



**Análise do Índice de Refração Vertical no Monitoramento de Barragens:
Estudo de Caso UHE Governador Jayme Canet Junior**
Vertical Refractive Index Analysis in Dam Monitoring: Case Study
Hydro electric power plant Governor Jayme Canet Junior

Dayane Wiggers; Pedro Luis Faggion & Wander da Cruz

*Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas,
Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos 210, 81531-990, Jardim das Américas, Curitiba, PR, Brasil
E-mails: dayanewiggers@yahoo.com.br; pedro.faggion@gmail.com; wanderdacruz@gmail.com*

Recebido em: 30/01/2020 Aprovado em: 05/08/2020

DOI: http://doi.org/10.11137/2020_3_303_312

Resumo

Desde os experimentos de Brocks em 1950, sabe-se que o coeficiente de refração vertical 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, suas medições são influenciadas por variações no índice de refração que consequentemente 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 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, Pilar 01 e 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. Posteriormente, utilizando uma estação total robotizada, 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, 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 440m, a média do k calculado é uma boa aproximação e para distâncias maiores que essa, o valor determinado por Gauss apresenta resultados melhores.

Palavras-chave: *Índice de refração vertical; Usina hidrelétrica; Nivelamento*

Abstract

Since the experiments by Brocks in 1950 it is known that the vertical refraction coefficient varies between -5 to 15 depending on height above ground and local meteorological conditions, in the dams monitoring processes, 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 downstream dam and pillar 02 upstream dam. Subsequently, using a robotic total station 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, 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 provide better results.

Keywords: vertical refractive index, dam, differential leveling.

1 Introdução

O monitoramento de estruturas tem sido objeto de grande pesquisa nacional e internacional e tem como objetivo obter informações quantificadas sobre o seu comportamento, 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 *et al.*, 2005; 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 (Ghilani & Wolf,

2012). Segundo IBGE (2017) para evitar a ocorrência e propagação de erros sistemáticos algumas recomendações precisam ser realizadas na execução de um nivelamento geométrico e no nivelamento trigonométrico.

Nas medições geodésicas a principal fonte de erro sistematico é devido a refração atmosférica (Hennes, 2002; Ingensand, 2008). Na maioria dos levantamentos geodésicos, as medições são realizadas na baixa atmosfera, logo existe a influência da refração. Variações das condições atmosféricas como: temperatura, pressão e umidade, modificam a densidade do meio, e consequentemente alteram a velocidade e o comprimento da onda eletromagnética, logo poderão ocorrer variações no tempo desse deslocamento e curvatura do feixe (Torge, 2001).

O estudo da refração atmosférica não visa apenas medir e modelar as influências da refração, 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).

Variações nas medições devido ao efeitos da refração são expressas pelo índice de refração, que é determinado em função do comprimento da onda eletromagnética e das condições ambientais do meio (Brunner, 1984).

Dependendo do objetivo do levantamento o valor de índice de refração que foi determinado por Gauss em 1826 (0,13) é uma boa aproximação, mas esse valor conforme Brocks podem variar de -5 a 15 dependendo da altura acima do solo e das condições meteorológicas do local, desta forma, o estudo do índice de refração vertical no monitoramento de uma usina hidrelétrica mostrou-se relevante.

Esta pesquisa abordará o efeito do índice de refração nos desníveis, ou seja, o índice de refração vertical.

2 Material e Métodos

2.1 Área de estudo

A área de estudo localiza-se na UHE (Usina Hidrelétrica) Governador Jayme Canet Júnior, entre os municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba, no estado do Paraná, no Brasil. A barragem fica na região do Salto Mauá, no rio Tibagi. A área de estudo foi escolhida pela proximidade da equipe de pesquisadores vinculados ao grupo de Geodésia aplicada à engenharia, que já desenvolve atividades de pesquisa no monitoramento de barragens, há um longo período de tempo.

2.2 Equipamentos utilizados

Os dados de nivelamento geométrico foram obtidos com o nível digital Leica DNA03 capaz de realizar medições eletronicamente com um desvio padrão de $\pm 0,3$ mm/km para duplo nivelamento, quando utilizada mira de invar gravada em código de barras (Leica, 2006). 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.

