

Análise comparativa da flexão de barra metálica sob cargas, por diferentes métodos geodésicos: nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico e fotogrametria a curtas distâncias

A comparative analysis of metal bar bending under loads, using different geodetic methods: geometric leveling, trigonometric leveling and close-range Photogrammetry

Leandro Ítalo Barbosa de Medeiros¹; Alan José Salomão Graça²; Pedro Luis Faggion³; Luis Augusto Koenig Veiga⁴

¹ UFPI, Departamento de Transportes e Geomática, Teresina/PI, Brasil. Email: leandro.medeiros@ufpi.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0437-1269>

² UERJ, Departamento de Engenharia Cartográfica, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Email: alanjs@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0437-1269>

³ UFPR, Departamento de Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: pedro.faggion@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4881-8720>

⁴ UFPR, Departamento de Geomática, Curitiba/PR, Brasil. Email: kngveiga@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4026-5372>

Resumo: A análise da flexão e da deformação de estruturas metálicas desempenham um importante papel no monitoramento destas estruturas. Compreender seu comportamento sob esforços (deslocamentos) tem sua importância para garantir a segurança e a durabilidade na sua utilização em estruturas ou mesmo garantir que se comportem como projetadas. Nesse contexto, a utilização de métodos geodésicos avançados de medição desempenha um papel fundamental. Este estudo se concentra na análise da flexão de uma barra metálica por meio de três métodos de medição distintos: fotogrametria terrestre a curta distância, nívelamento trigonométrico *leap-frog* e nívelamento geométrico de precisão. Cada um desses métodos possui suas próprias vantagens e desafios. Ao longo deste trabalho, são exploradas suas características, bem como as etapas envolvidas na coleta e processamento dos dados, contribuindo para uma compreensão mais abrangente das possibilidades e limitações na análise de flexão de estruturas. Os resultados deste estudo indicam que os três métodos escolhidos são capazes de monitorar estruturas como a aqui escolhida, para as cargas aqui adotadas, com diferenças máximas entre os resultados para os três métodos na ordem de 1 mm, quando aplicada a carga máxima.

Palavras-chave: Monitoramento Geodésico; Deflexão de Viga Metálica; Nivelamento Geométrico de Precisão; Estação Total Robotizada; Fotogrametria a Curta Distância.

Abstract: The analysis of bending and deformation of metallic structures plays an important role in monitoring these structures. Understanding its behavior under stress (displacements) is important to guarantee safety and durability when used in structures or even to ensure that they behave as designed. In this context, the use of advanced geodetic measurement methods plays a fundamental role. This study focuses on the analysis of the bending of a metal bar using three different measurement methods: close-range terrestrial photogrammetry, leap-frog trigonometric leveling and precision geometric leveling. Each of these methods has its own advantages and challenges. Throughout this work, its characteristics are explored, as well as the steps involved in data collection and processing, contributing to a more comprehensive understanding of the possibilities and limitations in the analysis of bending structures. The results of this study indicate that the three chosen methods are capable of monitoring structures such as the one chosen here, for the loads adopted here, with maximum differences between the results for the three methods in the order of 1 mm, when the maximum load is applied.

Keywords: Geodetic Monitoring; Metallic Bar Deflection; Precision Geometric Leveling; Robotic Total Station; Close-range Photogrammetry.

1. Introdução

Tradicionalmente, no contexto das Geociências, a medição de deflexões estruturais, recalques, deslocamentos e deformações de estruturas é realizada por meio de métodos de auscultação geodésica, como nívelamento geométrico e trigonométrico, gravimetria e posicionamento GNSS relativo (CANTO; SEIXAS, 2020; JERKE; FAGGION, 2020; MUGUIO et al., 2017; NADAL et al., 2017; EHRHART; LIENHART, 2015; SILVA; FAGGION; VEIGA, 2014; EROL, 2010; NADAL et al., 2010). Além disso, esses métodos são frequentemente combinados com métodos não geodésicos, comuns no campo das engenharias, como medições de deslocamentos por fibra óptica e deslocamentos por vetores gerados por medições triortogonais de juntas (LEE et al., 2022; MARKOVIĆ et al., 2019; GRAÇA; FAGGION, 2016). Nas últimas décadas, avanços tecnológicos nas áreas de imageamento, metrologia óptica e visão computacional têm possibilitado o surgimento de novas técnicas de medição, as quais oferecem também precisão e eficiência aprimoradas para o monitoramento de estruturas (BESHR et al., 2024; AL-RUZOUQ et al., 2023; PEREIRA, 2023; LENARTOVICZ et al., 2014).

O nívelamento geométrico de alta precisão é um método que possibilita detectar deslocamentos verticais submilimétricos (KUCHMISTER et al., 2020; DA CRUZ; GRAÇA; FAGGION, 2015). Aplicações desse método podem ser encontradas em: estudos metrológicos para a determinação de erros instrumentais no âmbito da Geodésia (DA CRUZ; GRAÇA; FAGGION, 2015); no monitoramento de barragens de concreto (SILVA; FAGGION; VEIGA, 2014); auscultação geodésica de torres eólicas (CANTO; SEIXAS, 2020); identificação de movimentos de massa (SALVINI et al., 2022); determinar as diferenças de nível entre pontos sinalizados em prédios antigos (FREGONESE, 2013); deformações em estruturas metálicas (GIKAS, 2012); sendo também utilizado na validação de outras metodologias de detecção de movimentos estruturais verticais (GUMUS; SELBESOGLU; CELIK, 2016; DETCHEV; HABIB; EL-BADRY, 2011).

O nívelamento trigonométrico é um método indireto para a determinação de desniveis entre dois pontos, fundamentado na resolução de um triângulo retângulo (SILVA; FAGGION; VEIGA, 2014; SANTOS; FAGGION; VEIGA, 2011). Para tanto, necessita-se coletar em campo, com uso de estações totais, informações referentes à distância inclinada entre o equipamento e os alvos de monitoramento, ângulos verticais (zenitais ou nadirais), bem como a altura do instrumento e do refletor (EHRHART; LIENHART, 2015; ZONTA; NADAL; PRATA, 2014). Os avanços tecnológicos na área das Ciências Geodésicas têm impactado positivamente a evolução dos equipamentos e softwares. Com isso, é crescente a evolução das estações totais, que já trabalham de maneira robotizada, com uma intervenção mínima do operador, e com soluções de hardware e software que vêm apresentando uma crescente melhora no que diz respeito à suas precisões nominais, minimização de erros grosseiros, bem como na praticidade para a obtenção e processamento das observações, resultando em trabalhos cada vez mais precisos e com um tempo necessário de execução cada vez menor (MEDEIROS; FAGGION; ALVES, 2020; EHRHART; LIENHART, 2015).

