

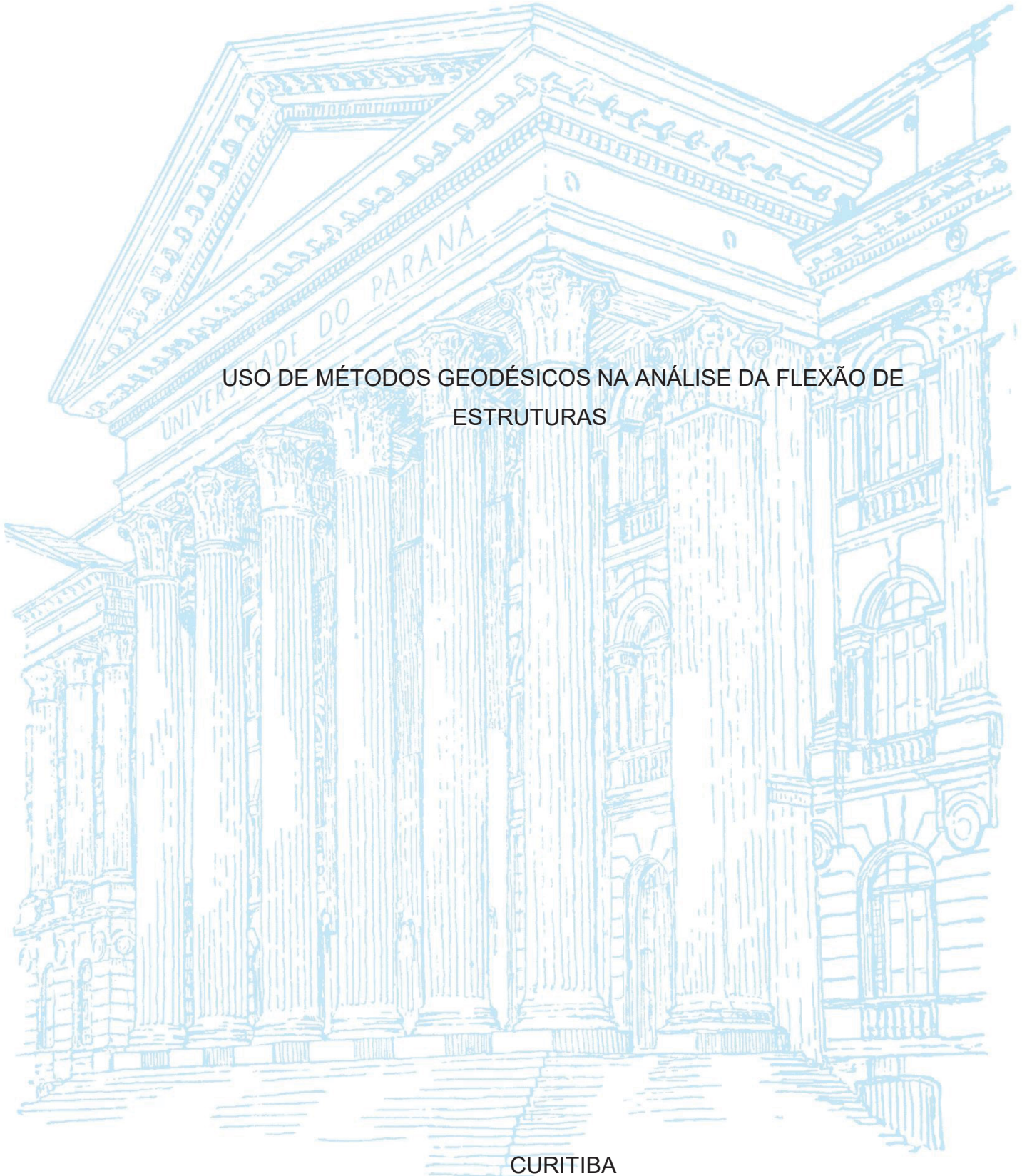
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LEANDRO ÍTALO BARBOSA DE MEDEIROS

USO DE MÉTODOS GEODÉSICOS NA ANÁLISE DA FLEXÃO DE
ESTRUTURAS

CURITIBA

2024



LEANDRO ÍTALO BARBOSA DE MEDEIROS

USO DE MÉTODOS GEODÉSICOS NA ANÁLISE DA FLEXÃO DE ESTRUTURAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, do Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luis Faggion

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Medeiros, Leandro Ítalo Barbosa de
Uso de métodos geodésicos na análise da flexão de estruturas / Leandro
Ítalo Barbosa de Medeiros. – Curitiba, 2024.
1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências
da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Pedro Luis Faggion

1. Análise estrutural (Engenharia). 2. Fotogrametria terrestre. 3. Concreto
armado. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação
em Ciências Geodésicas. III. Faggion, Pedro Luis. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **LEANDRO ÍTALO BARBOSA DE MEDEIROS** intitulada: **USO DE MÉTODOS GEODÉSICOS NA ANÁLISE DA FLEXÃO DE ESTRUTURAS**, sob orientação do Prof. Dr. PEDRO LUIS FAGGION, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor 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, 27 de Novembro de 2024.