Para o levantamento das direções horizontais, ângulos verticais e distâncias inclinadas, utilizou-se a Estação Total Leica TS15, 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 com maior rapidez e uma menor influência do operador, possui precisão da medida angular de 1" e precisão na medida da distância: 1 mm + 1,5 ppm (Leica, 2015).

Juntamente com a estação total, utilizam-se prismas Leica, modelo GPR111, que auxiliam a visualização de todos os pontos utilizados neste levantamento.

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

2.3 Nivelamento Trigonometrico

O levantamento foi realizado no dia 11 de julho de 2019 e iniciou-se posicionando a estação total em três pontos diferentes, conforme Figura 1, 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, acima deles existe uma rosca padrão 5/8" compatível com os equipamentos geodésicos.

Os pontos monitorados da crista são identificados conforme Figura 2, e seguem a sequência de nomenclatura, ponto 01, MSU 01 (marco de superfície 01), ponto 02,



Figura 1 Pontos onde foram realizados os levantamentos.

MSU 02 e assim por diante, da direita para a esquerda até o MSU 17.

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

Como não é possível a visualização dos MSU's a partir do Pilar 03, foi realizada somente a leitura do Pilar 02.

2.4 Nivelamento Geométrico

O nivelamento geométrico foi executado seguindo todas as recomendações contidas nas especificações e normas para levantamentos geodésicos do IBGE. A sequência de trabalho iniciou-se no Pilar 01, 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 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 novamente com a mira apoiada em cima do parafuso de centragem forçada do Pilar 03 (Figura 3).

O nivelamento do Pilar 01 ao Pilar 02 foi realizado de forma que no caminhamento os pontos situados na crista fossem visados. Com isso foi possível calcular o desnível

de forma independente do Pilar 01 e 02 para todos os 17 pontos MSU's localizados na crista do barramento.

No nivelamento geométrico os 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.

2.5 Processamento dos dados de nivelamento trigonométrico

Os dados obtidos com a estação total são: direção horizontal, ângulo vertical e distância inclinada, conforme instruções indicadas no manual do equipamento, a distância precisa ser corrigida, devido as variações das condições atmosféricas.

Sabendo disso, no mesmo instante da realização das medições, efetuou-se o levantamento das condições atmosféricas, utilizando o equipamento Data Logger.

Conhecendo as variações dos parâmetros atmosféricos é possível através da correspondência do horário da realização do levantamento, com o horário de registro das condições atmosféricas, calcular as correções das distâncias observadas. De acordo com a Equação (1).

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

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



Figura 2 Pontos monitorados.

Com os dados corrigidos é possível através da Equação 2 encontrar o valor do desnível entre dois pontos A e B quaisquer.

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

- ΔH_{AB} - Desnível de A para B;
- h_i - Altura do instrumento (fixo, conforme Tabela 1);
- h_s - Altura do sinal (Prisma) (fixo, conforme Tabela 1);
- D_v - Componente de distância inclinada no eixo vertical ou distância vertical;
- D_h - Componente da distância inclinada no plano horizontal ou distância horizontal.

Todas essas informações são organizadas em forma de tabela, conforme Tabela 2, são apresentados alguns dos dados a partir do Pilar 01, com informações de direções horizontais (Hz) e ângulos zenitais (Hv) e seus respectivos valores de desvio padrão. Os valores das distâncias inclinadas (bruta) e o horário da realização das medidas. 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 1 e os valores de desvio padrão dessas medidas.

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

2.6 Processamento dos dados de nivelamento geométrico

Para o nivelamento geométrico, os dados obtidos são: distância entre o equipamento e a mira posicionada a ré e a vante e o valor da altura, na mira observada à ré e a vante.

O desnível entre os dois pontos será o valor medido em ré menos o valor medido em vante. Considerando que os desniveis trigonométricos foram calculados a partir da base da rosca de centragem forçada, é preciso que o nivelamento geométrico utilize o mesmo referencial, logo é preciso encontrar o valor do desnível reduzido à base da rosca. Para isso dois termos referente a altura das roscas foram introduzidos [Equação 3]:

$$\Delta H_{AB \text{ reduzido}} = L_{ré} + H_{r \text{ ré}} - L_{vante} - H_{r \text{ vante}} \quad (3)$$

- $\Delta H_{AB \text{ Reduzido}}$ - Desnível de A para B reduzido a base da rosca;
- $H_{r \text{ ré}}$ - Altura da rosca de ré (medidas com paquímetro);

- $H_{r \text{ vante}}$ - Altura da rosca de vante (medidas com paquímetro);
- $L_{ré}$ - Leitura da altura na mira de ré;
- L_{vante} - Leitura da altura na mira de vante.