Com a fotogrametria a curta distância, os procedimentos necessários para medir as deflexões infligidas consistem da aquisição de dados por imagens, implantação e coleta de coordenadas de alvos sinalizados, da orientação relativa das múltiplas posições ocupadas pela câmera, e de uma série de interseções de múltiplos raios de luz para reconstruir as coordenadas tridimensionais do espaço do objeto de um conjunto de pontos amostrais, tomados tridimensionalmente para obter medidas (LUHMANN et al., 2020; DETCHEV; HABIB; EL-BADRY, 2011). Este método de aquisição de dados, denominado *Structure from Motion*, baseia-se na tomada de múltiplas imagens sobrepostas, sob diversas perspectivas e posições, para garantir a interseção fotogramétrica com mais de dois raios em diversos pontos homólogos em diferentes fotografias.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é avaliar o desempenho destes métodos de medição em eficiência e aplicabilidade na análise da deflexão de um perfil de alumínio. O artigo visa fornecer uma visão abrangente das vantagens e limitações de cada técnica, contribuindo para o aprimoramento das ferramentas disponíveis para engenheiros e pesquisadores em Geociências na avaliação de deflexões estruturais ajudando a orientar a seleção da abordagem mais adequada, dependendo das características específicas de um projeto ou das necessidades de medição, bem como os resultados obtidos com os diferentes métodos.

2. Materiais e Métodos

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da UFPR, o qual possui uma infraestrutura com temperatura e umidade controladas, piso estável e sem declives, dotada de equipamentos digitais e

ópticos para a realização de experimentos geodésicos de alta precisão, como mostram Nadal et al. (2010), Santos, Faggion e Veiga, (2011), Da Cruz, Graça e Faggion (2015) e Gemin, Matos e Faggion (2016).

Como objeto de estudo, utilizou-se um perfil de alumínio extrudado de seção quadrada, o qual possui comprimento de 2,03m, apoiado sobre dois tripés topográficos. A barra utilizada possui 38 mm de altura e de largura, com espessura da parede de 1 mm. A fim de evitar a elevação das extremidades da barra com a aplicação das cargas ao centro, utilizou-se grampos de fixação, conectando a barra aos tripés.

Sobre a barra, fixou-se então os equipamentos auxiliares necessários ao monitoramento pelas técnicas distintas, como mostra Figura 1.



*Figura 1 – Disposição do objeto de estudo e alvos utilizados nas mensurações.
Fonte: Autores (2024).*

Para o nivelamento geométrico foram utilizadas 4 miras confeccionadas com a impressão de fitas de código de barras para leitura de nível eletrônico (ANDOLFATO; FAGGION, 2011). Uma mira foi posicionada na parede ao fundo do laboratório, sendo esta a mira de referência; e três miras instaladas fixadas à estrutura monitorada. Da esquerda para a direita, vide figura 2, nomeou-se as miras de vante da seguinte maneira: Mira V1, Mira V2 e Mira V3. Para as medições, utilizou-se um nível geodésico digital modelo Leica DNA03, com precisão $\pm 0,3$ mm/km para 1 km duplo nivelado, um equipamento com diversos trabalhos bem-sucedidos para experimentos em ambientes controlados (KUCHMISTER et al., 2020; GEMIN; MATOS; FAGGION, 2016). O equipamento foi instalado sobre um tripé industrial (Figura 2), o qual possui um sistema de amortecimento de vibrações. Além disso, manteve-se a altura constante do instrumento como sugerido pelos experimentos de Gemin, Matos e Faggion (2016).

Para o nivelamento trigonométrico, foram utilizados sete miniprismas. Cinco deles posicionados sobre o corpo monitorado, espaçados igualmente entre si. Posicionou-se ainda um miniprisma sobre cada um dos tripés, com a finalidade de avaliar a estabilidade do conjunto durante o experimento. Para a referência ou visada de ré, um prisma circular foi posicionado afastado do local onde a barra estava fixada, sobre um tripé semelhante aos que sustentam a estrutura monitorada. Para as medições, utilizou-se uma Estação Total Robotizada (ETR) modelo Leica TS15, com precisão angular de 1" e precisão linear de $\pm(1\text{mm} + 1,5\text{ ppm})$, e precisão do ATR (*Automatic Target Recognition*) de 0,3 mgon (JERKE; FAGGION, 2020; MEDEIROS; FAGGION; ALVES, 2020; EHRHART; LIENHART, 2015). A ETR foi estacionada também sobre um tripé industrial de mesmo modelo adotado para nível geodésico. A Figura 2 mostra os dois equipamentos estacionados sobre os tripés e direcionados para o perfil de alumínio.



Figura 2 – ETR TS15 e Nível DNA03 instalados sobre tripés industriais.
Fonte: Autores (2024).

Para a fotogrametria a curtas distâncias, utilizou-se um *smartphone* Samsung Galaxy, modelo A32 com as seguintes especificações de câmera: 8Mp e resolução de 9K por 7K pixels, e tamanho do sensor 6,35 mm. A coleta dos dados fotogramétricos via *smartphone* teve como objetivo avaliar a aplicabilidade de sensores de baixo custo para a finalidade de monitoramento deslocamentos milimétricos. Em KROMANIS et al. (2019), os autores concluíram que a tecnologia de smartphones é uma alternativa promissora para a medição de deformações estruturais devido à sua acessibilidade, portabilidade e precisão adequada, especialmente em contextos educacionais e de pesquisa.

O perfil utilizado é uniforme e com alta refletividade. Logo, buscar feições no próprio objeto para obter pontos homólogos torna-se uma tarefa extremamente complicada. Apesar do baixo custo, da rápida aquisição de dados redundantes e da alta precisão da reconstrução fotogramétrica 3D, tradicionalmente alvos sinalizados são necessários na fotogrametria digital (DETACHEV; HABIB; EL-BADRY, 2011). Para estabelecer tanto os pontos de apoio, localizados na barra de escala, quanto os pontos objeto, localizados na estrutura monitorada, foram utilizados alvos codificados para reconhecimento automático, impressos em papel adesivo (BESHR et al., 2024; KONG et al., 2023; LUHMANN et al., 2020).

Os alvos dos pontos de apoio foram posicionados sobre um tripé para câmera fotográfica, posicionados à frente do perfil metálico, e ainda nos tripés topográficos que dão sustentação ao perfil, enquanto os alvos dos pontos objeto a serem monitorados foram regularmente distribuídos sobre o perfil em sua face frontal, como visto na Figura 3.



