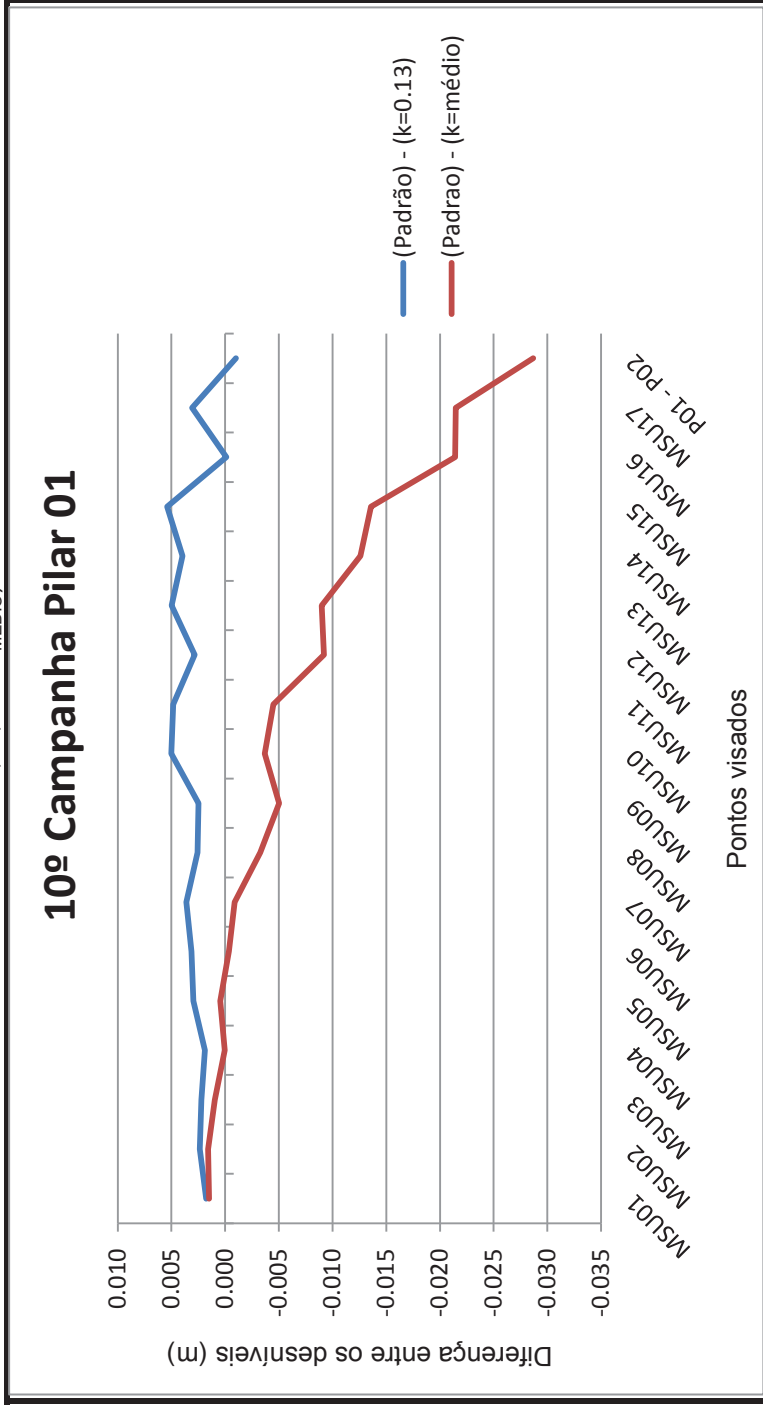
FONTE: Autora (2019).

TABELA 21 – 10º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - MSU01	-4.118110	-4.119880	-4.119594	0.001770	0.001484
PILAR01 - MSU02	-4.122210	-4.124572	-4.123798	0.002362	0.001588
PILAR01 - MSU03	-4.123920	-4.126126	-4.124891	0.002206	0.000971
PILAR01 - MSU04	-4.127750	-4.129619	-4.127778	0.001869	0.000028
PILAR01 - MSU05	-4.125730	-4.128686	-4.126194	0.002956	0.000464
PILAR01 - MSU06	-4.124930	-4.128067	-4.124569	0.003137	-0.000361
PILAR01 - MSU07	-4.130830	-4.134444	-4.129950	0.003614	-0.000880
PILAR01 - MSU08	-4.129780	-4.132350	-4.126523	0.002570	-0.003257
PILAR01 - MSU09	-4.129350	-4.131831	-4.124321	0.002481	-0.005029
PILAR01 - MSU10	-4.129430	-4.134427	-4.125755	0.004997	-0.003675
PILAR01 - MSU11	-4.125670	-4.130515	-4.121165	0.004845	-0.004505
PILAR01 - MSU12	-4.126300	-4.129149	-4.117111	0.002849	-0.009189
PILAR01 - MSU13	-4.127350	-4.132341	-4.118360	0.004991	-0.008990
PILAR01 - MSU14	-4.121050	-4.125011	-4.108444	0.003961	-0.012606
PILAR01 - MSU15	-4.122910	-4.128316	-4.109345	0.005406	-0.013565
PILAR01 - MSU16	-4.120540	-4.120418	-4.099127	-0.000122	-0.021413
PILAR01 - MSU17	-4.121880	-4.124964	-4.100406	0.003084	-0.021474
PILAR01 - PILAR02	11.295250	11.296247	11.323930	-0.000997	-0.028680

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 13 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



FONTE: Autora (2019).

TABELA 22 – 11º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - MSU01	-4.117610	-4.119880	-4.119463	0.002270	0.001853
PILAR01 - MSU02	-4.120860	-4.124572	-4.123442	0.003712	0.002582
PILAR01 - MSU03	-4.122370	-4.126126	-4.124325	0.003756	0.001955
PILAR01 - MSU04	-4.126250	-4.129619	-4.126933	0.003369	0.000683
PILAR01 - MSU05	-4.123830	-4.128686	-4.125050	0.004856	0.001220
PILAR01 - MSU06	-4.123130	-4.128067	-4.122963	0.004937	-0.000167
PILAR01 - MSU07	-4.129180	-4.134444	-4.127887	0.005264	-0.001293
PILAR01 - MSU08	-4.128030	-4.132350	-4.123848	0.004320	-0.004182
PILAR01 - MSU09	-4.127650	-4.131831	-4.120875	0.004181	-0.006775
PILAR01 - MSU10	-4.128030	-4.134427	-4.121775	0.006397	-0.006255
PILAR01 - MSU11	-4.124320	-4.130515	-4.116874	0.006195	-0.007446
PILAR01 - MSU12	-4.125850	-4.129149	-4.111586	0.003299	-0.014264
PILAR01 - MSU13	-4.127500	-4.132341	-4.111943	0.004841	-0.015557
PILAR01 - MSU14	-4.119450	-4.125011	-4.100841	0.005561	-0.018609
PILAR01 - MSU15	-4.121210	-4.128316	-4.100639	0.007106	-0.020571
PILAR01 - MSU16	-4.118540	-4.120418	-4.089357	0.001878	-0.029183
PILAR01 - MSU17	-4.120080	-4.124964	-4.089136	0.004884	-0.030944
PILAR01 - PILAR02	11.290850	11.296247	11.336634	-0.005397	-0.045784

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 14 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)