	(mm)
h_i	236,7
$H_s \text{ MSU's}$	112,98
$h_s \text{ Pilar}$	177,98

Tabela 1 Altura do instrumento e altura do sinal (prisma).



Figura 3 Posicionamento da mira nos pilares.

O cálculo dos desniveis foi realizado em diversas campanhas, devido a outros trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa e apresentam valores de erro cometido menores que os valores de erro permitido, em todas as seções.

3 Resultados

Os valores dos desniveis reduzidos a base da rosca, conforme Equação 3, podem ser aplicados na Equação 2, proveniente do nivelamento trigonométrico. A partir dos dados de altura do instrumento, altura do sinal e distância inclinada é possível reescreve-la de forma que o índice de refração vertical seja encontrado.

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

É possível isolar k:

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

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

$$k = \frac{(-2R\Delta H_{AB} + 2Rh_i - 2Rh_s + 2RD_v + D_h^2)}{D_h^2} \quad (4)$$

Análise do Índice de Refração Vertical no Monitoramento de Barragens: Estudo de Caso UHE Governador Jayme Canet Junior
Dayane Wiggers; Pedro Luis Faggion & Wander da Cruz

Pontos	Hz						Hv						Distância bruta		Par. atmosféricos			Distância corrigida					
	°	′	″	Média			Desvio Padrão (″)	°	′	″	Média			Desvio Padrão (″)	DI	HORA	Pres (mbar)	Temp (°C)	Umid	DI Corrigida (m)	Média (m)	Desvio Padrão (m)	
				°	′	″					°	′	″										
P2	9	40	53	9	40	52,3	1,08	89	9	12	89	09	12,2	0,7	757,893	12:38:54	949,2	24,5	55	757,9156	757,9162	0,0002	
P2	189	40	53					270	50	47					757,894	12:48:17	948,8	24,7	55,5	757,9168			
P2	9	40	55					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					757,893	12:52:34	948,2	25,9	53,3	757,9167			
P2	9	40	54					89	9	12					757,893	12:52:44	948,2	25,9	53,3	757,9167	757,9164		
P2	189	40	52					270	50	45					757,893	12:55:22	948,3	24,8	57	757,9160			
P2	9	40	50					89	9	14					757,893	12:55:31	948,3	24,8	57	757,9160	757,9160		
P2	189	40	56					270	50	49					757,893	12:58:11	948,1	24,7	57,8	757,9160			
P2	9	40	49					89	9	13					757,893	12:58:20	948,1	24,7	57,8	757,9160	757,9160		
P2	189	40	52					270	50	49					757,893	13:01:07	948,3	25	56,6	757,9161			
P2	9	40	52					89	9	11					757,893	13:01:16	948,3	25	56,6	757,9161	757,9162		
P2	189	40	51					270	50	49					757,893	13:04:00	947,9	25	57	757,9162			
MSU15	16	3	47	16	03	52,9	2,2	90	23	24	90	23	26,6	2,2	627,364	12:45:59	949	24,5	55,2	627,3827	627,3823		0,0004
MSU15	196	3	52					269	36	38					627,363	12:47:14	948,4	24,5	56,5	627,3818			
MSU15	16	3	51					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					627,364	12:51:29	948,7	25,2	54,6	627,3832			
MSU15	16	3	53					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					627,363	12:54:15	948,6	25	55,5	627,3821			
MSU15	16	3	49					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					627,363	12:57:04	948,2	24,7	57,1	627,3820			
MSU15	16	3	58					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					627,363	12:59:55	947,7	24,8	57,5	627,3821			
MSU15	16	3	57					90	23	30					627,363	13:02:25	948,5	25	56,4	627,3821	627,3821		
MSU15	196	3	53					269	36	35					627,363	13:02:51	948,5	25	56,4	627,3821			

Tabela 2 Dados Brutos Estação TS15

A partir dos cálculos utilizando a Equação 4 é possível descobrir os valores do índice de refração vertical para todas as visadas separadamente. Esse cálculo foi realizado para diversas campanhas, sendo possível avaliar a variação do índice de refração vertical ao longo do tempo. As Figuras 4 e 5 referem-se aos dados dos levantamentos a partir do Pilar 01 e 02.