Assinatura Eletrônica

28/11/2024 10:19:45.0

PEDRO LUIS FAGGION

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

06/12/2024 13:35:10.0

LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

11/12/2024 20:13:09.0

CARLOS AURÉLIO NADAL

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

03/12/2024 16:45:37.0

IRINEU DA SILVA

Avaliador Externo (ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS -
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EESC-USP)

Assinatura Eletrônica

28/11/2024 16:21:33.0

ÉRICA SANTOS MATOS BALUTA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho a todos os meus professores e professoras.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria e força, por me guiar durante toda essa jornada, iluminando meu caminho nos momentos de incerteza e concedendo-me perseverança para superar cada desafio.

À minha família, minha base e inspiração, meu amor eterno e minha gratidão sem fim. À minha mãe, Remédios, por me ensinar o valor do esforço e da dedicação. À minha esposa, Rebeca, por seu apoio incondicional, e por ser a minha base na grande maioria do tempo. Ao meu filho, Joaquim, por ser meu motivo diário na busca dos meus objetivos. Aos meus irmãos. Este trabalho também é todos vocês.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Pedro Luis Faggion, agradeço por todo o conhecimento compartilhado desde o mestrado e pela confiança depositada em mim. Agradeço por sua orientação, paciência, e por acreditar no potencial da pesquisa.

Ao Coordenador do GEENG, Prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga, obrigado por todo o apoio e conhecimentos compartilhados.

Aos professores do nosso grupo de pesquisa: Prof. Dr. Wander da Cruz e Prof. Dr. Carlos Aurelio Nadal, obrigado pelos ensinamentos e pela amizade.

Aos meus amigos de GEENG, que dividiram comigo não apenas o espaço de trabalho, mas também sonhos e risadas. Alan, Ana Luiza, Andreas, Day, Felipe, Livia, Paulo e Samir, obrigado por cada conversa, por cada ajuda e por tornarem esta caminhada mais leve e prazerosa. Agradeço em especial ao amigo e conterrâneo Rubens Benevides, pela parceria e imensa ajuda nos processamentos.

Ao CNPQ pela bolsa de estudos no início do doutorado.

Ao LACTEC pela disponibilidade da equipe e do laboratório de estruturas para os ensaios.

Ao PPGCG, à UFPR e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta tese, meus sinceros agradecimentos.

“A educação é a chave para abrir outros direitos humanos.”

Katarina Tomasevski

RESUMO

Historicamente, a Geodésia tem sido amplamente utilizada no monitoramento de estruturas. Sua aplicação em trabalhos de engenharia civil, especialmente no uso de métodos como o nivelamento geométrico e o nivelamento trigonométrico de alta precisão possibilitam a detecção de deslocamentos estruturais. A Geodésia corrobora de maneira significativa ao fornecer medições de deslocamentos com acurácia, contribuindo com a complementação de resultados obtidos por outros métodos. Este estudo teve como objetivo monitorar e analisar deslocamentos de uma viga de concreto armado, submetida a ensaios de flexão, utilizando diferentes métodos de medição de deslocamento. A viga foi projetada e ensaiada conforme as diretrizes da norma ABNT NBR 12655:2015, que regulamenta a produção e controle de concreto de cimento Portland. Foram empregados quatro métodos principais de monitoramento: fotogrametria terrestre, nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico com estação total robotizada e varredura laser. Os resultados foram comparados aos obtidos de um relógio comparador de deslocamentos acoplado à prensa. Ao compará-los, foi possível avaliar a acuracidade e a consistência dos dados de deslocamento ao longo do ensaio. Os resultados indicaram que o nivelamento geométrico e o nivelamento trigonométrico utilizando estação total foram os métodos mais consistentes, identificando a maior concentração de deslocamentos na região central da viga. A fotogrametria terrestre forneceu uma visão distribuída dos deslocamentos ao longo de diversos pontos da viga, capturando simultaneamente os dados. Esta foi eficaz em registrar deslocamentos máximos em pontos críticos da viga sob cargas elevadas. O laser scanner terrestre, embora menos preciso em comparação aos outros métodos geodésicos, foi capaz de detectar o comportamento geral da estrutura ao longo do ensaio. Apesar do ruído nas medições iniciais, o LST forneceu uma visão geral do comportamento da viga, reforçando o padrão de deformação observado pelos outros métodos. A comparação entre os métodos geodésicos e o relógio comparador demonstrou que estes podem ser utilizados para o ensaio de flexão de viga, desde que obedecidos critérios de posicionamento e precisão dos equipamentos utilizados.