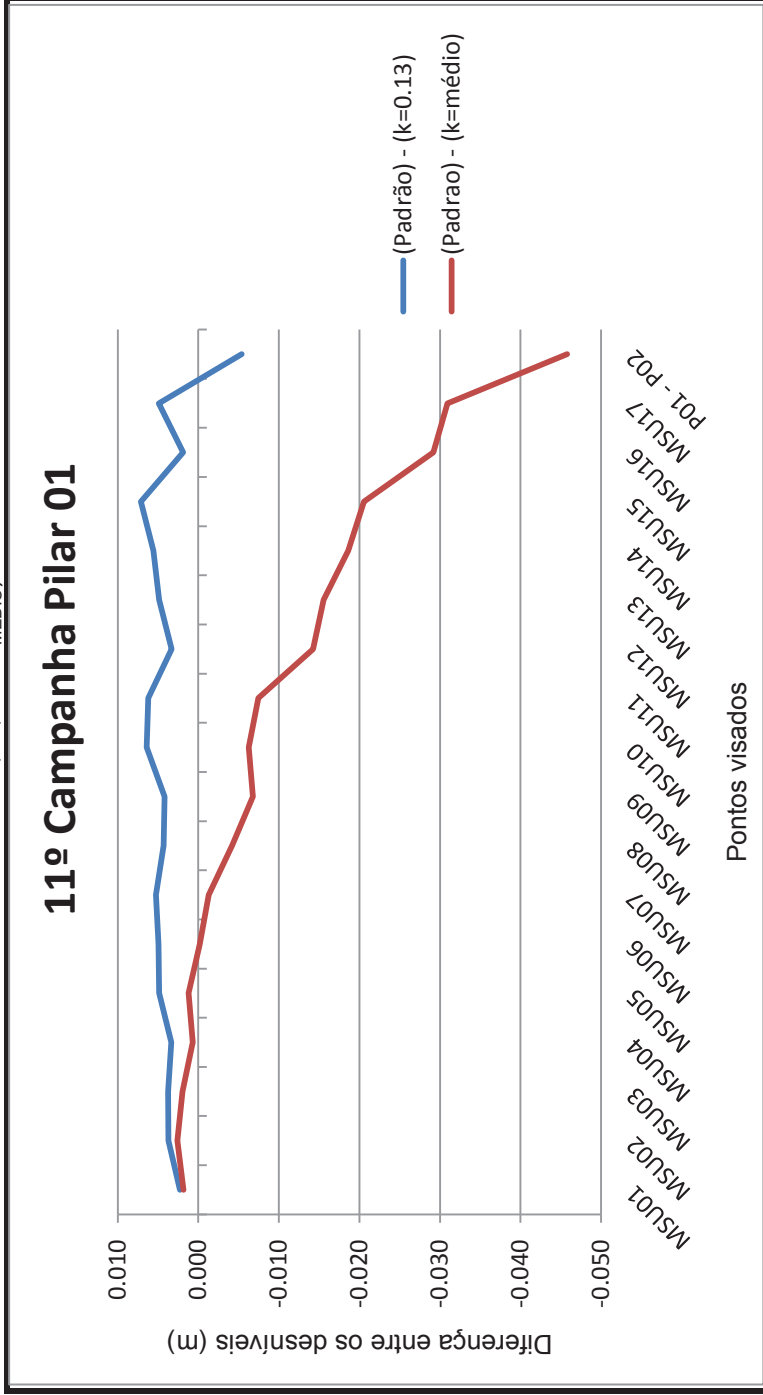
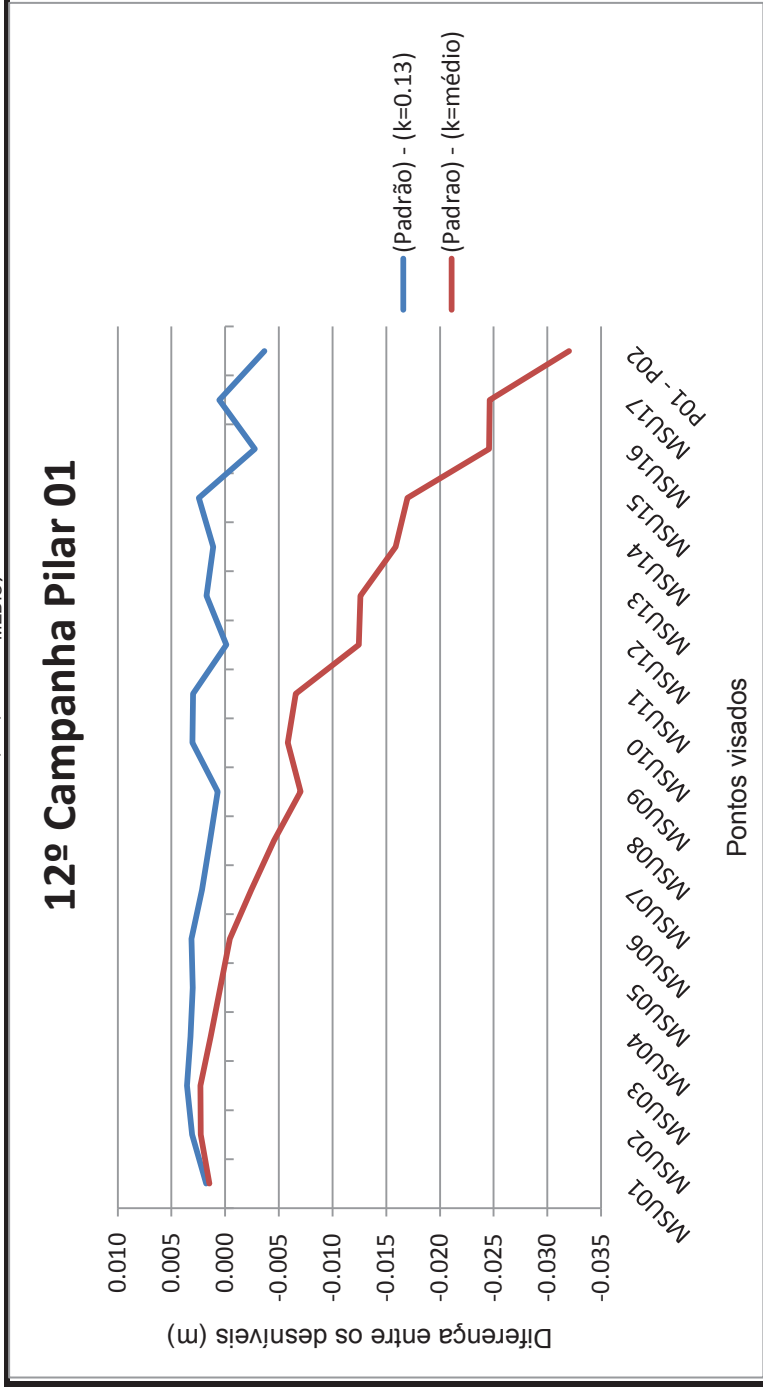


TABELA 23 – 12º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - MSU01	-4.118110	-4.119880	-4.119625	0.001770	0.001515
PILAR01 - MSU02	-4.121510	-4.124572	-4.123880	0.003062	0.002370
PILAR01 - MSU03	-4.122570	-4.126126	-4.125022	0.003556	0.002452
PILAR01 - MSU04	-4.126400	-4.129619	-4.127973	0.003219	0.001573
PILAR01 - MSU05	-4.125680	-4.128686	-4.126458	0.003006	0.000778
PILAR01 - MSU06	-4.124930	-4.128067	-4.124940	0.003137	0.000010
PILAR01 - MSU07	-4.132280	-4.134444	-4.130426	0.002164	-0.001854
PILAR01 - MSU08	-4.130930	-4.132350	-4.127141	0.001420	-0.003789
PILAR01 - MSU09	-4.131150	-4.131831	-4.125118	0.000681	-0.006032
PILAR01 - MSU10	-4.131380	-4.134427	-4.126674	0.003047	-0.004706
PILAR01 - MSU11	-4.127520	-4.130515	-4.122157	0.002995	-0.005363
PILAR01 - MSU12	-4.129250	-4.129149	-4.118387	-0.000101	-0.010863
PILAR01 - MSU13	-4.130600	-4.132341	-4.119842	0.001741	-0.010758
PILAR01 - MSU14	-4.123900	-4.125011	-4.110201	0.001111	-0.013699
PILAR01 - MSU15	-4.125860	-4.128316	-4.111357	0.002456	-0.014503
PILAR01 - MSU16	-4.123190	-4.120418	-4.101385	-0.002772	-0.021805
PILAR01 - MSU17	-4.124430	-4.124964	-4.103010	0.000534	-0.021420
PILAR01 - PILAR02	11.292600	11.296247	11.324605	-0.003647	-0.032005

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 15 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



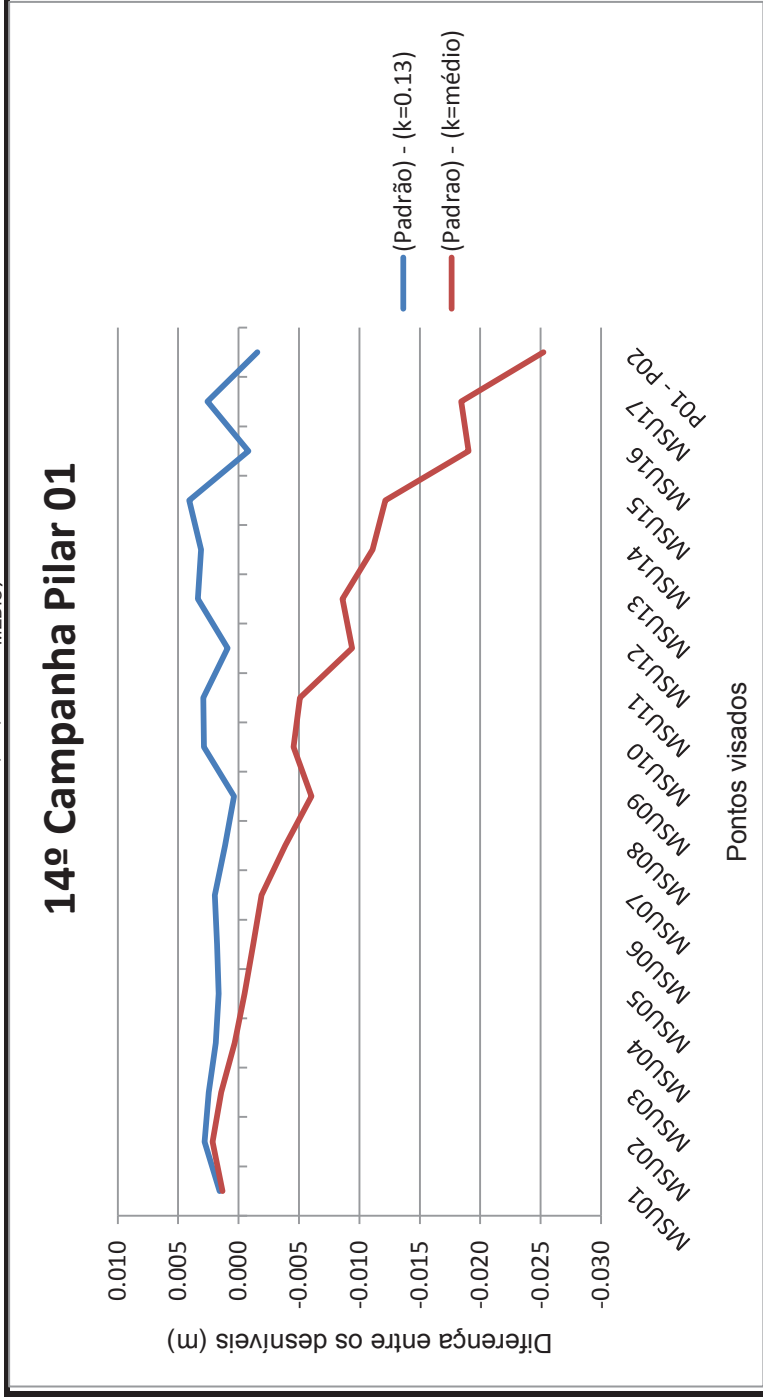
FONTE: Autora (2019).