Figura 3 – Distribuição dos alvos fotogramétricos para pontos de controle e pontos objeto.
Fonte: Autores (2024).

A inserção dos pontos de controle tem duas principais funções. Primeiro, como as barras de escala (pontos de controle) são plotadas com uma referência métrica de 150 mm, estes foram utilizados para dar escala no processamento fotogramétrico (KROMANIS et al., 2019). E segundo, como os pontos de controle são posicionados em local externo à estrutura monitorada, permanecendo imóveis durante todas as séries de monitoramento, tais pontos foram adotados como medidas para fixar o referencial do espaço objeto, para assim avaliar os deslocamentos detectados nos demais pontos monitorados (KONG et al., 2023).

Adotou-se um arranjo de cargas composto por anilhas de metal, conforme apresentado na Tabela 1. Cada anilha tem uma massa de 1 kg, e foram adicionadas aos pares, fixando-as na parte média da extensão da barra. Na Figura 4, à direita vê-se a posição do prisma de ré, ou de referência, posicionado externo ao corpo monitorado sobre uma base de poligonação, semelhante a proposição de Gikas et al. (2016) e Silva, Faggion e Veiga (2014). Na Figura 4, é possível ainda observar o experimento com 8 kg de carga aplicada, ou seja, a Série 5.

Tabela 1 – Cargas utilizadas em cada série de medições.

Série	Carga
1	0 kg
2	2 kg
3	4 kg
4	6 kg
5	8 kg
6	10 kg

Fonte: Autores (2024).



Figura 4 – Demonstração da aplicação das cargas.

Fonte: Autores (2024).

No nivelamento geométrico, empregou-se o método de visadas iguais. Este método apresenta a vantagem de minimizar erros sistemáticos decorrentes do desalinhamento entre o eixo de colimação óptica e o eixo do nível tubular, o erro de colimação, dentre outros (CANTO; SEIXAS, 2020; NADAL et al. 2010). O cálculo dos deslocamentos se deu segundo a Equação 1.

$$\Delta h_n = L_{R1} - L_{Vi} \quad (1)$$

Da Equação 1, Δh_n é o desnível entre a mira de ré e cada uma das miras de vante para a série n; L_{R1} é a leitura do nível na mira de ré, e L_{Vi} são as leituras do nível nas miras de vante, ou seja, i varia de 1 a 3, número de miras de vante; e n varia de 1 a 6, que é a quantidade de séries medidas. O procedimento consistiu em realizar uma leitura da mira de ré, e em seguida das miras de vante a cada incremento de carga. A diferença de nível foi então calculada subtraindo-se o resultado da leitura da mira de ré dos resultados das leituras das miras de vante. Considerando a primeira diferença de nível, obtida com carga zero, como sendo a referência inicial (Δh_n), as flechas verticais para cada incremento de carga são calculadas através da Equação 2.

$$\Delta v_n = \Delta h_{1(v1,v2,v3)} - \Delta h_{1+n(v1,v2,v3)} \quad (2)$$

Em que Δv_n são os deslocamentos obtidos para cada incremento de carga para cada uma das miras; $\Delta h_{1(v1,v2,v3)}$ é o desnível inicial das miras de vante com relação a mira de ré; e $\Delta h_{1+n(v1,v2,v3)}$ são os desníveis das miras de vante com relação à mira de ré para cada incremento de carga, a partir de 2 kg.

Para o nivelamento trigonométrico, configurou-se a ETR para a medição no modo automático (ATR). Para isto, inicialmente realiza-se a pontaria e medição de cada um dos miniprismas, iniciando pelo prisma de ré. As posições aproximadas aos centros dos alvos são então armazenadas na memória do equipamento. Para a busca automática dos prismas nas medições seguintes, o equipamento realiza o procedimento denominado de reconhecimento automático de alvos (ATR), através do protocolo GeoCOM (JERKE et al., 2022), como mostrado na Figura 5. Uma explicação mais detalhada deste procedimento pode ser encontrada em Jerke et al. (2022), Medeiros, Faggion e Alves (2020) e Ehrhart e Lienhart (2015). Foram efetuadas três sequências de leituras de pontaria direta (PD) e pontaria inversa (PI) para cada uma das séries do experimento. A leitura por pares conjugados aumenta a precisão e a confiabilidade das medições, corrigindo erros sistemáticos e de colimação, e minimizando erros de ajuste do instrumento, como a falta da horizontalidade do eixo secundário, facilita ainda a detecção de problemas instrumentais, garantindo dados de alta qualidade.



Figura 5 – Princípio da detecção automática de prismas em uma ETR.
Fonte: Adaptado de Jerke et al. (2022).

A deflexão da barra foi obtida em função das variações posicionais dos prismas de vante com relação ao prisma de ré para cada incremento de carga (MARKOVIĆ et al., 2019; ZONTA; NADAL; PRATA, 2014). Tomou-se a posição da barra sem carga como sendo a posição de referência. O cálculo das diferenças de nível para cada série foi realizado pelo modelo simplificado do nivelamento trigonométrico, o modelo aplicado para distâncias curtas, conforme Equação 3 (VEIGA; ZANETTI; FAGGION, 2012).

$$\Delta h_{AB} = hi - hp + [Di * \cos(Z)] \quad (3)$$

Onde, Δh_{AB} é o desnível entre o ponto de estação e o ponto sobre o terreno; hi é altura do instrumento; hp a altura do prisma; Di a Distância inclinada; Z o Ângulo zenital.

Como a variação que interessa para o experimento é tão somente a da diferença vertical entre o centro óptico do equipamento e o centro dos alvos para cada série; e ainda, a ETR se manteve estacionada sobre o mesmo ponto durante todo o experimento, pode-se desprezar os termos hi e hp da Equação 3, resultando na Equação 4. A eliminação da altura do aparelho e da altura do prisma resulta em um método de nívelamento amplamente conhecido como *leap-frog*. O estudo de tal método pode ser aprofundado em Santos, Faggion e Veiga (2011).

$$\Delta h_{ABn} = [Di * \cos(Z)]_i \quad (4)$$

Da Equação 4, n varia a cada incremento de carga, e i para cada prisma de vante visado. A finalidade das leituras por ATR é reduzir eventuais erros grosseiros introduzidos pelo operador, erros esses que não podem ser corrigidos pelos ajustamentos de observações, que tratam dos erros acidentais ou randômicos (FRANÇA; KLEIN; VEIGA, 2023).