Palavras-chave: monitoramento estrutural; fotogrametria terrestre; ensaio de flexão, concreto armado.

ABSTRACT

Historically, Geodesy has been widely used in monitoring structures. Its application in civil engineering work, especially in the use of methods such as geometric leveling and high-precision trigonometric leveling, makes it possible to detect structural displacements. Geodesy significantly corroborates this by providing accurate displacement measurements, contributing to the complement of results obtained by other methods. This study aimed to monitor and analyze displacements of a reinforced concrete beam, subjected to flexural tests, using different displacement measurement methods. The beam was designed and tested in accordance with the guidelines of the ABNT NBR 12655:2015 standard, which regulates the production and control of Portland cement concrete. Four main monitoring methods were used: terrestrial photogrammetry, geometric leveling, trigonometric leveling with a robotic total station and laser scanning. The results were compared to those obtained from a displacement comparator clock coupled to the press. By comparing them, it was possible to evaluate the accuracy and consistency of the displacement data throughout the test. The results indicated that geometric leveling and trigonometric leveling using total station were the most consistent methods, identifying the highest concentration of displacements in the central region of the beam. Terrestrial photogrammetry provided a distributed view of displacements along several points on the beam, simultaneously capturing the data. This was effective in recording maximum displacements at critical points of the beam under high loads. The terrestrial laser scanner, although less accurate compared to other geodetic methods, was able to detect the general behavior of the structure throughout the test. Despite the noise in the initial measurements, LST provided an overview of the beam's behavior, reinforcing the deformation pattern observed by the other methods. The comparison between the geodetic methods and the dial indicator demonstrated that they can be used for the beam bending test, as long as the positioning and accuracy criteria of the equipment used are met.

Keywords: structural monitoring; terrestrial photogrammetry; flexural test, reinforced concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2.1 – Disposição da barra utilizada no experimento	22
Figura 2.2.2 – Grampos utilizados para fixar a barra aos tripés.	23
Figura 2.2.3 – Barra exposta a carga de 6 kg	23
Figura 2.2.4 – Disposição das miras utilizadas.....	24
Figura 2.2.5 – Discretização do modelo da viga.....	27
Figura 2.3.1 – Resultados encontrados do nivelamento geométrico para a mira V1	27
Figura 2.3.2 – Resultados encontrados do nivelamento geométrico para a mira V2	28
Figura 2.3.3 – Resultados encontrados do nivelamento geométrico para a mira V3	28
Figura 2.3.4 – Resultado da modelagem da viga para a carga de 2 kg	28
Figura 2.3.5 – Resultado da modelagem da viga para a carga de 4 kg	29
Figura 2.3.6– Resultado da modelagem da viga para a carga de 6 kg	29
Figura 2.3.7 – Resultado da modelagem da viga para a carga de 8 kg	29
Figura 2.3.8 – Resultado da modelagem da viga para a carga de 10 kg	30
Figura 3.2.1 – Objeto de estudo e alvos utilizados nas mensurações.	38
Figura 3.2.2 – ETR TS15 e Nível DNA03 instalados sobre tripés industriais.....	39
Figura 3.2.3 – Distribuição dos alvos fotogramétricos	40
Figura 3.2.4 – Demonstração da aplicação das cargas.....	41
Figura 3.2.5 – Princípio da detecção automática de prismas em uma ETR.....	43
Figura 3.2.6 – Figura Modelo de aquisição de múltiplas imagens a partir do SfM. ...	45
Figura 3.3.1 – Evolução de deslocamentos – niv. geométrico.....	47
Figura 3.3.2 – Nomenclatura aplicada aos miniprismas	47
Figura 3.3.3 – Evolução de deslocamentos – nivelamento trigonométrico.	48
Figura 3.3.4 – Disposição dos alvos utilizados para o processo fotogramétrico.	49
Figura 3.3.5 – Evolução de deslocamentos – nivelamento por fotogrametria	50
Figura 3.3.6 – Sobreposição dos gráficos para a carga de 10 kg.....	50
Figura 4.2.1 – Processo de montagem da caixa e ferragem da viga	60
FIGURA 4.2.2 – Viga em processo de cura.	61
Figura 4.2.3 – Prensa hidráulica e apoios	61
Figura 4.2.4 – Ajuste da viga no sistema da prensa hidráulica.....	62
Figura 4.2.5 – Central de Controle da prensa hidráulica	63
Figura 4.2.6 – Relógio comparador de flexão.....	64
Figura 4.2.7 – Posicionamento das miras de leitura de código de barras.....	65