O valor do índice de refração vertical foi encontrado 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 calculado para cada campanha, de forma que esse valor possa ser utilizado no cálculo dos desníveis trigonométricos.

Analisando os valores de k encontrados, pode-se perceber que existe um comportamento muito semelhante para cada linha de visada. Pontos mais próximos apresentam valores de índice de refração vertical por volta 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 sob efeitos da turbulência atmosférica¹ e consequentemente sujeito a variações do índice de refração ao longo desse caminho.

Os valores de nivelamento foram separados por campanhas, de forma que três dados pudessem ser comparados, um proveniente do nivelamento geométrico, e dois trigonométricos, calculados a partir da Equação 2. Essas comparações entre as diferenças dos desníveis foram representadas em forma de gráfico, conforme Figura 6 e 7.

Os valores são provenientes da diferença entre o nivelamento geométrico:

- Com os desníveis oriundos do nivelamento trigonométrico, utilizando o índice de refração vertical (k), igual ao valor médio calculado para cada campanha;
- Com os desníveis trigonométricos calculados a partir de k igual a $0,13$ descrito por Gauss;
- Com os desníveis trigonométricos oriundos da média do índice de refração entre o Pilar 01 e o Pilar 02.

O valor de k médio foi utilizado com o objetivo de verificar se esse valor é uma boa aproximação para a região. Os dados apresentados são referentes somente a primeira campanha, devido a similaridade nos resultados das demais. No nivelamento trigonométrico 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. E os dados referentes a campanha 11 a partir do Pilar 02 apresentou dados inconsistentes, por essa razão foi retirado do estudo.

4 Conclusão

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.

Para avaliar o comportamento do k encontrado, calculou-se uma média de todos esses valores para cada campanha, e a partir desse dado foi possível realizar o cálculo do desnível trigonométrico.

Analisando os desníveis é possível identificar que 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 descreveu variações -5 a 15 .

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 de até $440m$, para distâncias maiores que está 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.

¹ 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 (Schaal, 1995).