No processo fotogramétrico, as imagens foram processadas com uso do software *Agisoft Metashape*, com licença padrão pertencente ao Laboratório de Geodésia Aplicada a Engenharia (GEENG/UFPR). Para cada incremento de carga, foram tomadas cerca de 50 (cinquenta) fotografias para gerar o recobrimento mínimo de 70% entre imagens consecutivas do corpo de prova. Fazendo uso desse processo fotogramétrico, objetos podem ser reconstruídos e deformações podem ser detectadas e medidas em 3D com uma grande redundância (FRANÇA; KLEIN; VEIGA, 2023; DETCHEV; HABIB; EL-BADRY, 2011).

O SfM compreende duas etapas fundamentais: a primeira busca estimar a estrutura 3D da cena, enquanto a segunda busca determinar a posição e orientação das câmeras. Na etapa inicial, algoritmos de correspondência de características são aplicados para identificar pontos de interesse nas fotografias e estabelecer correspondências entre esses pontos em diferentes imagens (SZELISKI, 2022). Na segunda etapa, conhecida como "*pose estimation*", os algoritmos buscam determinar a posição e orientação relativa das câmeras que capturaram as imagens (HARTLEY; ZISSERMAN, 2004). Isso é realizado comparando os pontos de interesse identificados nas imagens com a estrutura tridimensional estimada na etapa anterior (Figura 6).

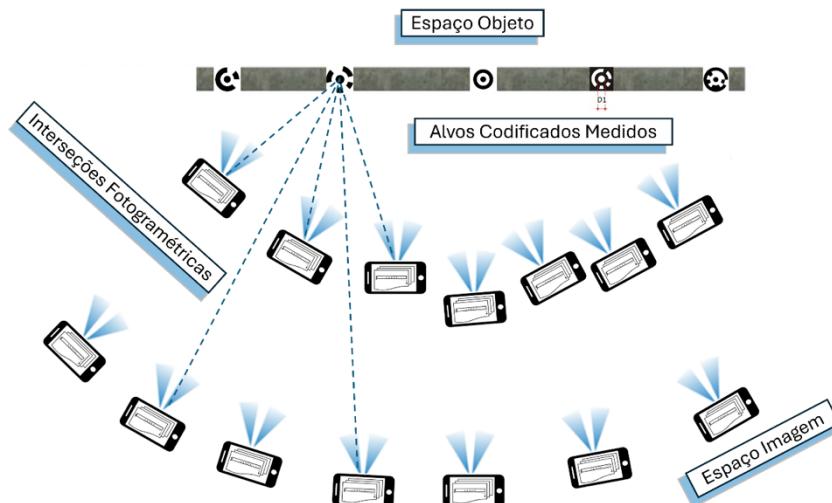


Figura 6 – Modelo de aquisição de múltiplas imagens a partir do SfM.
Fonte: Autores (2024).

Para garantir a repetibilidade no posicionamento das tomadas das imagens, uma barra auxiliar foi graduada de 20 em 20 cm e posicionada de forma paralela à barra do experimento. As imagens foram salvas e processadas para cada uma das séries. Os pontos de controle, em cada uma das camadas do software, receberam as mesmas coordenadas.

Para cada processamento, o conjunto de imagens originou o modelo tridimensional do objeto de estudo, com a escala originada de acordo com as distâncias do corpo de prova e das medidas dos alvos dos pontos de apoio. A obtenção do fator de escala das imagens foi gerada de forma automática com o auxílio do software *Agisoft Metashape*, a fim de verificar a

aplicabilidade do processo de baixo custo descrito por Kromanis et al. (2019). Como mostra a Equação 5, obteve-se o fator de escala definido pela relação:

$$m = \frac{f}{p \cdot Z} = \frac{D_{conhecido}}{I_{conhecido}} \quad (5)$$

Onde, f que responde pela distância focal da câmera, p é o comprimento da unidade do sensor da câmera (mm/pixel) e Z corresponde a distância da câmera até o local de monitoramento (KROMANIS et al., 2019). Alternativamente, essa relação pode ser obtida por $D_{conhecido}$ que é o comprimento físico conhecido na superfície do objeto e $I_{conhecido}$ que é o comprimento de pixel correspondente no plano da imagem (KROMANIS et al., 2019). O fator de escala é determinado pela proporção entre a distância real de pontos de controle conhecidos e a distância correspondente na imagem.

3. Resultados e discussões

A Tabela 2 apresenta as leituras do nivelamento geométrico de primeira ordem para cada uma das séries. Essas medidas mostram o comportamento progressivo de acentuação de uma curvatura das extremidades para o centro do corpo de prova.

Tabela 2 – Leituras do nivelamento geométrico de precisão em cada uma das séries do experimento.

Carga (kg)	Leituras de mira (m)			
	R1	V1	V2	V3
0	0,20803	0,51073	0,50226	0,51504
2	0,20801	0,51083	0,50282	0,51512
4	0,20803	0,51081	0,50349	0,51528
6	0,20803	0,51099	0,50416	0,51549
8	0,20802	0,51121	0,50502	0,51581
10	0,20803	0,51137	0,50561	0,51592

Fonte: Autores (2024).

Da Tabela 2, verifica-se que a mira de referência manteve sua posição estável durante todo o experimento, com variações na casa do centésimo do milímetro. Essa constatação empírica traz à luz a relevância do estudo de Andolfato e Faggion (2011), que desenvolveu essa instrumentação geodésica de baixo custo. Nesse aspecto, essas miras codificadas podem ser aplicadas a nivelamentos de precisão sem a adoção complementar de uma mira invar, quando em ambientes controlados.

A Tabela 3 apresenta o resultado da diferença de nível das miras com relação à mira de ré para cada uma das séries. Observa-se que a diferença de nível entre as miras de vante e de ré seguem um padrão de crescimento, à medida em que se aumenta a carga aplicada, como esperado, tendo em vista a precisão submilimétrica do equipamento geodésico utilizado.

Tabela 3 – Diferenças de nível com relação à mira de referência em metros.

Carga (kg)	Leituras de mira (m)		
	V1 (m)	V2 (m)	V3 (m)
0	0,5107	0,50226	0,51504
2	0,51083	0,50282	0,51512
4	0,51081	0,50349	0,51528
6	0,51099	0,50416	0,51549
8	0,51121	0,50502	0,51581
10	0,51137	0,50561	0,51592

Fonte: Autores (2024).

Na Figura 7, têm-se a comparação da variação do deslocamento vertical entre as miras para o conjunto das seis séries de investigação. Os três pontos plotados em cada uma das linhas do gráfico mostram o comportamento da deflexão, evidenciada respectivamente nas miras V1, V2 e V3.