TABELA 24 – 14º CAMPANHA A PARTIR DE PILAR 01 [VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - MSU01	-4.118305	-4.119880	-4.119636	0.001575	0.001331
PILAR01 - MSU02	-4.121760	-4.124572	-4.123910	0.002812	0.002150
PILAR01 - MSU03	-4.123645	-4.126126	-4.125070	0.002481	0.001425
PILAR01 - MSU04	-4.127730	-4.129619	-4.128044	0.001889	0.000314
PILAR01 - MSU05	-4.127040	-4.128686	-4.126554	0.001646	-0.000486
PILAR01 - MSU06	-4.126290	-4.128067	-4.125075	0.001777	-0.001215
PILAR01 - MSU07	-4.132490	-4.134444	-4.130600	0.001954	-0.001890
PILAR01 - MSU08	-4.131230	-4.132350	-4.127366	0.001120	-0.003864
PILAR01 - MSU09	-4.131445	-4.131831	-4.125408	0.000386	-0.006037
PILAR01 - MSU10	-4.131555	-4.134427	-4.127010	0.002872	-0.004545
PILAR01 - MSU11	-4.127595	-4.130515	-4.122518	0.002920	-0.005077
PILAR01 - MSU12	-4.128245	-4.129149	-4.118853	0.000904	-0.009392
PILAR01 - MSU13	-4.128985	-4.132341	-4.120383	0.003356	-0.008602
PILAR01 - MSU14	-4.121920	-4.125011	-4.110842	0.003091	-0.011078
PILAR01 - MSU15	-4.124240	-4.128316	-4.112091	0.004076	-0.012149
PILAR01 - MSU16	-4.121245	-4.120418	-4.102209	-0.000827	-0.019036
PILAR01 - MSU17	-4.122390	-4.124964	-4.103960	0.002574	-0.018430
PILAR01 - PILAR02	11.294700	11.296247	11.319923	-0.001547	-0.025223

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 16 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



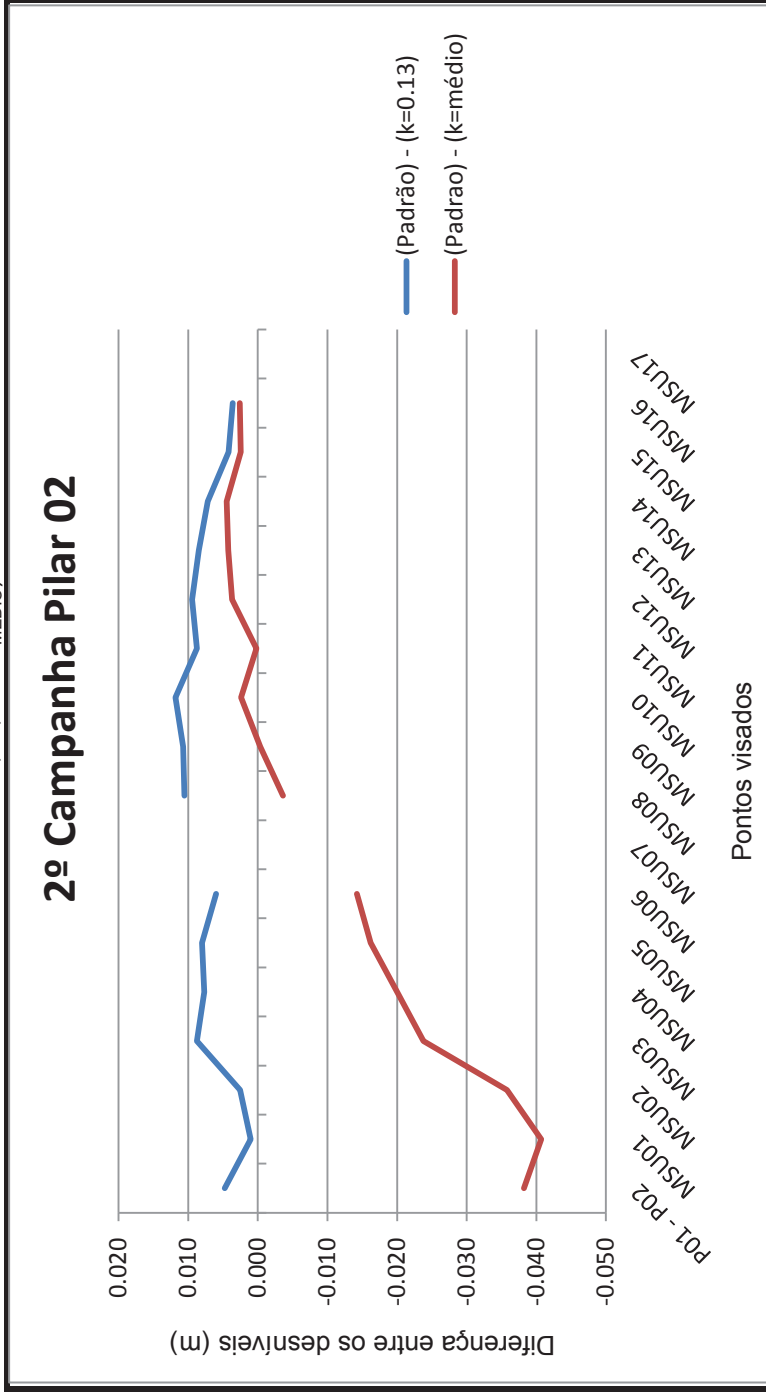
FONTE: Autora (2019).

TABELA 25 – 2º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIACÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - PILAR02	-11.296235	-11.301001	-11.258002	0.004766	-0.038233
PILAR02 - MSU01	-15.414330	-15.415349	-15.373613	0.001019	-0.040717
PILAR02 - MSU02	-15.418085	-15.420649	-15.382278	0.002564	-0.035807
PILAR02 - MSU03	-15.418805	-15.427580	-15.395034	0.008775	-0.023771
PILAR02 - MSU04	-15.421395	-15.429089	-15.401368	0.007694	-0.020027
PILAR02 - MSU05	-15.419675	-15.427672	-15.403459	0.007997	-0.016216
PILAR02 - MSU06	-15.418655	-15.424667	-15.404421	0.006012	-0.014234
PILAR02 - MSU07*	-15.424415				
PILAR02 - MSU08	-15.423590	-15.434119	-15.419979	0.010529	-0.003611
PILAR02 - MSU09	-15.421930	-15.432668	-15.421567	0.010738	-0.000363
PILAR02 - MSU10	-15.421070	-15.432883	-15.423477	0.011813	0.002407
PILAR02 - MSU11	-15.417100	-15.425843	-15.417303	0.008743	0.000203
PILAR02 - MSU12	-15.419405	-15.428843	-15.423092	0.009438	0.003687
PILAR02 - MSU13	-15.420500	-15.429001	-15.424755	0.008501	0.004255
PILAR02 - MSU14	-15.414675	-15.421888	-15.419157	0.007213	0.004482
PILAR02 - MSU15	-15.417495	-15.421688	-15.419972	0.004193	0.002477
PILAR02 - MSU16	-15.415325	-15.418927	-15.417901	0.003602	0.002576
PILAR02 - MSU17*	-15.416970				

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 17 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



FONTE: Autora (2019).

TABELA 26 – 3º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($K_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - PILAR02	-11.296375	-11.301001	-11.267716	-0.004626	-0.028659
PILAR02 - MSU01	-15.414715	-15.415349	-15.383041	0.000634	-0.031674
PILAR02 - MSU02	-15.418675	-15.420649	-15.390946	0.001974	-0.027729
PILAR02 - MSU03	-15.420130	-15.427580	-15.402387	0.007450	-0.017743
PILAR02 - MSU04	-15.423055	-15.429089	-15.407631	0.006034	-0.015424
PILAR02 - MSU05	-15.421615	-15.427672	-15.408929	0.006057	-0.012686
PILAR02 - MSU06	-15.420730	-15.424667	-15.408994	0.003937	-0.011736
PILAR02 - MSU07*	-15.426540				
PILAR02 - MSU08	-15.425465	-15.434119	-15.423173	0.008654	-0.002292
PILAR02 - MSU09	-15.423970	-15.432668	-15.424074	0.008698	0.000104
PILAR02 - MSU10	-15.423150	-15.432883	-15.425602	0.009733	0.002452
PILAR02 - MSU11	-15.419115	-15.425843	-15.419233	0.006728	0.000118
PILAR02 - MSU12	-15.421420	-15.428843	-15.424391	0.007423	0.002971
PILAR02 - MSU13	-15.422355	-15.429001	-15.425714	0.006646	0.003359
PILAR02 - MSU14	-15.416125	-15.421888	-15.419774	0.005763	0.003649
PILAR02 - MSU15	-15.418600	-15.421688	-15.420359	0.003088	0.001759
PILAR02 - MSU16	-15.416280	-15.418927	-15.418133	0.002647	0.001853
PILAR02 - MSU17*	-15.417710				

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 18 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)