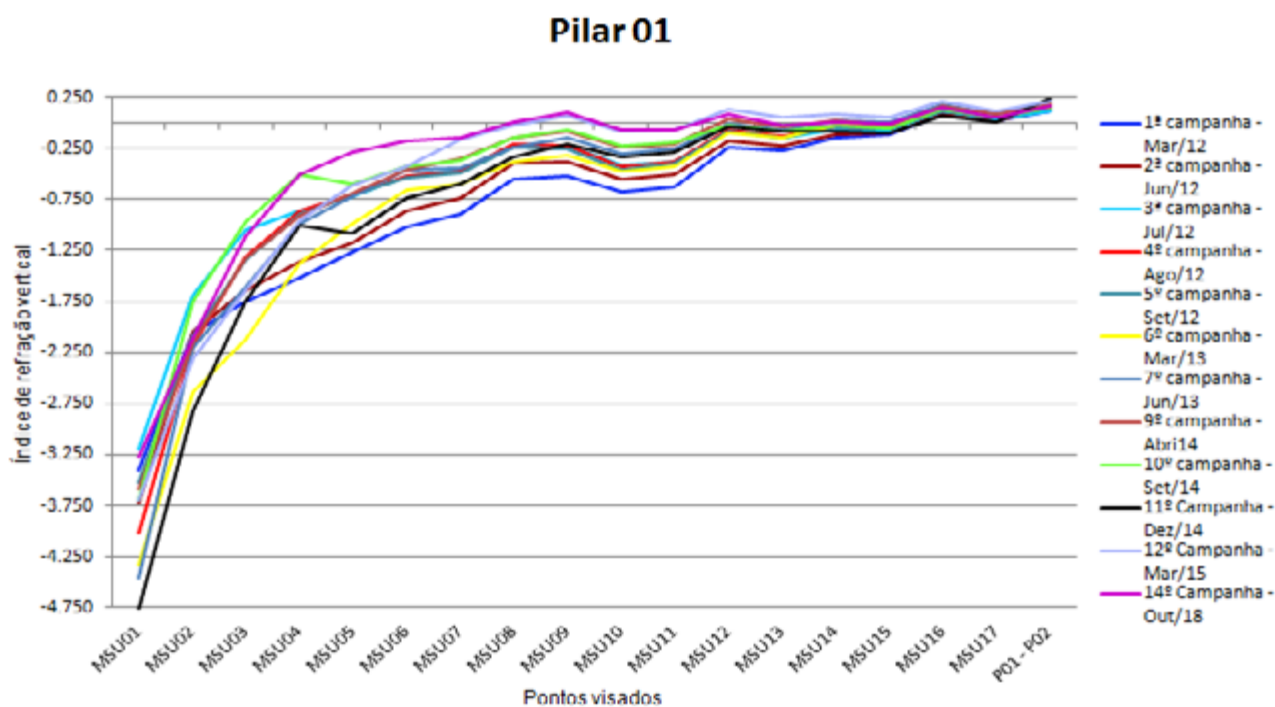


Figura 4 Variação do índice de refração vertical a partir do Pilar 01.

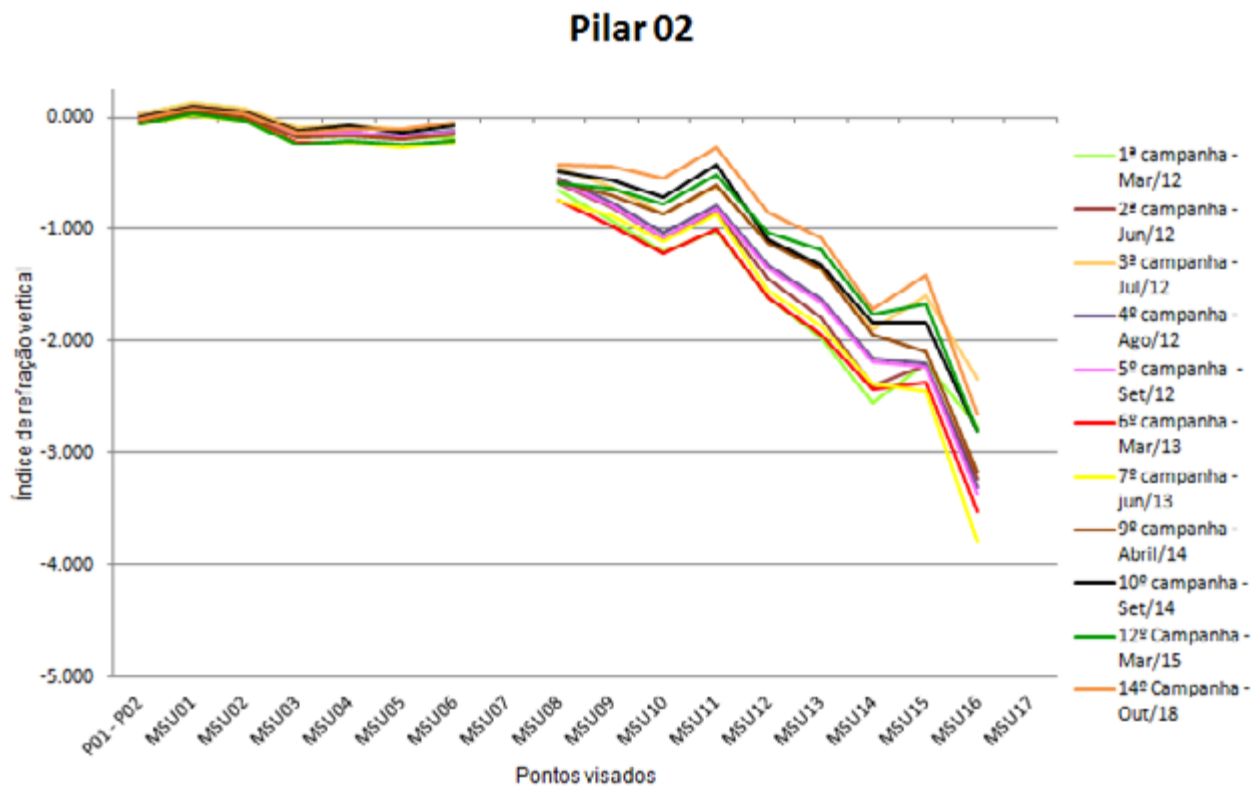


Figura 5 Variação do índice de refração vertical a partir do Pilar 02.