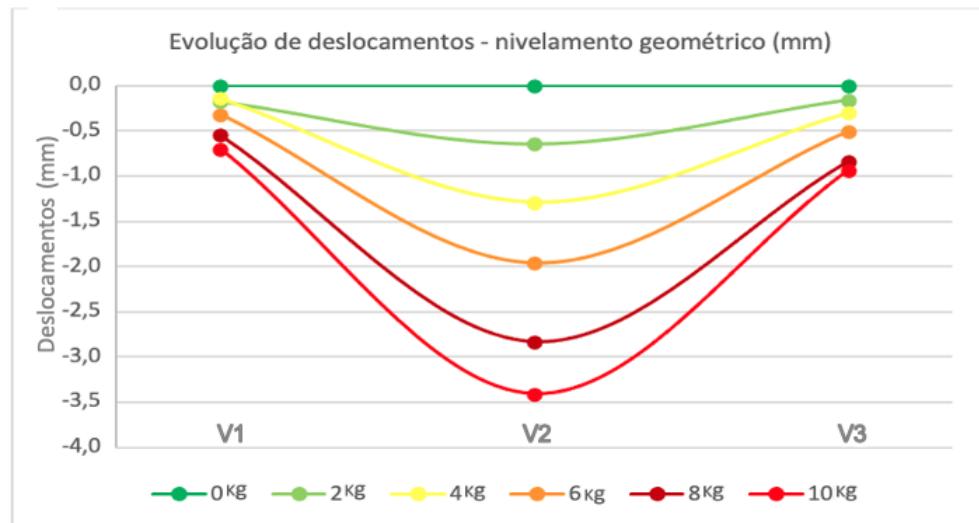


Figura 7 – Evolução de deslocamentos – nívelamento geométrico.

Fonte: Autores (2024).

Os resultados do nívelamento geométrico indicam uma maior deflexão na parte central do objeto monitorado, como esperado. Vê-se que a mira V2, correspondente ao centro da barra, sofreu um deslocamento vertical próximo a 3,5 mm quando aplicada a carga máxima. Observa-se ainda que como as duas miras laterais estavam fixas à barra nas regiões bem próximas aos apoios, os deslocamentos destas foram inferiores a 1 mm, com variações totais submilimétricas.

A Figura 8 apresenta a nomenclatura aplicada a cada um dos miniprismas utilizados para o nívelamento trigonométrico com a ETR.



Figura 8 – Nomenclatura aplicada aos miniprismas para o nívelamento trigonométrico.

Fonte: Autores (2024).

A Tabela 4 apresenta os resultados para as coordenadas verticais (Z) dos prismas, para cada série.

Tabela 4 – Coordenadas verticais (Z) dos prismas para cada série.

Carga (kg)	Z_P1(m)	Z_P2(m)	Z_P3(m)	Z_P4(m)	Z_P5(m)	Z_P6(m)	Z_P7(m)
0	99,5436	99,5826	99,5812	99,5780	99,5776	99,5787	99,5404
2	99,5436	99,5825	99,5809	99,5776	99,5773	99,5786	99,5404
4	99,5436	99,5824	99,5806	99,5771	99,5770	99,5785	99,5404
6	99,5436	99,5824	99,5804	99,5767	99,5766	99,5783	99,5403
8	99,5435	99,5823	99,5801	99,5762	99,5762	99,5782	99,5402
10	99,5435	99,5822	99,5797	99,5758	99,5759	99,5781	99,5402

Fonte: Autores (2024).

Na Figura 9, têm-se a comparação da variação vertical dos prismas para o conjunto de séries.

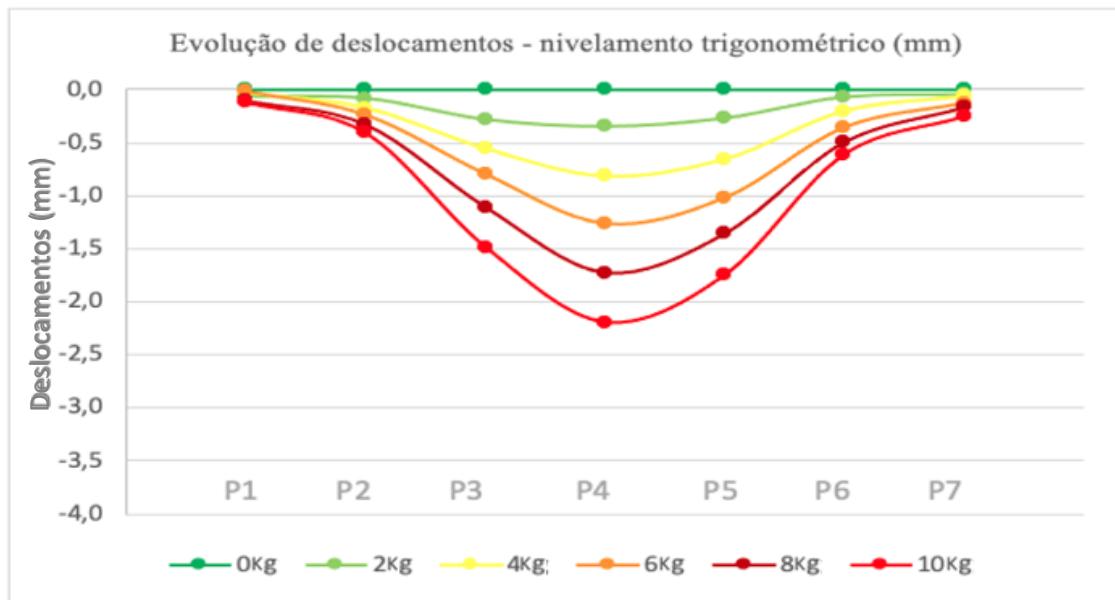


Figura 9 – Evolução de deslocamentos – nívelamento trigonométrico.

Fonte: Autores (2024).

Os resultados do nívelamento trigonométrico indicam, assim como no nívelamento geométrico, uma maior flexão na parte central da estrutura monitorada. Obteve-se no nívelamento geométrico de precisão uma variação de 3,5mm. Para o nívelamento trigonométrico, vê-se que o prisma 4 (P4), correspondente ao centro da barra, sofreu um deslocamento vertical próximo a 2,5mm quando aplicada a carga máxima. Observa-se ainda que P1 e P7, sobre os apoios, tiveram deslocamentos praticamente nulos.

A Figura 10 apresenta a disposição dos alvos utilizados para o processo fotogramétrico.



Figura 10 – Disposição dos alvos utilizados para o processo fotogramétrico.