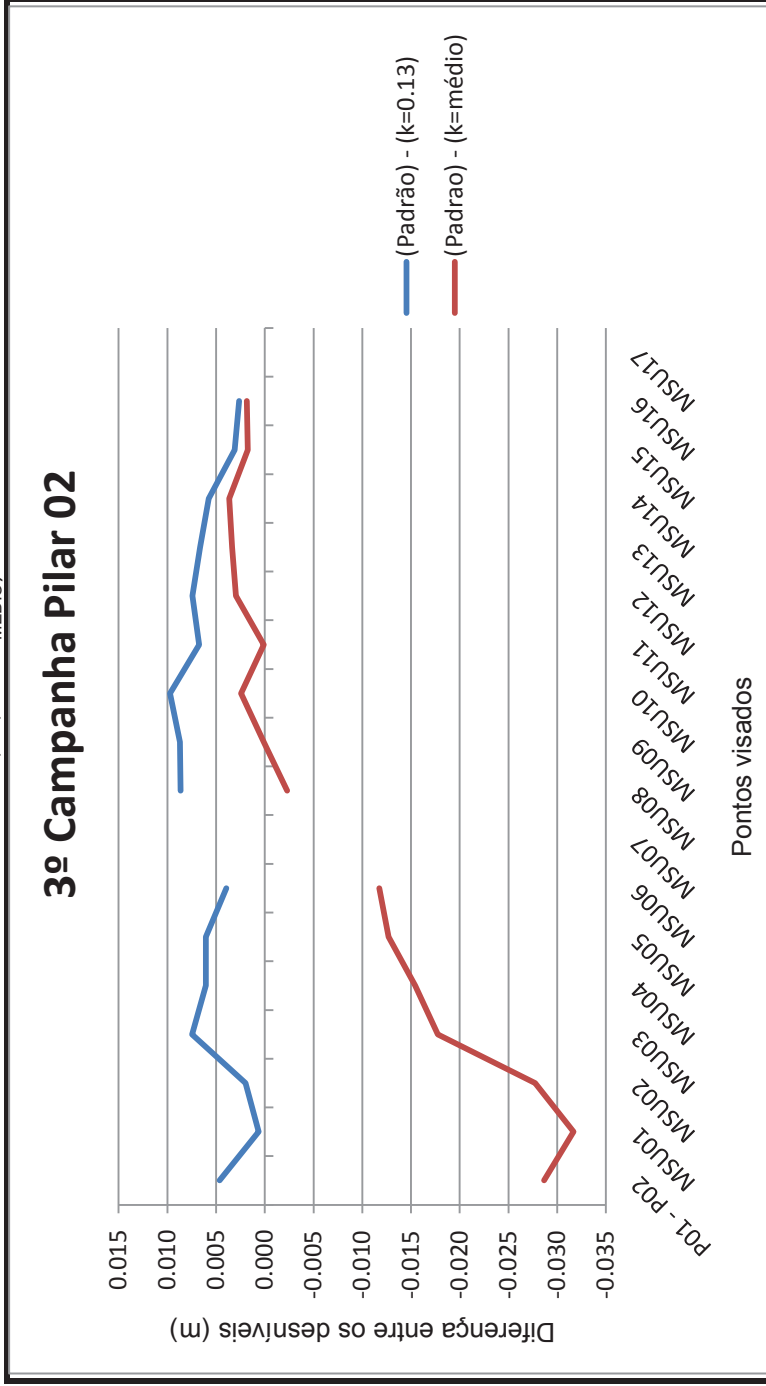
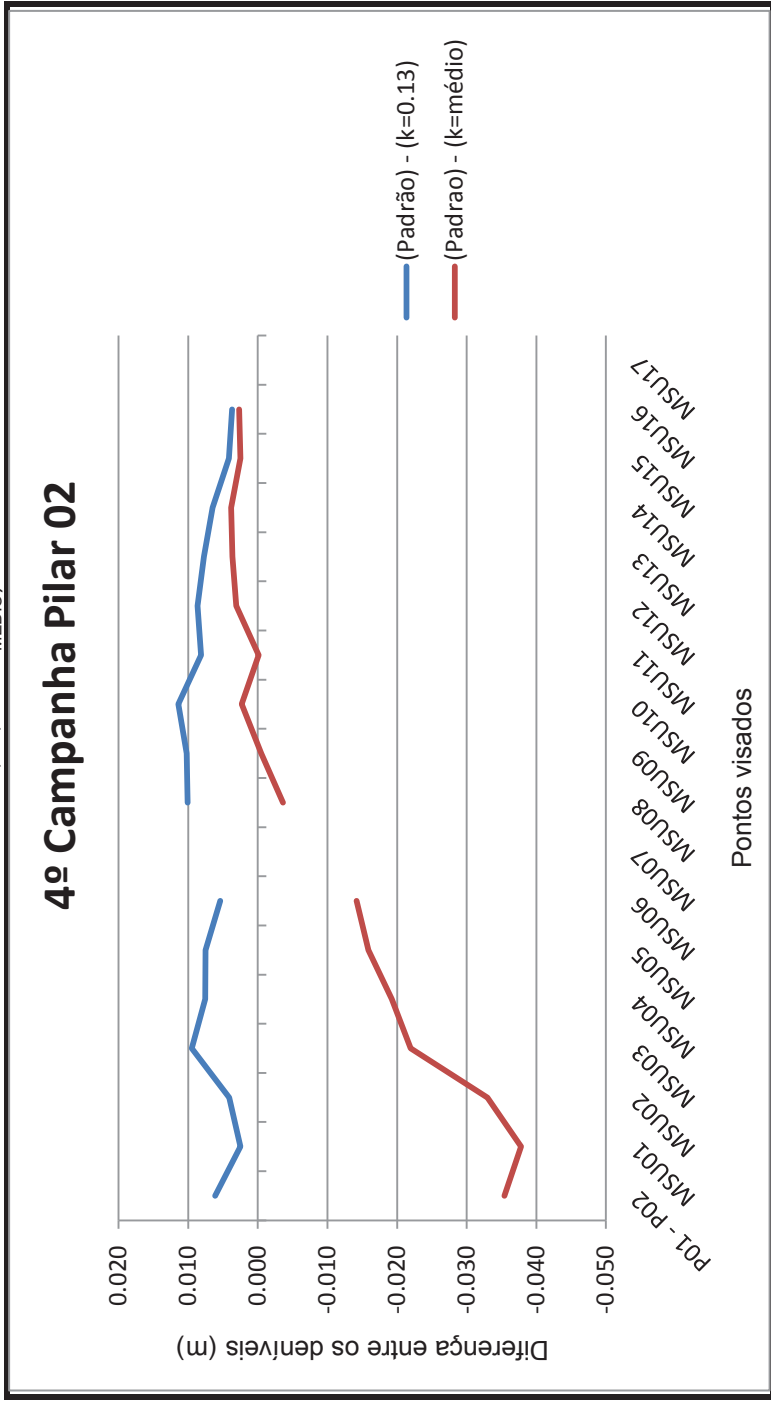


TABELA 27 – 4º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($K_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - PILAR02	-11.294875	-11.301001	-11.259454	0.006126	-0.035421
PILAR02 - MSU01	-15.412835	-15.415349	-15.379529	0.002514	-0.033306
PILAR02 - MSU02	-15.416535	-15.420649	-15.387717	0.004114	-0.028818
PILAR02 - MSU03	-15.418105	-15.427580	-15.399648	0.009475	-0.018457
PILAR02 - MSU04	-15.421540	-15.429089	-15.405298	0.007549	-0.016242
PILAR02 - MSU05	-15.420175	-15.427672	-15.406892	0.007497	-0.013283
PILAR02 - MSU06	-15.419270	-15.424667	-15.407290	0.005397	-0.011980
PILAR02 - MSU07*	-15.424990				
PILAR02 - MSU08	-15.424050	-15.434119	-15.421983	0.010069	-0.002067
PILAR02 - MSU09	-15.422435	-15.432668	-15.423140	0.010233	0.000705
PILAR02 - MSU10	-15.421470	-15.432883	-15.424810	0.011413	0.003340
PILAR02 - MSU11	-15.417700	-15.425843	-15.418514	0.008143	0.000814
PILAR02 - MSU12	-15.420165	-15.428843	-15.423907	0.008678	0.003742
PILAR02 - MSU13	-15.421250	-15.429001	-15.425357	0.007751	0.004107
PILAR02 - MSU14	-15.415395	-15.421888	-15.419544	0.006493	0.004149
PILAR02 - MSU15	-15.417575	-15.421688	-15.420215	0.004173	0.002700
PILAR02 - MSU16	-15.415250	-15.418927	-15.418046	0.003677	0.002796
PILAR02 - MSU17*	-15.416695				

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 19 – VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



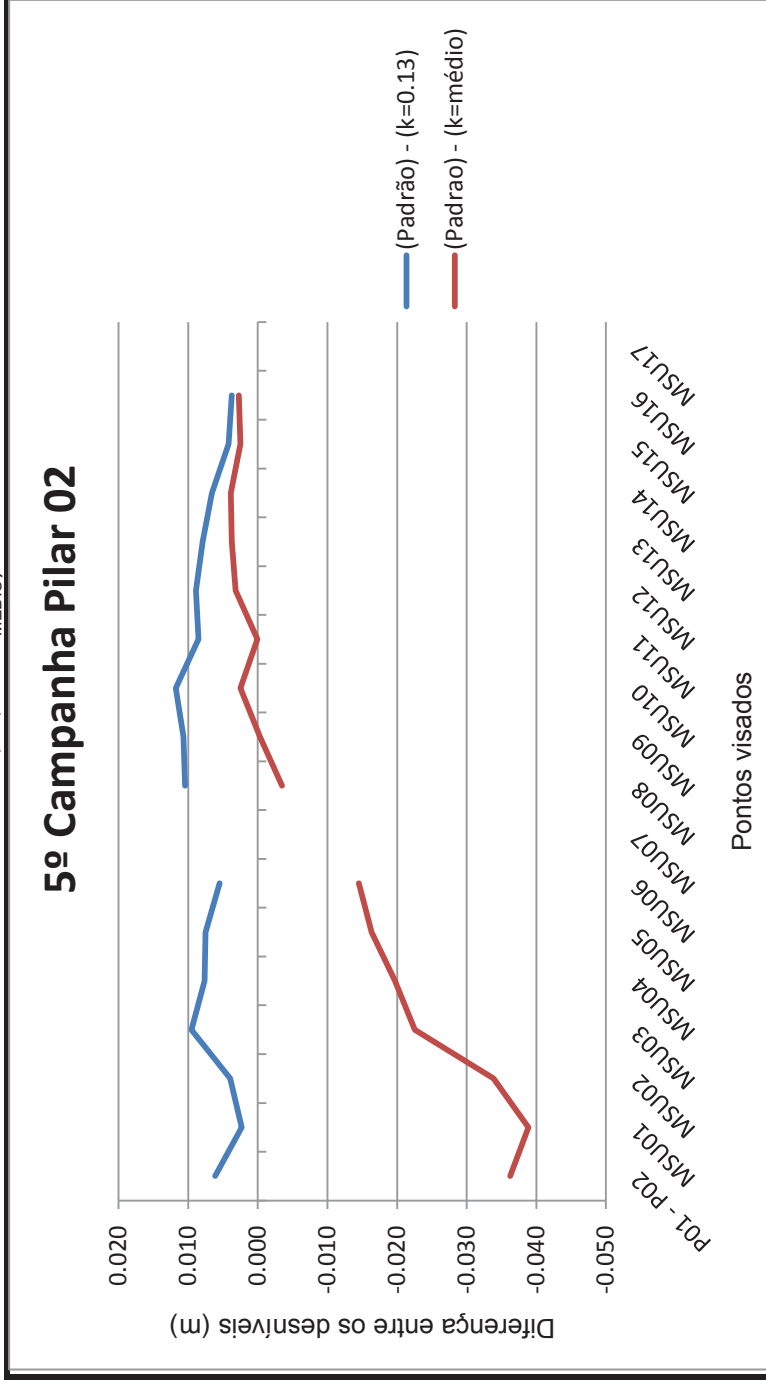
FONTE: Autora (2019).