1ª Campanha Pilar 01

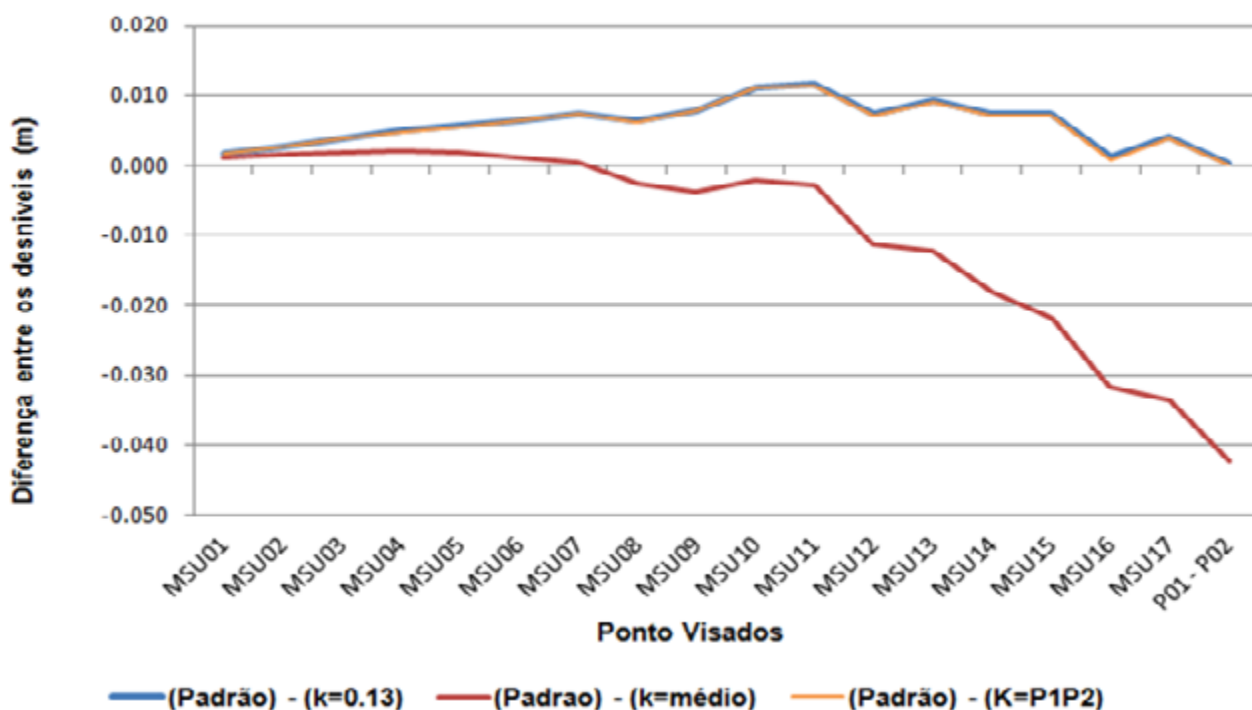


Figura 6 Variação dos deníveis a partir do Pilar 01.