Fonte: Autores (2024).

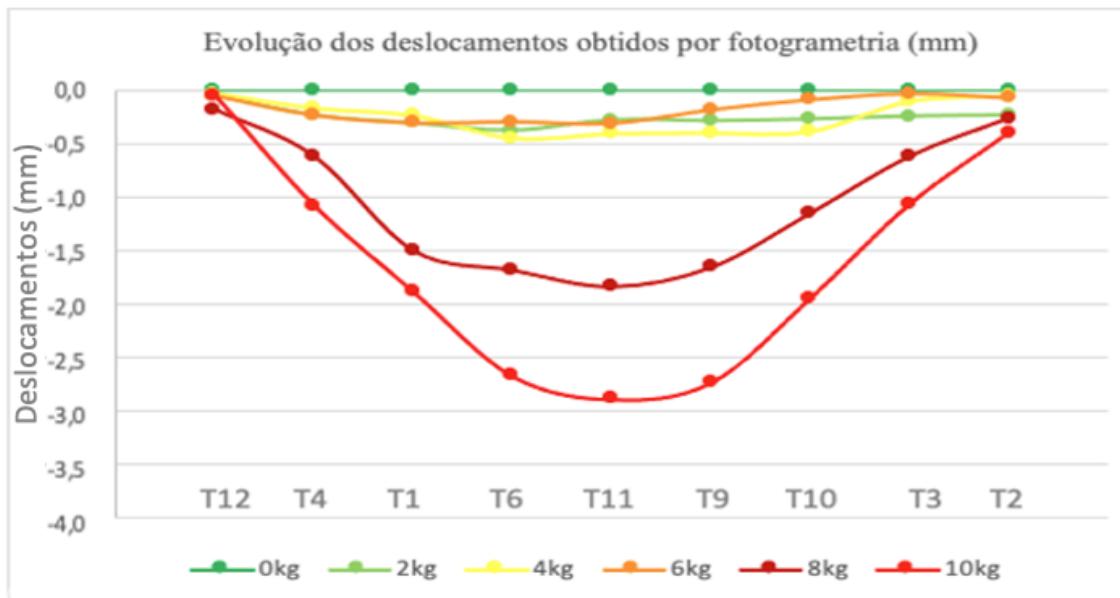
A Tabela 5 apresenta a variação das coordenadas verticais dos centros geométricos dos alvos fotogramétricos obtidas em cada incremento de carga a que a estrutura foi submetida. As observações de pontos sinalizados (alvos discretos) no objeto são usadas como dados necessários tanto para a determinação das medidas dos pontos objeto, quanto para a determinação dos parâmetros de orientação interior da câmera capturada (ZULKIFLI; AHMAD, 2008; KROMANIS et al., 2019; AL-RUZOOUQ et al., 2023). O software fotogramétrico utiliza o princípio da interseção fotogramétrica para produzir medidas tridimensionais, estabelecendo que cada ponto-alvo ou *keypoint* deve apresentar pelo menos duas imagens para obter informações espaciais, e os resultados podem ser melhorados progressivamente com o uso de três ou mais imagens na definição dos *keypoints* e uma rotina de ajustamento por feixes perspectivos (*bundleadjustment*) para assim obter a acurácia das medidas e os valores de seus resíduos (ZULKIFLI; AHMAD, 2008; LOWE, 1999).

Tabela 5 – Coordenadas verticais dos alvos fotogramétricos sobre o corpo de prova (m).

Cargas (kg)	T12	T4	T1	T6	T11	T9	T10	T3	T2
0	0,1491	0,1491	0,1491	0,1491	0,1492	0,1491	0,1491	0,1491	0,1491
2	0,1492	0,1488	0,1488	0,1487	0,1489	0,1488	0,1488	0,1489	0,1489
4	0,1491	0,1489	0,1489	0,1487	0,1488	0,1487	0,1487	0,1490	0,1491
6	0,1490	0,1488	0,1488	0,1488	0,1489	0,1489	0,1490	0,1491	0,1490
8	0,1489	0,1484	0,1476	0,1474	0,1474	0,1475	0,1480	0,1485	0,1488
10	0,1491	0,1480	0,1472	0,1465	0,1463	0,1464	0,1472	0,1481	0,1487

Fonte: Autores (2024).

A Figura 11 apresenta a representação gráfica das diferenças entre as coordenadas fotogramétricas verticais com relação à barra em repouso. O comportamento da deflexão não segue a curvatura uniformemente acentuada nos alvos ao centro, como ocorreu nos dois métodos anteriores. Nota-se que as deflexões mais pronunciadas, submetidas a maiores esforços, ainda assim tornam-se notórias, como sugere o emprego de câmeras fotogramétricas de baixo-custo para essa finalidade, sugerido por Kromanis et al. (2019).

*Figura 11 – Evolução de deslocamentos – nivelamento por fotogrametria.**Fonte: Autores (2024).*

Da Figura 12, observa-se que quando aplicadas as cargas menores, os valores apontam para resultados ruidosos do método. Por exemplo, em algumas partes da linha do gráfico que representam o deslocamento da barra sob o esforço de 6 kg, a figura aponta para uma deflexão inferior à ocasionada pelos esforços da carga de 4 kg. No entanto, o método fotogramétrico foi capaz de detectar os deslocamentos para os incrementos maiores de carga, principalmente para as duas maiores (8 kg e 10 kg), onde se observa que houve uma acentuada variação com relação aos demais.

Na Figura 12, tem-se a sobreposição dos gráficos oriundos dos três métodos, para a carga de 10 kg.