TABELA 28 – 5º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIACÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - PILAR02	-11.294860	-11.301001	-11.258605	-0.006141	-0.036255
PILAR02 - MSU01	-15.413050	-15.415349	-15.374198	0.002299	-0.038852
PILAR02 - MSU02	-15.416655	-15.420649	-15.382816	0.003994	-0.033839
PILAR02 - MSU03	-15.418025	-15.427580	-15.395491	0.009555	-0.022534
PILAR02 - MSU04	-15.421450	-15.429089	-15.401757	0.007639	-0.019693
PILAR02 - MSU05	-15.420155	-15.427672	-15.403799	0.007517	-0.016356
PILAR02 - MSU06	-15.419190	-15.424667	-15.404704	0.005477	-0.014486
PILAR02 - MSU07*	-15.424780				
PILAR02 - MSU08	-15.423670	-15.434119	-15.420177	0.010449	-0.003493
PILAR02 - MSU09	-15.422005	-15.432668	-15.421722	0.010663	-0.000283
PILAR02 - MSU10	-15.421100	-15.432883	-15.423609	0.011783	0.002509
PILAR02 - MSU11	-15.417335	-15.425843	-15.417423	0.008508	0.000088
PILAR02 - MSU12	-15.421965	-15.428843	-15.423172	0.008878	0.003207
PILAR02 - MSU13	-15.421070	-15.429001	-15.424814	0.007931	0.003744
PILAR02 - MSU14	-15.415305	-15.421888	-15.419196	0.006583	0.003891
PILAR02 - MSU15	-15.417470	-15.421688	-15.419996	0.004218	0.002526
PILAR02 - MSU16	-15.415180	-15.418927	-15.417915	0.003747	0.002735
PILAR02 - MSU17*	-15.416670				

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 20 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



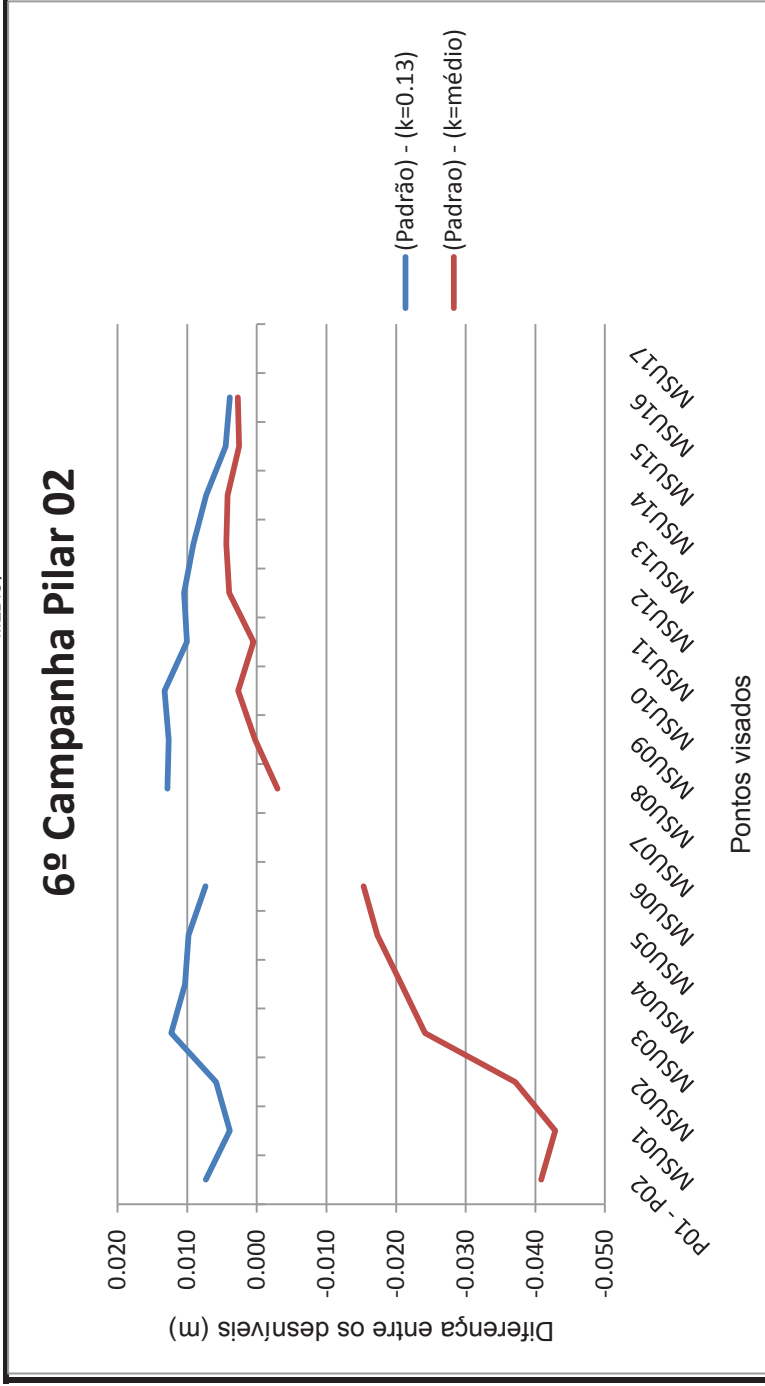
FONTE: Autora (2019).

TABELA 29 – 6º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - PILAR02	-11.293670	-11.301001	-11.252839	0.007331	-0.040831
PILAR02 - MSU01	-15.411480	-15.415349	-15.368602	0.003869	-0.042878
PILAR02 - MSU02	-15.414770	-15.420649	-15.377670	0.005879	-0.037100
PILAR02 - MSU03	-15.415285	-15.427580	-15.391126	0.012295	-0.024159
PILAR02 - MSU04	-15.418790	-15.429089	-15.398040	0.010299	-0.020750
PILAR02 - MSU05	-15.417855	-15.427672	-15.400552	0.009817	-0.017303
PILAR02 - MSU06	-15.417305	-15.424667	-15.401990	0.007362	-0.015315
PILAR02 - MSU07*	-15.422765				
PILAR02 - MSU08	-15.421260	-15.434119	-15.418281	0.012859	-0.002979
PILAR02 - MSU09	-15.420000	-15.432668	-15.420234	0.012668	0.000234
PILAR02 - MSU10	-15.419645	-15.432883	-15.422347	0.013238	0.002702
PILAR02 - MSU11	-15.415815	-15.425843	-15.416278	0.010028	0.000463
PILAR02 - MSU12	-15.418405	-15.428843	-15.422401	0.010438	0.003996
PILAR02 - MSU13	-15.419960	-15.429001	-15.424245	0.009141	0.004385
PILAR02 - MSU14	-15.414605	-15.421888	-15.418830	0.007283	0.004225
PILAR02 - MSU15	-15.417220	-15.421688	-15.419766	0.004468	0.002546
PILAR02 - MSU16	-15.415025	-15.418927	-15.417778	0.003902	0.002753
PILAR02 - MSU17*	-15.416570				

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 21 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



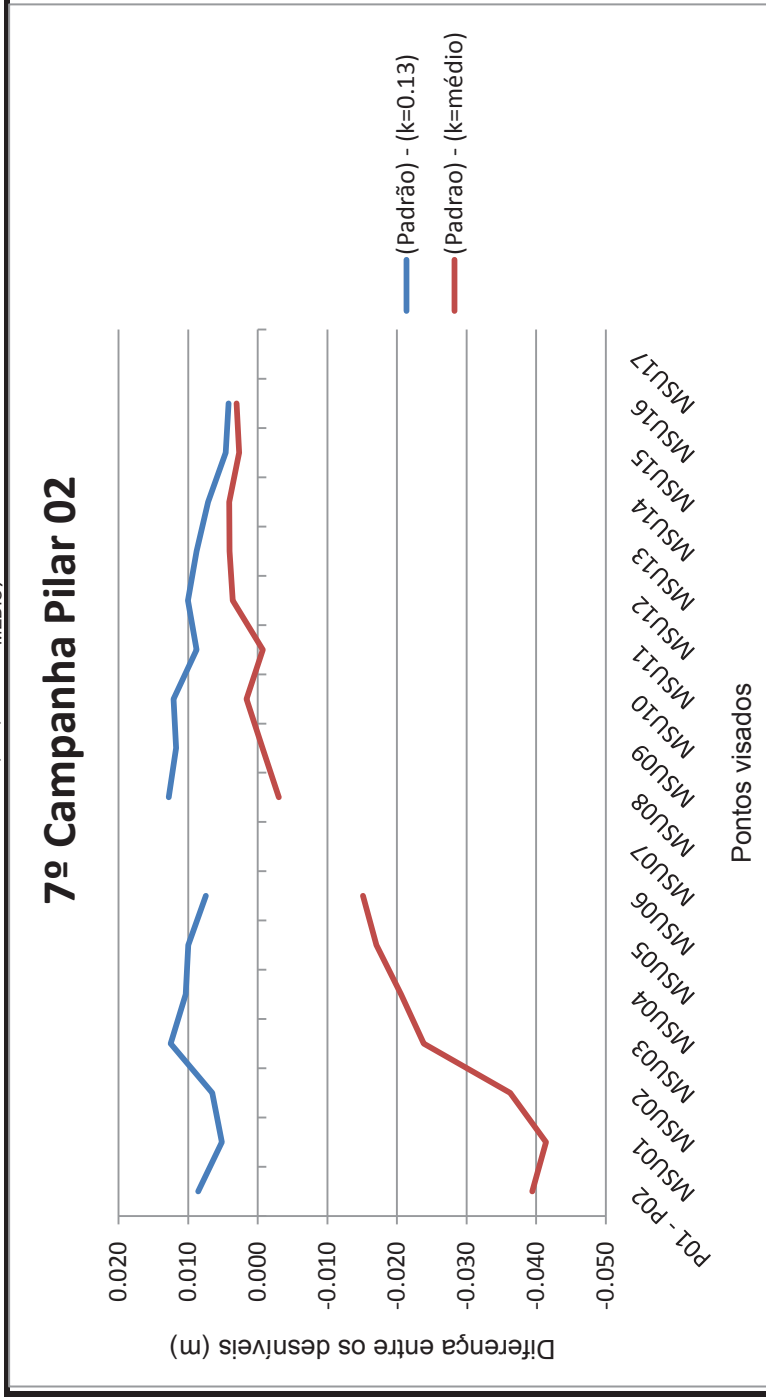
FONTE: Autora (2019).