Figura 4.2.8 – Nível geodésico DNA03 sobre tripé industrial em local estável.	66
Figura 4.2.9 – Estação total robotizada ETR TS15 sobre tripé industrial.	67
Figura 4.2.10 – Barra graduada para tomada de imagens fotogramétricas	68
Figura 4.2.11 – Alvos detectados automaticamente pós-processamento	69
Figura 4.2.12 – Laser scanner BLK360 utilizado	70
Figura 4.2.13 – Nuvens de pontos resultantes da segmentação	71
Figura 4.2.14 – Nomenclatura e cargas adotadas para as nuvens de pontos	72
Figura 4.2.15 - Nuvem N11 antes (a) e depois (b) do pré-processamento	73
Figura 4.2.16 – Aplicação do DB-SCAN na nuvem N11	73
Figura 4.2.17 – Limpeza das bordas das nuvens pelo índice de linearidade.....	74
Figura 4.2.18 – Ajuste das quatro retas para a nuvem N11.....	75
Figura 4.3.1 – Resultados no formato gráfico para o nivelamento geométrico	77
Figura 4.3.2 – Resultados gráficos para o nivelamento trigonométrico	78
Figura 4.3.3 – Gráfico de resultados para a fotogrametria terrestre	79
Figura 4.3.4 - Pontos de interseção das retas inferiores (a) e superiores (b)	80
Figura 4.3.5 - Crescimento do deslocamento (direita e esquerda) de cada nuvem ..	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2.1 – Incrementos de Cargas	24
Tabela 2.3.1 – Resultados de deslocamento máximo	30
Tabela 3.2.1 – Cargas utilizadas em cada série de medições.....	41
Tabela 3.3.1 – Leituras do nivelamento geométrico.	46
Tabela 3.3.2 – Diferenças de nível com relação à mira de referência em metros.....	46
Tabela 3.3.3 – Coordenadas verticais (Z) dos prismas para cada série.	48
Tabela 3.3.4 - Coordenadas verticais dos alvos fotogramétricos (m)	49
Tabela 4.3.1 – Resultados encontrados com uso do relógio comparador	76
Tabela 4.3.2 – Resultados para o nivelamento geométrico	76
Tabela 4.3.3 – Resultados para o monitoramento trigonométrico.	77
Tabela 4.3.4 – Resultados para o monitoramento por fotogrametria	78
Tabela 4.3.5 - Parâmetros das reta estimada para cada nuvem de pontos LST.	79

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	13
1.1 INTRODUÇÃO	13
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
CAPÍTULO 2	20
2.1 INTRODUÇÃO	20
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	22
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
2.4 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	32
CAPÍTULO 3	35
3.1 INTRODUÇÃO	35
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	37
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
REFERÊNCIAS	53
CAPÍTULO 4	58
4.1 INTRODUÇÃO	58
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	59
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
5.1 PRECISÃO	87
5.2 ABRANGÊNCIA ESPACIAL.....	88
5.3 CONSISTÊNCIA DOS DADOS	89
5.4 FACILIDADE DE APLICAÇÃO	90
REFERÊNCIAS	92
6 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS	97

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), uma estrutura deve atender a dois tipos de estados limites: os de serviço, que estão associados à durabilidade, ao conforto dos usuários e à estética da construção; e os estados limites últimos, que se referem ao colapso ou à falha da estrutura, interrompendo seu uso de forma definitiva. Em outras palavras, grandes estruturas devem ser projetadas para suportar os esforços aos quais são submetidas, sem alcançar um estado limite crítico.

O concreto armado é o material estrutural mais utilizado na construção, devido à sua combinação de economia e durabilidade, desde que sejam respeitados seus limites de carga e esforços. Desenvolvido para aproveitar as propriedades complementares de seus componentes, o concreto armado alia a resistência à compressão e a durabilidade do concreto com a elevada resistência à tração do aço. Além de ser relativamente barato, esse material oferece flexibilidade para se moldar a diferentes finalidades construtivas.

Nas grandes obras, tais como edifícios e pontes, os principais elementos estruturais são os pilares e as vigas. Em uma viga submetida à flexão, dois tipos de esforços predominantes podem ser identificados: o momento fletor, que causa a curvatura da viga, e o esforço cortante, que tende a provocar deslizamentos internos entre as seções transversais. Além desses, existe ainda o esforço normal, geralmente considerado insignificante em vigas convencionais, exceto no caso de vigas protendidas, onde pode ter uma relevância maior (TYMCHUK et al., 2016).