1ª Campanha Pilar 02

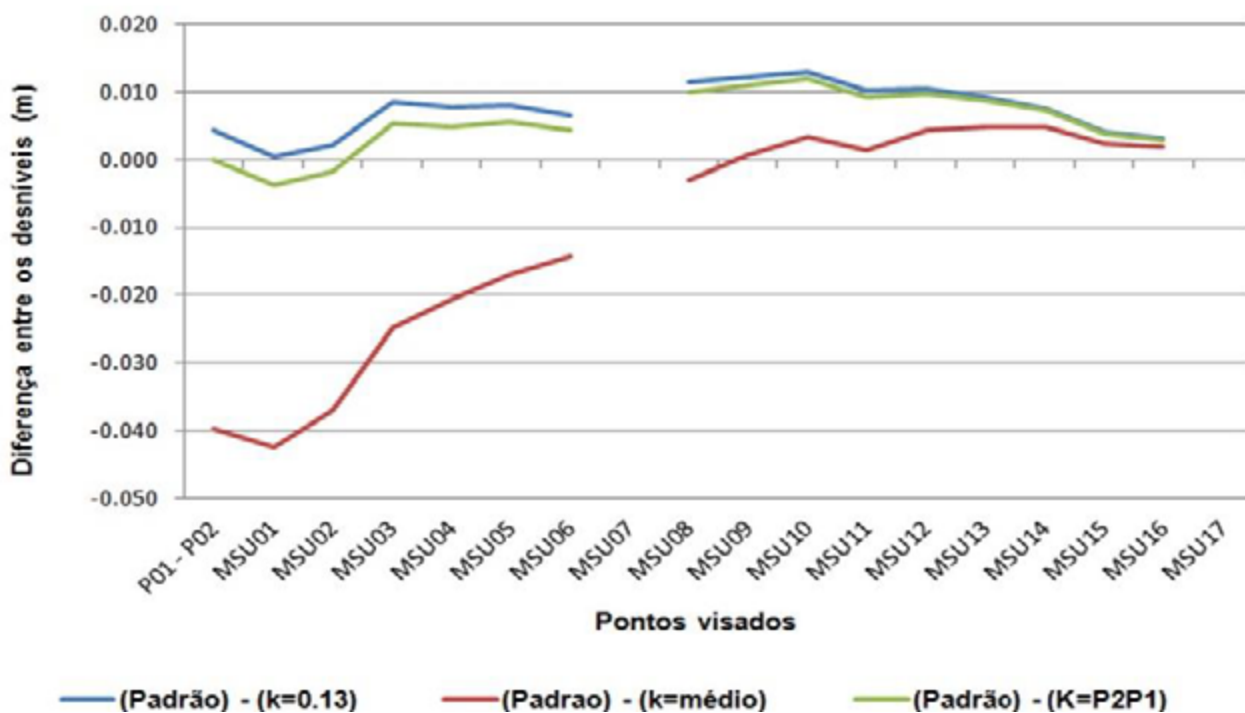


Figura 7 Variação dos deníveis a partir do Pilar 02.

5 Referências

- Auweraer, H.V.D. & Peeters, B. 2003. International research projects on structural health monitoring: An overview. *Structural Health Monitoring*, 2(4): 341–358.
- Brocks, K. 1950. *Die Lichtstrahl krümmung in Bodennähe. Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 3: 241-248.
- Brunner, F.K. 1984. *Geodetic Refraction: Effects of Electromagnetic Wave Propagation Through the Atmosphere*. Berlin, Springer-Verlag, 213p.
- Geiger, R.; Aron, R.H. & Todhunter, P. 2009. *The Climate Near the Ground*. Lanham, Rowman & Littlefield, 623P.
- Guilani, C.D. & Wolf, P.R. 2012. *Elementary Surveying: an introduction to geomatics*. Upper Saddle River, Pearson, 958p.
- Hennes, M. 2002. Zum Refraktion einfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und Instrumentenentwicklung. *Flurbereinigung Bodenordnung*, 2: 73-86.
- IBGE. 2017. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Especificações e Normas para Levantamentos Geodesicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/metodos-e-outros-documentos-de-referencia/normas/16463-especificacao-e-normas-gerais-para-levantamentos-geodesicos-em-territorio-brasileiro.html?=&t=acesso-ao-produto> >. Acesso em: 1 Abril. 2019.
- Ingesand, H. 2008. Concepts and solutions to overcome the refraction problem in terrestrial precision measurement. *Geodesy and Cartography*, 34(2): 61–65.
- Leica Geosystems 2006. Leica DNA03 / DNA10. User Manual, versão 2.0.
- Leica Geosystems. 2015. Leica TS15. Manual de operação, versão 3.0.
- Lienhart, W. 2017. Geotechnical monitoring using total stations and laser scanners: critical aspects and solutions. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7: 315-324.
- Moreira, A.S.B. 2003. Nivelamento trigonométrico e nivelamento geométrico classe IIN da NBR 13.33: limites e condições de compatibilidade. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil: transportes, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 103p.
- Palazzo, D.R.; Santos-Filho, M.L. & Moreira, A. 2005. A Utilização de Técnicas Geodesicas no Monitoramento de Estruturas Pré-Moldadas. In: 1º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-Moldado, São Carlos, 2005, p. 1-10.
- Torge, W. 2001. *Geodesy*. Berlin, Walter de Gruyter, 416p.