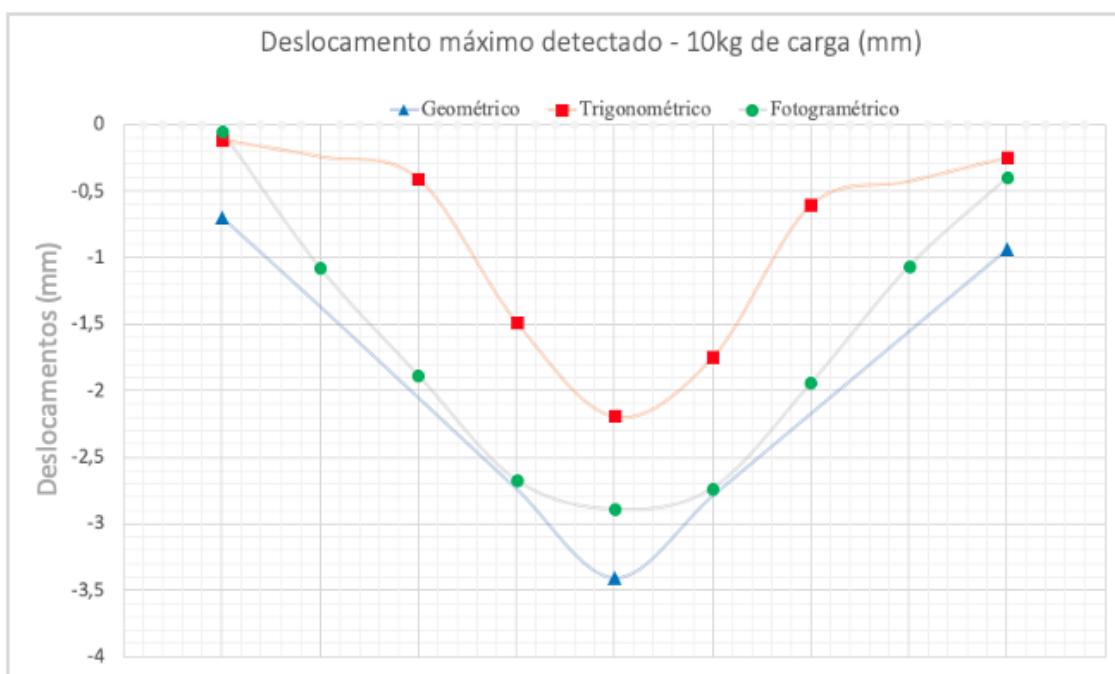


Figura 12 – Sobreposição dos gráficos oriundos dos três métodos, para a carga de 10Kg.
Fonte: Autores (2024).

Da Figura 12, vê-se pelos três métodos utilizados foi possível verificar que a barra sofreu deflexão quando aplicada a carga máxima. Dentre os métodos, a deflexão máxima detectada foi de aproximadamente 3,5mm, para o nívelamento geométrico, e a menor, de 2,5mm, para o nívelamento trigonométrico. O uso da fotogrametria para esta finalidade apresentou resultado aproximadamente mediano com relação aos demais (2,9 mm).

4. Considerações finais

O objetivo dos três experimentos realizados foi implantar múltiplos alvos em uma estrutura metálica para detectar deflexões no perfil causadas por diferentes aplicações de carga em cada série de experimentos.

Sobre o nívelamento geométrico, têm-se a facilidade de aplicação do método, em ambiente controlado, com precisão nas observações submilimétricas. Em contrapartida, tem-se a limitação da quantidade reduzida de alvos de monitoramento em virtude do comprimento da estrutura e da dimensão das miras codificadas.

Quanto ao nívelamento trigonométrico, este apresentou resultados satisfatórios no emprego da rotina ATR para a medição das observações dos pontos objeto. A metodologia foi capaz de apontar que houve um ganho de deflexão a cada incremento de carga, sendo esta deflexão mais evidente nos três miniprismas centrais.

Quanto ao emprego do SfM para a extração de medidas fotogramétricas, a falta de um processo empírico de calibração de câmera, para a obtenção parâmetros de orientação interior, foi um fator limitante para a extração de medidas, o que pode ser melhorado. Outra questão está na ausência do emprego do ajustamento por feixes de raios perspectivos, que para além da fototriangulação, espera-se obter em estudos futuros um refinamento dos parâmetros de orientação exterior, visando obter novas medidas com menores resíduos. Salienta-se que a fotogrametria foi prejudicada pela alta reflexão da barra de alumínio. Como sugestão de experimentos futuros, pode-se realizar a comparação dos resultados obtidos com a câmera do smartphone a resultados obtidos com equipamentos fotogramétricos mais robustos, como sugerido por Detchev, Habib e El-Badry (2011), e ainda a utilização de estruturas compostas por outros tipos de materiais, como estruturas de concreto.

Por fim, ao compararmos os resultados obtidos pelos três métodos, verifica-se que a diferença máxima obtida entre estes foi de apenas 1 mm, com exceção para fotogrametria para cargas menores. Ainda, observa-se que o padrão de comportamento da estrutura foi praticamente o mesmo para os três métodos.

Deste modo, conclui-se que estes métodos se apresentaram como satisfatórios ao monitoramento da estrutura, mesmo que se possa melhorar os procedimentos, principalmente para a fotogrametria, a qual apresentou resultados ruidosos quando aplicadas as cargas iniciais.

Agradecimentos

A Deus e aos colegas do GEENG.

Referências

- Al-Ruzouq, R.; Dabous, S. A.; Junaid, M. T.; Hosny, F. Nondestructive deformation measurements and crack assessment of concrete structure using close-range photogrammetry. *Results in Engineering*, v. 18, p. 101058, 2023.
- Andolfato, S. H. D.; Faggion, P. L. Desenvolvimento de um sistema de automação de níveis digitais. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 17, n. 1, 188-199, 2011.
- Beshr, A. A.; Fawzy, H. E. D.; Eldin, E. A.; Hu, J. W.; Abdelmgeed, F. A. Monitoring of the post-tensile structures camber using the terrestrial close-range photogrammetry. *Optics & Laser Technology*, v. 171, 110285, 2024.
- Canto, L. F. C.; Seixas, A. Auscultação Geodésica em Torres Eólicas Onshore: Definição do Sistema de Referência e de Medição para o Monitoramento. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72, n. 2, 294-311, 2020.
- Chrzanowski, A.; Szostak-Chrzanowski, A. Deformation monitoring surveys – Old problems and new solutions. *Reports on Geodesy*, v. 87, n. 2, 85-103, 2009.
- Da Cruz, W.; Graça, N.L. S. S.; Faggion, P. L. Utilização de espelho de reflexão frontal aliado ao nívelamento geométrico para determinação de desnível de pontos em ambientes confinados. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 3, n. 1, 12-18, 2015.
- Detchev, I.; Habib, A.; El-Badry, M. Estimation of vertical deflections in concrete beams through digital close range photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 38, 219-224, 2011.
- Ehrhart, M.; Lienhart, W. Monitoring of civil engineering structures using a state-of-the-art image assisted total station. *Journal of Applied Geodesy*, v. 9, n. 3, 174-182, 2015.
- Erol, B. Evaluation of high-precision sensors in structural monitoring. *Sensors*, v. 10, n. 12, 10803-10827, 2010.
- França, R. M.; Klein, I.; Veiga, L. A. K. Horizontal Reference Network Densification by Multiple Free Stations. *Journal of Surveying Engineering*, v. 149, n. 4, 04023018, 2023.
- Gemin, A. R. S.; Matos, É. S.; Faggion, P. L. Investigações preliminares do processo de calibração de sistemas de nívelamento digitais utilizando comparador horizontal na UFPR. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 68, n. 10, 2053-2062, 2016.
- Gikas, V. Ambient vibration monitoring of slender structures by microwave interferometer remote sensing. *Journal of Applied Geodesy*, v. 6, n. 3-4, 167-176, 2012.
- Gikas, V.; Karydakis, P.; Mpimis, T.; Piniotis, G.; Perakis, H. Structural integrity verification of cable stayed footbridge based on FEM analyses and geodetic surveying techniques. *Survey Review*, v. 48, n. 346, p. 1-10, 2016.
- Graca, N. L.; Faggion, P. L. Validação da determinação de deslocamentos relativos em barragens utilizando Topografia e Medidores Triortogonais de Junta. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 4, n. 2, 89-98, 2016.
- Gumus, K.; Selbesoglu, M. O.; Celik, C. T. Accuracy investigation of height obtained from Classical and Network RTK with ANOVA test. *Measurement*, v. 90, 135-143, 2016.