A flexão estrutural é um fenômeno que ocorre quando um elemento estrutural, como uma viga, pilar ou laje, é submetido a um carregamento externo que causa sua curvatura e deformação ao longo de seu eixo longitudinal (THOMAS, 2020). Esse processo resulta na geração de tensões internas, tanto de compressão quanto de tração, as quais variam ao longo da seção transversal do elemento.

O controle e o monitoramento da flexão são fundamentais na engenharia, pois permitem avaliar a capacidade da estrutura de suportar as cargas previstas durante sua vida útil, garantindo a segurança, a funcionalidade e a durabilidade da construção, além de auxiliar na detecção de falhas ou deformações excessivas, visando a tomada de medidas preventivas que assegurem a integridade e a segurança destas obras

(BOLINA et al., 2019). Desse modo, a NBR 6118 (ABNT, 2014) vem definir e orientar as condições de dimensionamento e execução de obras estruturais a fim de que o sistema atenda a esses requisitos. De maneira geral, são utilizados dois parâmetros principais para a determinação da armadura longitudinal e das dimensões da seção: o dimensionamento à flexão e a análise do deslocamento vertical.

O dimensionamento à flexão de vigas de concreto armado visa determinar as dimensões da seção transversal e a quantidade de armadura de aço necessárias para resistir aos momentos fletores aplicados, assegurando segurança estrutural e desempenho adequado. A partir das características geométricas e materiais da viga, bem como das cargas atuantes, calcula-se o momento fletor máximo e verifica-se a capacidade resistente do concreto. Com base nesses dados, dimensiona-se a armadura de aço, garantindo que as tensões e deformações permaneçam dentro dos limites normativos. O projeto final considera o controle de fissuração, deformações, o espaçamento das barras e o uso de armaduras transversais, atendendo aos critérios de segurança e normas técnicas vigentes. (OLIVEIRA, 2018).

O deslocamento vertical, ou flecha, em vigas de concreto armado é um parâmetro essencial para avaliar o comportamento estrutural sob cargas aplicadas, influenciado por fatores como o tipo de carregamento, a rigidez da seção, a distribuição da armadura e as propriedades dos materiais. O controle desse deslocamento é fundamental para garantir a segurança, o conforto dos usuários e a durabilidade da estrutura, evitando problemas como fissuras excessivas e danos aos acabamentos (LEONHARDT e MÖNNIG, 2008).

Uma forma de analisar o comportamento de vigas sob flexão é por meio de um ensaio experimental com uma viga bi-apoiada, submetida a um carregamento aplicado na parte superior, utilizando uma prensa hidráulica. Este ensaio permite avaliar as deformações, os deslocamentos verticais, bem como o desenvolvimento de fissuras na região central da viga ao longo de sua altura. O teste é realizado em um ambiente de laboratório, onde as condições de temperatura são controladas e a pressão aplicada é cuidadosamente monitorada, proporcionando uma análise precisa do comportamento da viga sob o efeito do carregamento pontual (LIMA e FONTES, 2003).

Métodos geodésicos têm sido largamente empregados também para realizar a medição de deslocamentos em estruturas naturais e artificiais. O *Department of the Army* dos Estados Unidos (1994) classifica as técnicas de medição e instrumentação

para o monitoramento geométrico das deformações estruturais em duas categorias principais: as medidas geotécnicas e estruturais de deformações locais, e os levantamentos geodésicos.

Os métodos geotécnicos, ou não geodésicos, concentram-se no uso de instrumentação especializada para avaliar as deformações e deslocamentos causados por cargas aplicadas. Entre os principais dispositivos utilizados estão os extensômetros, que medem a deformação ao longo de um eixo específico da estrutura, e os inclinômetros, que detectam variações de inclinação associadas à curvatura da viga ou do elemento monitorado. Além disso, os medidores de deslocamento, como os relógios comparadores, são empregados para registrar mudanças na deflexão ao longo do tempo (LEE et al., 2022; MARKOVIĆ et al., 2019; GRAÇA; FAGGION, 2016).

Silveira (2003) define o monitoramento geodésico de estruturas como sendo o emprego de métodos de levantamentos geodésicos para avaliar e analisar a movimentação de pontos localizados na estrutura monitorada, referenciados a um sistema de coordenadas externo, pré-estabelecido pelo profissional responsável. Tradicionalmente, no campo das Geociências, a medição de deflexões estruturais, recalques, deslocamentos e deformações em estruturas é realizada por meio de métodos de auscultação geodésica, como o nivelamento geométrico e trigonométrico, a gravimetria e o posicionamento GNSS (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). No entanto, nas últimas décadas, avanços tecnológicos nas áreas de imageamento, metrologia óptica e visão computacional têm impulsionado o desenvolvimento de novas técnicas de medição, que oferecem precisão aprimorada e maior eficiência no monitoramento de estruturas (BESHR et al., 2024; AL-RUZOUQ et al., 2023; PEREIRA, 2023; LENARTOVICZ et al., 2014)