TABELA 30 – 7º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - PILAR02	-11.292445	-11.301001	-11.253004	0.008556	-0.039441
PILAR02 - MSU01	-15.410200	-15.415349	-15.368762	0.005149	-0.041438
PILAR02 - MSU02	-15.414090	-15.420649	-15.377818	0.006559	-0.036272
PILAR02 - MSU03	-15.415085	-15.427580	-15.391252	0.012495	-0.023833
PILAR02 - MSU04	-15.418730	-15.429089	-15.398146	0.010359	-0.020584
PILAR02 - MSU05	-15.417675	-15.427672	-15.400645	0.009997	-0.017030
PILAR02 - MSU06	-15.417205	-15.424667	-15.402067	0.007462	-0.015138
PILAR02 - MSU07*	-15.422705				
PILAR02 - MSU08	-15.421345	-15.434119	-15.418335	0.012774	-0.003010
PILAR02 - MSU09	-15.420955	-15.432668	-15.420276	0.011713	-0.000679
PILAR02 - MSU10	-15.420780	-15.432883	-15.422384	0.012103	0.001604
PILAR02 - MSU11	-15.417030	-15.425843	-15.416311	0.008813	-0.000719
PILAR02 - MSU12	-15.418825	-15.428843	-15.422423	0.010018	0.003598
PILAR02 - MSU13	-15.420190	-15.429001	-15.424262	0.008811	0.004072
PILAR02 - MSU14	-15.414750	-15.421888	-15.418840	0.007138	0.004090
PILAR02 - MSU15	-15.417080	-15.421688	-15.419772	0.004608	0.002692
PILAR02 - MSU16	-15.414735	-15.418927	-15.417782	0.004192	0.003047
PILAR02 - MSU17*	-15.416070				

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 22 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



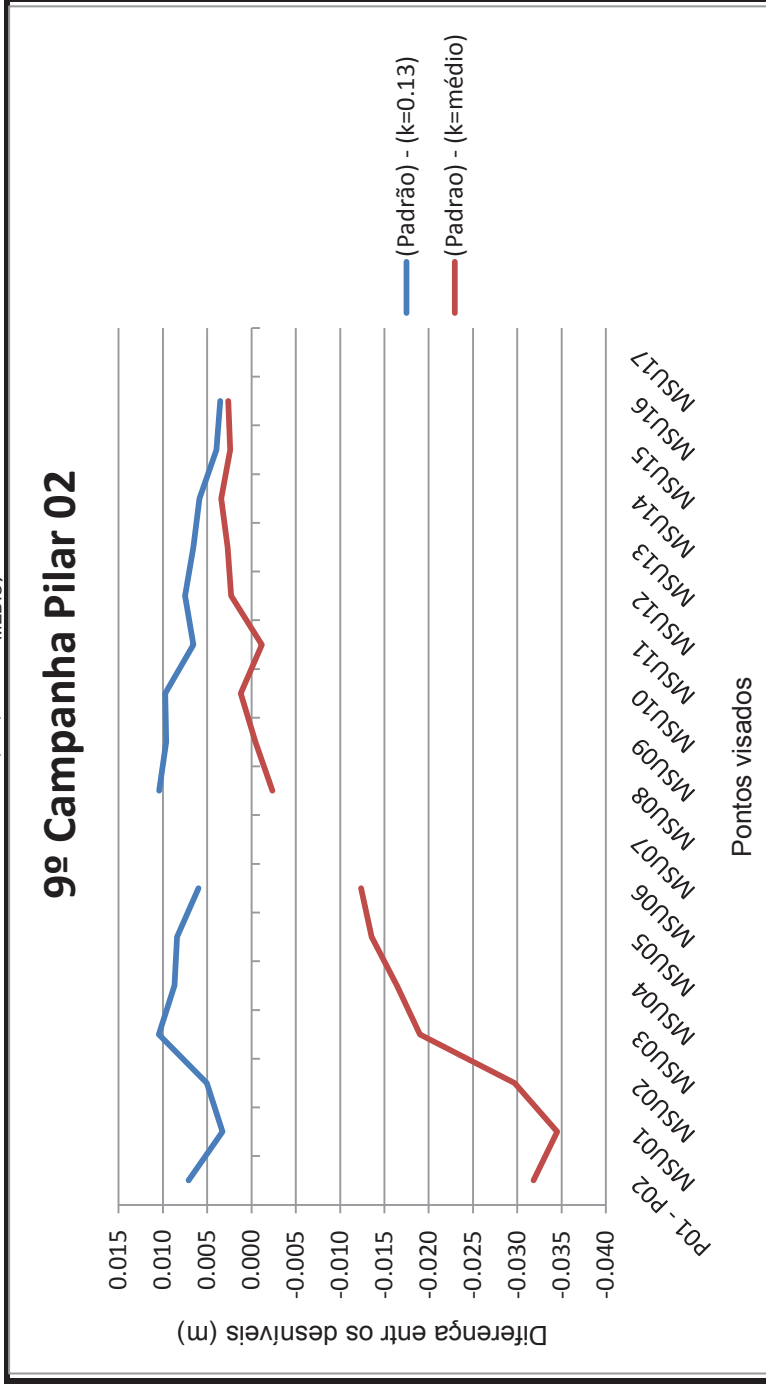
FONTE: Autora (2019).

TABELA 31 – 9º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($K_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - PILAR02	-11.293900	-11.301001	-11.262056	0.007101	-0.031844
PILAR02 - MSU01	-15.412060	-15.415349	-15.377548	0.003289	-0.034512
PILAR02 - MSU02	-15.415610	-15.420649	-15.385895	0.005039	-0.029715
PILAR02 - MSU03	-15.417120	-15.427580	-15.398103	0.010460	-0.019017
PILAR02 - MSU04	-15.420400	-15.429089	-15.403982	0.008689	-0.016418
PILAR02 - MSU05	-15.419280	-15.427672	-15.405742	0.008392	-0.013538
PILAR02 - MSU06	-15.418680	-15.424667	-15.406329	0.005987	-0.012351
PILAR02 - MSU07*	-15.424880				
PILAR02 - MSU08	-15.423680	-15.434119	-15.421312	0.010439	-0.002368
PILAR02 - MSU09	-15.423050	-15.432668	-15.422613	0.009618	-0.000437
PILAR02 - MSU10	-15.423130	-15.432883	-15.424364	0.009753	0.001234
PILAR02 - MSU11	-15.419270	-15.425843	-15.418109	0.006573	-0.001161
PILAR02 - MSU12	-15.421350	-15.428843	-15.423634	0.007493	0.002284
PILAR02 - MSU13	-15.422450	-15.429001	-15.425155	0.006551	0.002705
PILAR02 - MSU14	-15.416000	-15.421888	-15.419415	0.005888	0.003415
PILAR02 - MSU15	-15.417710	-15.421688	-15.420134	0.003978	0.002424
PILAR02 - MSU16	-15.415390	-15.418927	-15.417998	0.003537	0.002608
PILAR02 - MSU17*	-15.416980				

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 23 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