- Hartley, R.; Zisserman, A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2nd ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2004.
- Jerke, A.; Faggion, P. L. Análise do Monitoramento Geodésico de barragem com Equipamentos de Diferentes Precisões e Diferentes Softwares de Processamento. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 43, n. 4, 310-318, 2020.
- Jerke, A.; Rodriguez, F. A. C.; Medeiros, L. I. B.; Sampaio, L. F.; Alves, S. D. S. O.; Veiga, L. A. K.; Faggion, P. L. Desenvolvimento de aplicativo para o controle e operação remota de estações totais. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 8, n. 2, p. 102-113, 2022.
- Kong, L.; Chen, T.; Kang, T.; Chen, Q.; Zhang, D. An automatic and accurate method for marking ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 16, 278-290, 2022.
- Kromanis, R.; Xu, Y.; Lydon, D.; Martinez del Rincon, J.; Al-Habaibeh, A. Measuring structural deformations in the laboratory environment using smartphones. *Frontiers in Built Environment*, v. 5, a. 44, p.1-16, 2019.
- Kuchmister, J.; Gołuch, P.; Ćmielewski, K.; Rzepka, J.; Budzyń, G. A functional-precision analysis of the Vertical Comparator for the Calibration of geodetic Levelling Systems. *Measurement*, v. 163, p. 107951, 2020.
- Lee, Z. K.; Bonopera, M.; Hsu, C. C.; Lee, B. H.; Yeh, F. Y. Long-term deflection monitoring of a box girder bridge with an optical-fiber, liquid-level system. *Structures*. Elsevier. v. 44, 904-919, 2022.
- Lenartovicz, I. R.; Veiga, L. A. K.; Faggion, P. L.; Nadal, C. A.; Soares, M. A. Potential evaluation of the terrestrial laser scanner in structural monitoring: case study Mauá HPP. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 66, n. 7, 1505-1515, 2014.
- Lowe, D. G. Object recognition from local scale-invariant features. In: *Proceedings of the seventh IEEE international conference on computer vision*. IEEE, v. 2, 1150-1157, 1999.
- Luhmann, T.; Robson, S.; Kyle, S.; Boehm, J. *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. Berlin, Germany: Walter de Gruyter, 2020.
- Marković, M. Z.; Bajić, J. S.; Batilović, M.; Sušić, Z.; Joža, A.; Stojanović, G. M. Comparative analysis of deformation determination by applying fiber-optic 2d deflection sensors and geodetic measurements. *Sensors*, v. 19, n. 4, 844, 2019.
- Medeiros, L. I. B.; Faggion, P. L.; Alves, S. S. O. Análise do Desempenho de ETR no Monitoramento Dinâmico de Estrutura Metálica por Leitura Contínua de Direções. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72, n. 2, 280-293, 2020.
- Muguiro, M. R.; Faggion, P. L.; Veiga, L. A. K.; Nadal, C. A.; Da Cruz, W. A.; Soares, M. A.; Figueira, I. F. R. Avaliação Da Anomalia Da Gravidade Na Região Do Barramento Da Usina Hidrelétrica De Mauá. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 73, n. 1, 55-62, 2017.
- Nadal, C. A.; Faggion, P. L.; Brasil, R. P.; Hillesheim, V. Controle geodésico de trilhos industriais utilizando autocolimação óptica. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 62, n. Edição Especial 01, 317-321, 2010.
- Nadal, M. A. D.; Veiga, L. A. K.; Faggion, P. L.; Nadal, C. A.; Soares, M. A. Emprego de estações totais robotizadas na automação, controle e aquisição de dados, voltado ao monitoramento de barragens. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 5, n. 1, 18-30, 2017.
- PEREIRA, I. S. *Aplicação de Nuvens de pontos para o monitoramento de fissuras e trincas em estruturas antrópicas*. Curitiba, 2023. 479f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2023.
- Salvini, R.; Vanneschi, C.; Lanciano, C.; Maseroli, R. Ground Displacements Estimation through GNSS and Geometric Leveling: A Geological Interpretation of the 2016–2017 Seismic Sequence in Central Italy. *Geosciences*, v. 12, n. 4, 167, 2022.

-
- Santos, D. P.; Faggion, P. L.; Veiga, L. A. K. Transporte de altitude para o Pico do Camapuã utilizando nivelamento trigonométrico método *leap-frog*. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 17, p. 295-316, 2011.
- SCHWIEGER, V.; KEREKES, G.; LERKE, O. Image-based target detection and tracking using image-assisted robotic total stations.In: SERGIYENKO, O.; FLORES-FUENTES, W.; MERCORELLI, P.(Org.). *Machine Vision and Navigation*, 2020, p. 133-169.
- Silva, R. N. F.; Faggion, P. L.; Veiga, L. A. K. Avaliação do método de nivelamento trigonométrico, leap-frog, no monitoramento de recalques em barragem de concreto de médio porte. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 66, n. 1, 45-57, 2014.
- Szeliski, R. *Computer Vision: algorithmsandapplications*. London, England: Springer Nature, 2022.
- Veiga, L. A. K.; Zanetti, M. A. Z.; Faggion, P. L. *Fundamentos de Topografia*. Curitiba, Brasil: UFPR, 2012.
- Zonta, C.; Nadal, C. A.; Prata, J. G. Monitoramento geodésico tridimensional em ensaios estruturais de madeira. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 20, n. 1, 84-99, 2014.
- Zulkifli, N.; Ahmad, A. Comparison of bundle adjustment software for camera calibration in close range photogrammetry. *Computer Science*, 1-9, 2008.