Entre essas inovações, destacam-se os sistemas de varredura a laser terrestre, utilizando Laser Scanner Terrestre (LST), que representam uma das tecnologias mais avançadas para o monitoramento estrutural. O uso do LST vem sendo amplamente explorado devido às suas vantagens, como alta precisão e capacidade de captura de dados tridimensionais detalhados. De acordo com o US Department of the Army (2018), o Laser Scanner Terrestre (LST) permite uma avaliação estrutural completa, possibilitando a identificação de deslocamentos e

rotações do objeto monitorado. O mesmo documento afirma que o LST é aceito para estudos de monitoramento apenas em modo terrestre, pois os lasers aerotransportados ainda não conseguem fornecer o detalhamento e a precisão necessários. Há ainda um esforço contínuo para minimizar as desvantagens associadas, como o grande volume de dados gerados e a necessidade de processamento mais demorado (SCAIONI; WANG, 2016; ALVES, 2022).

Destaca-se ainda o uso da fotogrametria terrestre a curtas distâncias, a qual tem obtido destaque devido à sua rápida evolução, impulsionada pelo avanço tecnológico dos sensores de captura de imagens, incluindo câmeras de aparelhos celulares (Tommaselli et al., 1999; VÎLCEANU et al., 2022). Esta técnica de medição e modelagem tridimensional utiliza imagens captadas por câmeras digitais posicionadas próximas ao objeto de interesse, permitindo a geração de modelos 3D detalhados e precisos a partir de fotografias convencionais. Sua aplicação é ampla, abrangendo áreas como engenharia, arquitetura, conservação de patrimônio e monitoramento estrutural (BIEDA et al., 2020). A fotogrametria se destaca pela versatilidade e pelo baixo custo, em comparação com outras técnicas, como o laser scanner, além de ser adequada para ambientes de difícil acesso ou com restrições de espaço, oferecendo uma solução eficiente para levantamentos em diferentes contextos (BREZZI et al. 2024).

Siguel et al. (2013), destaca que os métodos geodésicos são particularmente úteis para fornecer uma visão global e detalhada das deformações ao longo de grandes áreas ou estruturas complexas, enquanto os métodos não geodésicos são vantajosos para a medição precisa de deslocamentos pontuais ou deformações localizadas, oferecendo dados complementares essenciais para uma análise estrutural completa. Além disso, a utilização de métodos geodésicos é recomendada para o monitoramento de estruturas, pois permite avaliar o comportamento dos alvos monitorados em relação a um referencial externo ao corpo da estrutura. Por outro lado, o monitoramento geotécnico, que utiliza equipamentos como extensômetros e transdutores de deslocamento, não permite uma avaliação absoluta das variações posicionais da estrutura (MEDEIROS, 2020).

Além de impactar positivamente no aperfeiçoamento dos métodos de monitoramento, os avanços tecnológicos têm corroborado no desenvolvimento das simulações computacionais, com destaque para os modelos numéricos estruturais, onde se incluem os modelos de elementos finitos (MEF). Estes modelos permitem a

simulação, por meio de uma maquete digital quase perfeita da estrutura, onde são representados seus elementos em composição, dimensão e forma.

Diante do exposto, este trabalho busca avaliar e apresentar como diferentes métodos de monitoramento geodésico, incluindo nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico, fotogrametria de curta distância e Laser Scanner Terrestre (LST), podem ser utilizados de maneira complementar para a análise de deformações em uma viga de concreto armado submetida a cargas em laboratório.

O estudo foi conduzido em um ambiente controlado, onde a viga foi exposta a carregamentos incrementais, simulando condições reais de uso, e monitorada simultaneamente pelos quatro métodos mencionados.

Neste contexto, estabeleceu-se o seguinte problema de pesquisa: como a combinação de métodos geodésicos e não geodésicos pode otimizar o monitoramento da flexão de estruturas?

Para o desenvolvimento da pesquisa, parte-se da hipótese de que se métodos geodésicos forem combinados com sensores tradicionais de deformação, então o detalhamento da flexão estrutural será mais abrangente.

O diferencial inédito desta pesquisa reside em sua abordagem integrada, que combina diversos métodos de monitoramento geodésico, para proporcionar uma análise mais completa e precisa das deformações em estruturas de concreto armado. Ao comparar os dados coletados por esses métodos com os resultados obtidos com um método tradicional, como o relógio comparador de deslocamentos, a pesquisa busca demonstrar como a combinação pode fornecer uma verificação cruzada eficaz, aumentando a confiabilidade das medições.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar a aplicabilidade de métodos geodésicos na medição de flexões estruturais em ambiente laboratorial.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Comparar os resultados obtidos com técnicas geodésicas aos resultados de métodos não geodésicos: relógio medidor de flexão.
2. Determinar as vantagens e limitações do uso de cada método (geodésico e não geodésico) na análise de flexão estrutural.
3. Investigar como a integração de métodos geodésicos e não geodésicos pode melhorar a eficiência do monitoramento de deformações.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese foi organizada em cinco capítulos, abrangendo a pesquisa por meio do desenvolvimento de três artigos que exploram a proposta apresentada.