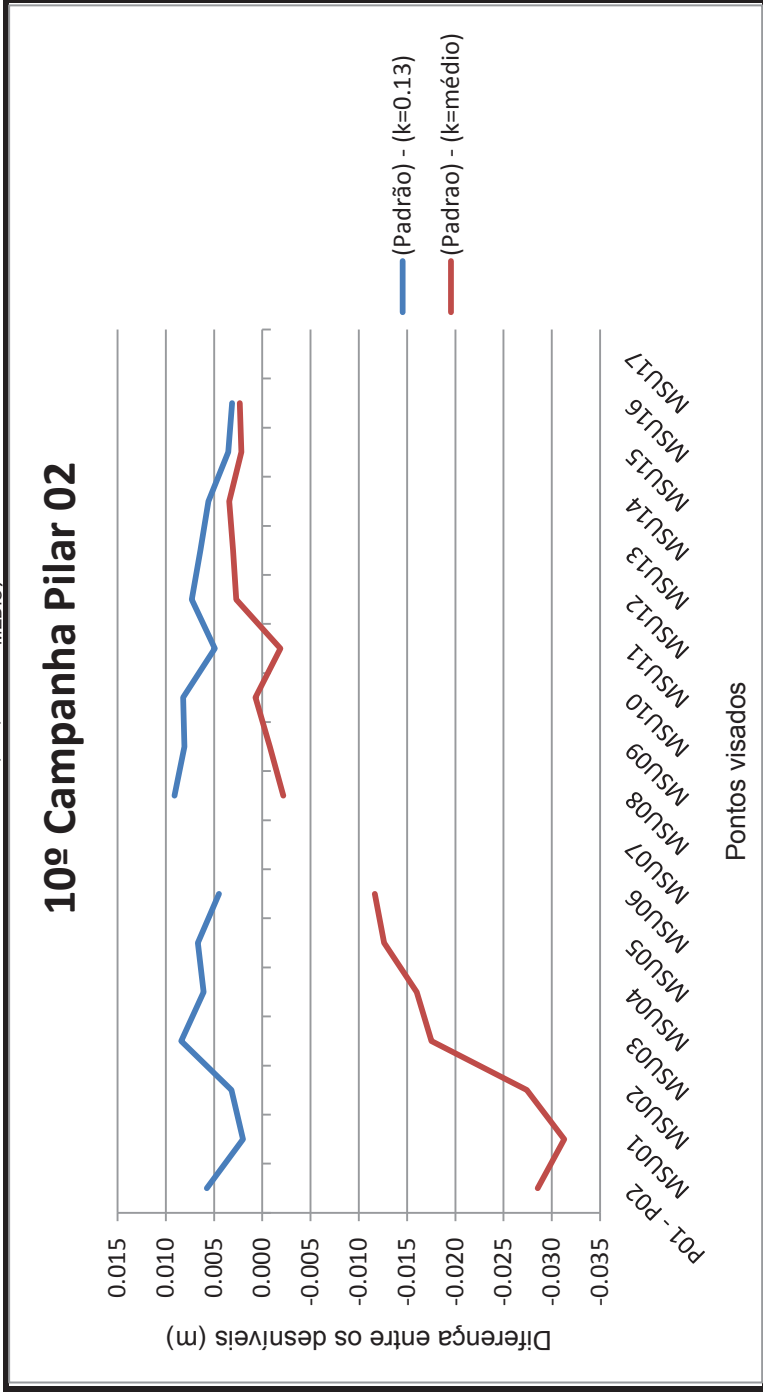
FONTE: Autora (2019).

TABELA 32 – 10º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIAÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - PILAR02	-11.295250	-11.301001	-11.266725	0.005751	-0.028525
PILAR02 - MSU01	-15.413360	-15.415349	-15.382080	0.001989	-0.031280
PILAR02 - MSU02	-15.417460	-15.420649	-15.390062	0.003189	-0.027398
PILAR02 - MSU03	-15.419170	-15.427580	-15.401637	0.008410	-0.017533
PILAR02 - MSU04	-15.423000	-15.429089	-15.406992	0.006089	-0.016008
PILAR02 - MSU05	-15.420980	-15.427672	-15.408371	0.006692	-0.012609
PILAR02 - MSU06	-15.420180	-15.424667	-15.408528	0.004487	-0.011652
PILAR02 - MSU07*	-15.426080				
PILAR02 - MSU08	-15.425030	-15.434119	-15.422848	0.009089	-0.002182
PILAR02 - MSU09	-15.424600	-15.432668	-15.423819	0.008068	-0.000781
PILAR02 - MSU10	-15.424680	-15.432883	-15.425385	0.008203	0.000705
PILAR02 - MSU11	-15.420920	-15.425843	-15.419036	0.004923	-0.001884
PILAR02 - MSU12	-15.421550	-15.428843	-15.424258	0.007293	0.002708
PILAR02 - MSU13	-15.422600	-15.429001	-15.425616	0.006401	0.003016
PILAR02 - MSU14	-15.416300	-15.421888	-15.419711	0.005588	0.003411
PILAR02 - MSU15	-15.418160	-15.421688	-15.420320	0.003528	0.002160
PILAR02 - MSU16	-15.415780	-15.418927	-15.418109	0.003137	0.002319
PILAR02 - MSU17*	-15.417130				

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 24 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



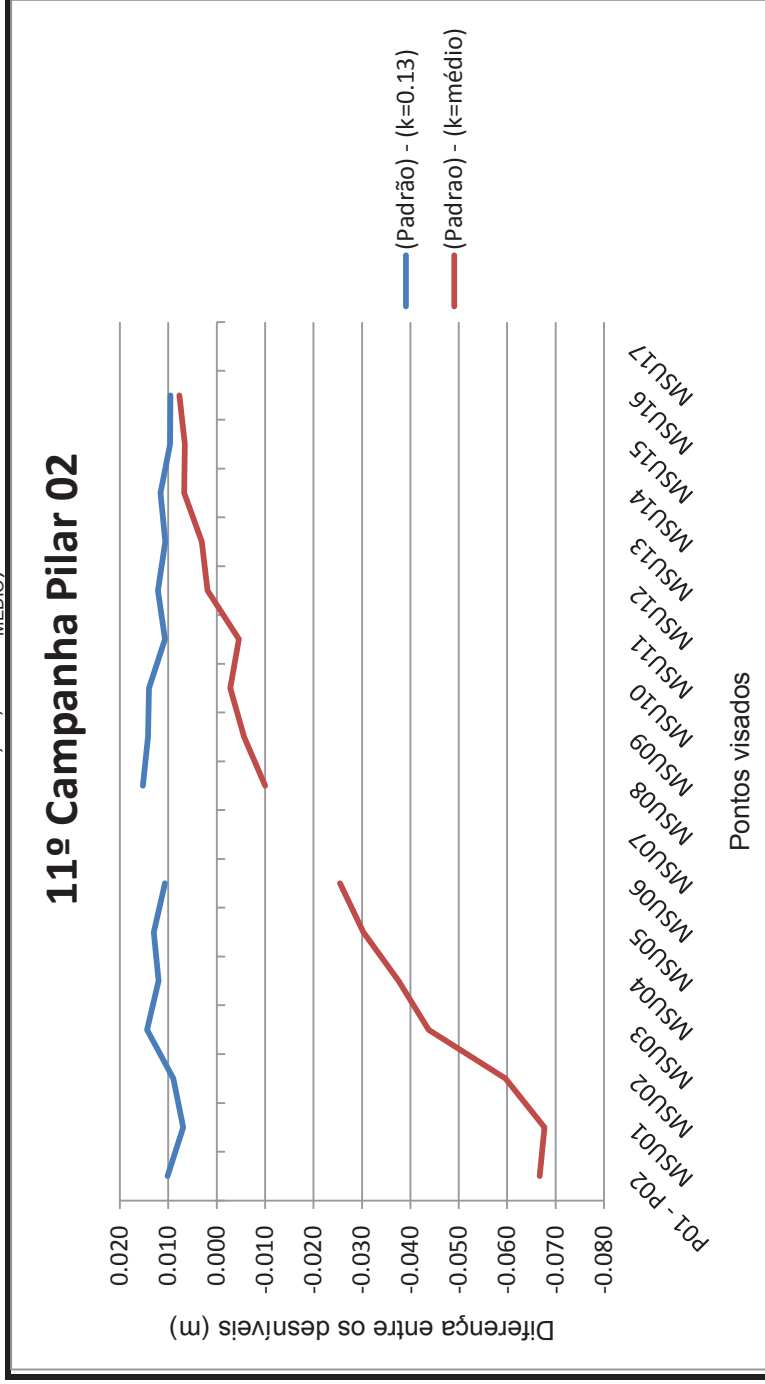
FONTE: Autora (2019).

TABELA 33 – 11º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIACÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - PILAR02	-11.290850	-11.301001	-11.224156	0.001051	-0.066694
PILAR02 - MSU01	-15.408460	-15.415349	-15.340761	0.006889	-0.067699
PILAR02 - MSU02	-15.411710	-15.420649	-15.352074	0.008939	-0.059636
PILAR02 - MSU03	-15.413220	-15.427580	-15.369416	0.014360	-0.043804
PILAR02 - MSU04	-15.417100	-15.429089	-15.379548	0.011989	-0.037552
PILAR02 - MSU05	-15.414680	-15.427672	-15.384401	0.012992	-0.030279
PILAR02 - MSU06	-15.413980	-15.424667	-15.388484	0.010687	-0.025496
PILAR02 - MSU07*	-15.420030				
PILAR02 - MSU08	-15.418880	-15.434119	-15.408848	0.015239	-0.010032
PILAR02 - MSU09	-15.418500	-15.432668	-15.412829	0.014168	-0.005671
PILAR02 - MSU10	-15.418880	-15.432883	-15.416073	0.014003	-0.002807
PILAR02 - MSU11	-15.415170	-15.425843	-15.410582	0.010673	-0.004588
PILAR02 - MSU12	-15.416700	-15.428843	-15.418565	0.012143	0.001865
PILAR02 - MSU13	-15.418350	-15.429001	-15.421413	0.010651	0.003063
PILAR02 - MSU14	-15.410300	-15.421888	-15.417008	0.011588	0.006708
PILAR02 - MSU15	-15.412060	-15.421688	-15.418621	0.009628	0.006561
PILAR02 - MSU16	-15.409390	-15.418927	-15.417093	0.009537	0.007703
PILAR02 - MSU17*	-15.410930				

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 25 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)