Inicialmente, no capítulo 1 é apresentado a introdução do trabalho que contempla o problema de pesquisa, a hipótese e os objetivos da pesquisa.

No capítulo 2, apresenta-se o artigo intitulado "**Análise da deformação de barra metálica por nivelamento geométrico e modelagem por elementos finitos**", na Revista Brasileira de Geomática, 2024. Neste trabalho, foi realizado o monitoramento de uma viga de alumínio submetida a diferentes cargas, com o objetivo de verificar os deslocamentos utilizando o nivelamento geométrico com nível geodésico e compará-los aos deslocamentos previstos por meio de modelagem por elementos finitos. O intuito principal foi verificar a similaridade das condições de contorno aplicadas ao modelo, tendo em vista a homogeneidade do material da estrutura monitorada, com as suas respectivas características reais. A diferença dos resultados obtidos por ambas as metodologias mostrou variações na ordem de décimos de milímetro.

No capítulo 3, apresenta-se o segundo artigo do trabalho, intitulado "**Análise comparativa da flexão de barra metálica sob cargas, por diferentes métodos geodésicos: nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico e fotogrametria a curtas distâncias**", na Revista de Geociências do Nordeste, 2024. Este trabalho teve como finalidade, o estudo prévio da avaliação da aplicação conjunta dos diferentes métodos de monitoramento geodésico, ainda para um modelo de estrutura menos complexo, de material mais homogêneo. Os experimentos realizados

para o desenvolvimento dos artigos 1 e 2 subsidiaram o planejamento de execução do experimento final.

No capítulo 4, apresenta-se uma proposta de redação inicial do terceiro artigo intitulado "**Uso de métodos geodésicos na análise da deflexão de estruturas de concreto armado: uma análise comparativa.**" Neste artigo, são apresentados a metodologia e os resultados de um experimento de monitoramento realizado em laboratório. Neste trabalho, realizou-se o monitoramento de uma viga de concreto armado exposta ao ensaio de flexão simples. Durante o ensaio, a viga foi monitorada com a aplicação simultânea de 4 métodos de monitoramento: nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico (leap frog), fotogrametria terrestre a curtas distâncias, e varredura a laser terrestre. Os resultados apresentam o desempenho de cada uma das metodologias aplicadas, comparadas aos resultados do relógio comparador de flexão, também utilizado durante o experimento.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais desta pesquisa, incluindo as conclusões obtidas e as recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DE BARRA METÁLICA POR NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS

Resumo: O nivelamento geométrico é uma metodologia de medição utilizada para determinar diferenças de nível entre pontos de interesse. Essencial em diversos projetos de engenharia, tal procedimento, quando executado com equipamentos adequados e com o devido rigor do levantamento, é capaz de apresentar resultados com precisão submilimétrica, o que lhe permite uma vasta empregabilidade em procedimentos de monitoramento das mais diversas estruturas naturais e antrópicas. Por outro lado, os elementos finitos são uma abordagem de modelagem numérica empregada para simular o comportamento estrutural de materiais sob diferentes condições de carga e restrição. Nesse método, a estrutura é discretizada em pequenos elementos interconectados, permitindo a obtenção de respostas precisas em diferentes pontos. Neste trabalho, realizou-se o monitoramento de uma viga de alumínio, exposta a diferentes cargas, a fim de verificar os deslocamentos encontrados com uso de nivelamento geométrico com nível geodésico, comparando-se os deslocamentos esperados a modelados por elementos finitos. Os resultados encontrados por ambas as metodologias apresentam variações na casa do décimo do milímetro.

2.1 INTRODUÇÃO

Define-se deformação estrutural como o fenômeno em que uma estrutura sofre alterações em sua forma, tamanho ou orientação sob a influência de forças externas ou cargas aplicadas (FOSSÉN, 2010). Essas mudanças podem ser temporárias ou permanentes, dependendo da intensidade das forças e das características do material utilizado na construção da estrutura. Quando uma carga é aplicada a uma estrutura, como um edifício, ponte, barragem ou qualquer outra construção, ela responde à força gerando tensões internas (MEDEIROS; FAGGION; ALVES, 2020). Se as tensões excederem a capacidade do material para resistir a elas, ocorrerá a deformação.