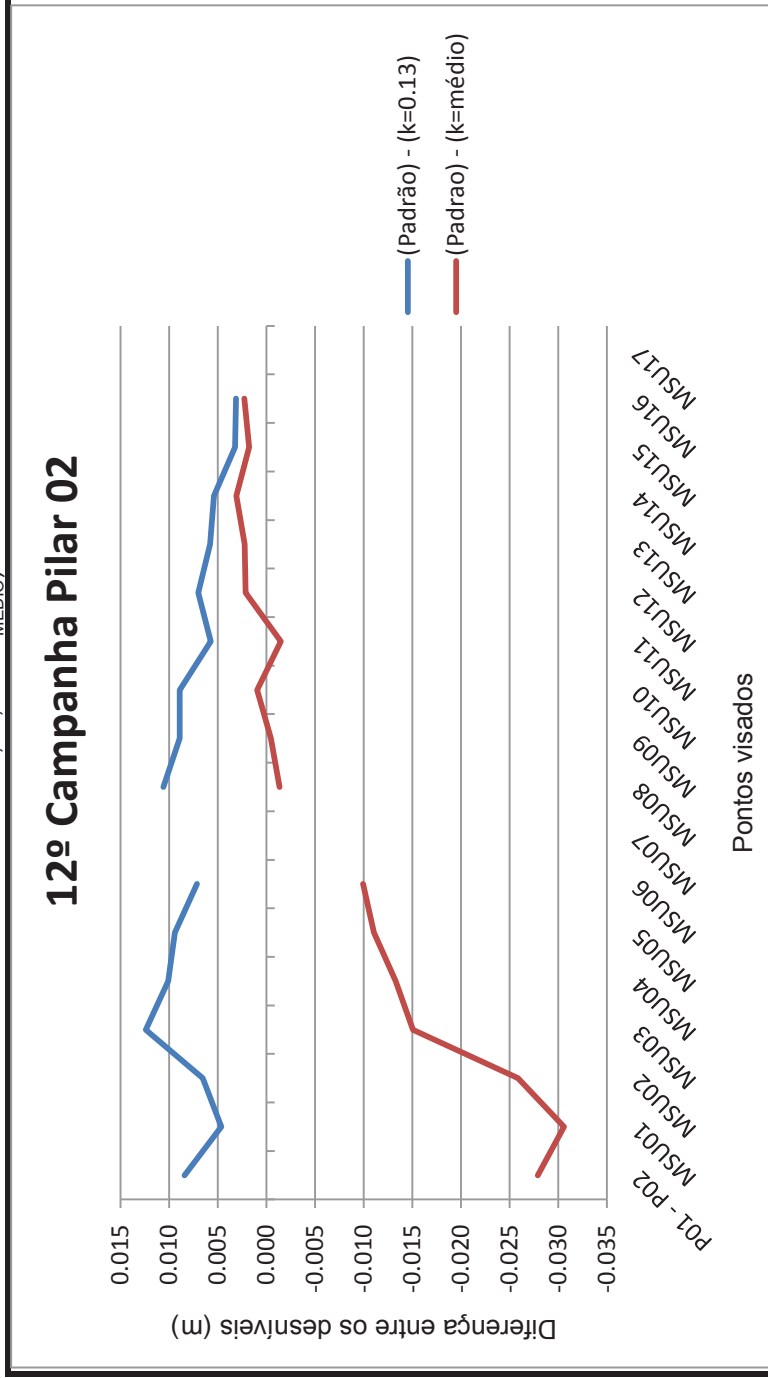
FONTE: Autora (2019).

TABELA 34 – 12º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIACÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - PILAR02	-11.292600	-11.301001	-11.264725	0.008401	-0.027875
PILAR02 - MSU01	-15.410710	-15.415349	-15.380138	0.004639	-0.030572
PILAR02 - MSU02	-15.414110	-15.420649	-15.388277	0.006539	-0.025833
PILAR02 - MSU03	-15.415170	-15.427580	-15.400123	0.012410	-0.015047
PILAR02 - MSU04	-15.419000	-15.429089	-15.405702	0.010089	-0.013298
PILAR02 - MSU05	-15.418280	-15.427672	-15.407245	0.009392	-0.011035
PILAR02 - MSU06	-15.417530	-15.424667	-15.407586	0.007137	-0.009944
PILAR02 - MSU07*	-15.424880				
PILAR02 - MSU08	-15.423530	-15.434119	-15.422190	0.010589	-0.001340
PILAR02 - MSU09	-15.423750	-15.432668	-15.423302	0.008918	-0.000448
PILAR02 - MSU10	-15.423980	-15.432883	-15.424947	0.008903	0.000967
PILAR02 - MSU11	-15.420120	-15.425843	-15.418639	0.005723	-0.001481
PILAR02 - MSU12	-15.421850	-15.428843	-15.423991	0.006993	0.002141
PILAR02 - MSU13	-15.423200	-15.429001	-15.425419	0.005801	0.002219
PILAR02 - MSU14	-15.416500	-15.421888	-15.419584	0.005388	0.003084
PILAR02 - MSU15	-15.418460	-15.421688	-15.420240	0.003228	0.001780
PILAR02 - MSU16	-15.415790	-15.418927	-15.418061	0.003137	0.002271
PILAR02 - MSU17*	-15.417030				

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 26 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



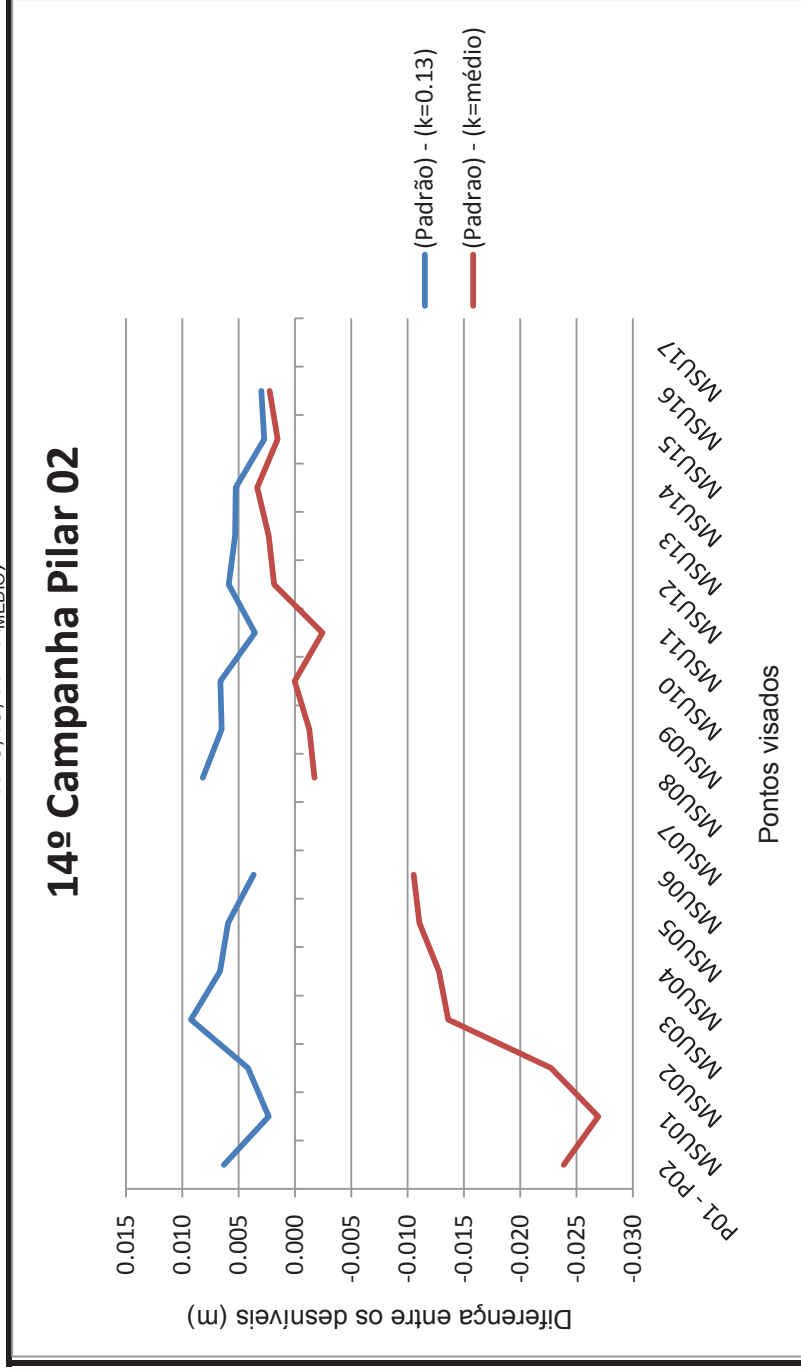
FONTE: Autora (2019).

TABELA 35 – 14º CAMPANHA A PARTIR DO PILAR 02 [VARIACÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13$, $K = K_{MÉDIO}$)]

Linha	Desnível Geométrico (Padrão)(m)	Desnível ($k = 0,13$)(m)	Desnível ($k_{médio}$)(m)	(Padrão) - ($k=0,13$)(m)	(Padrão) - ($k=médio$)(m)
PILAR01 - PILAR02	-11.294700	-11.301001	-11.270844	0.006301	-0.023856
PILAR02 - MSU01	-15.413005	-15.415349	-15.386078	0.002344	-0.026927
PILAR02 - MSU02	-15.416460	-15.420649	-15.393738	0.004189	-0.022722
PILAR02 - MSU03	-15.418345	-15.427580	-15.404754	0.009235	-0.013591
PILAR02 - MSU04	-15.422430	-15.429089	-15.409647	0.006659	-0.012783
PILAR02 - MSU05	-15.421740	-15.427672	-15.410691	0.005932	-0.011049
PILAR02 - MSU06	-15.420990	-15.424667	-15.410467	0.003677	-0.010523
PILAR02 - MSU07*	-15.427190				
PILAR02 - MSU08	-15.425930	-15.434119	-15.424202	0.008189	-0.001728
PILAR02 - MSU09	-15.426145	-15.432668	-15.424882	0.006523	-0.001263
PILAR02 - MSU10	-15.426255	-15.432883	-15.426286	0.006628	0.000031
PILAR02 - MSU11	-15.422295	-15.425843	-15.419854	0.003548	-0.002441
PILAR02 - MSU12	-15.422945	-15.428843	-15.424809	0.005898	0.001864
PILAR02 - MSU13	-15.423685	-15.429001	-15.426023	0.005316	0.002338
PILAR02 - MSU14	-15.416620	-15.421888	-15.419973	0.005268	0.003353
PILAR02 - MSU15	-15.418940	-15.421688	-15.420484	0.002748	0.001544
PILAR02 - MSU16	-15.415945	-15.418927	-15.418207	0.002982	0.002262
PILAR02 - MSU17*	-15.417090				

FONTE: Autora (2019).

GRÁFICO 27 – VARIÇÃO DOS DESNÍVEIS ENTRE NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO (CALCULADO A PARTIR DE $K=0,13, K = K_{MÉDIO}$)



FONTE: Autora (2019).