Existem três tipos principais de deformação estrutural: deformação elástica, que é temporária e reversível, ou seja, quando as forças aplicadas são removidas, a estrutura retorna à sua forma original; deformação plástica, que é permanente e ocorre quando as forças aplicadas excedem o limite elástico do material, e nesse estágio, a estrutura sofre uma deformação irreversível e não consegue mais recuperar sua forma original; e a deformação de ruptura, a qual ocorre quando a estrutura não suporta mais

as forças aplicadas e se rompe (HIBBELER, 2010). Esse tipo de deformação é extremamente indesejável, pois pode levar a consequências catastróficas (ABNT, 2004).

O estudo da deformação estrutural é fundamental para que engenheiros e arquitetos projetem estruturas seguras e duráveis (JERKE; FAGGION; DA CRUZ, 2022). Análises precisas são realizadas para garantir que as tensões permaneçam dentro de limites seguros, evitando a falha estrutural (WU ET AL, 1996). Técnicas como o cálculo de tensões e a simulação computacional são utilizadas para prever o comportamento das estruturas sob diferentes condições de carga (PACHECO; LIMA; LIMA, 2013; PELISSER ET AL, 2018). Nesse contexto, o nivelamento geométrico geodésico e o modelo de elementos finitos emergem como duas poderosas ferramentas utilizadas para investigar e compreender o comportamento de materiais em situações de deformação.

O nivelamento geométrico é uma técnica de medição altamente precisa e confiável, amplamente aplicada para determinar as diferenças de nível entre diferentes pontos da superfície terrestre, bem como no monitoramento de usinas (SILVA; FAGGION; VEIGA, 2014); detecção de deslizamentos (SALVINI ET AL., 2022), monitoramento de estruturas metálicas (CORNEL ET AL, 2018); prédios antigos (FREGONESE, 2013), e diversas outras estruturas, sendo também utilizado na validação de diversas outras metodologias de detecção de movimentos estruturais verticais (GUMUS; SELBESOGLU; CELIK, 2016). Essa metodologia é fundamental para o estudo de deformações, uma vez que permite a detecção de deslocamentos verticais, com precisão submilimétrica.

Por sua vez, o modelo de elementos finitos é uma abordagem numérica utilizada para analisar o comportamento mecânico de sólidos complexos, como barras, placas e estruturas tridimensionais (CLO. Essa técnica divide o corpo em elementos menores, onde as equações diferenciais que descrevem o comportamento mecânico são resolvidas de forma iterativa. Isso possibilita a previsão de deformações e tensões em diferentes partes da estrutura, auxiliando na identificação de pontos críticos e na otimização do projeto (CLOUGH, 1960; CERVERA, 2013; BISHOP, 2014; GONZÁLEZ; LEE; PARK, 2017).

Através da combinação do nivelamento geométrico com nível geodésico, que permite a obtenção de deslocamentos precisos e deformações verticais, e do modelo de elementos finitos, capaz de simular o comportamento mecânico do material sob

diferentes condições de carga, faz-se possível realizar uma análise completa da deformação estrutural em resposta a determinados carregamentos. Deste modo, o presente estudo visa aplicar essas duas metodologias em conjunto para investigar o comportamento mecânico de uma barra de um alumínio sob diferentes cenários de carga, identificando pontos críticos de tensão e deformação.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná. Para tanto, utilizou-se uma barra (perfil quadrado) de alumínio com comprimento de 2,03m, apoiada sobre dois tripés topográficos (Figura 2.2.1). A barra de alumínio utilizada possui 38mm de lado, com espessura da parede de 1mm. O comprimento adotado da barra foi escolhido em função do espaço disponível para um segundo experimento, a ser realizado em uma prensa hidráulica, para ensaio de uma viga de concreto armado de igual comprimento longitudinal.

Figura 2.2.1 – Disposição da barra utilizada no experimento



Fonte: Os autores (2023).

A fim de evitar a elevação das extremidades da barra com a aplicação das cargas ao centro, utilizaram-se grampos de fixação em cada uma das extremidades, conectando a barra aos tripés, como apresentado na Figura 2.2.2.

Figura 2.2.2 – Grampos utilizados para fixar a barra aos tripés.



Fonte: Os autores (2023).

A fim de estimular a deflexão central da barra, utilizou-se um conjunto de cargas, em formato de anilhas (Figura 2.2.3). Cada anilha possui massa de 1 kg, sendo aplicadas duas a duas. Ou seja, a cada série, incrementou-se uma carga de 2 kg, totalizando 10 kg. Em seguida, foram retiradas todas as cargas e realizado um novo levantamento, a fim de verificar o comportamento da barra sem carga à posição inicial.

Figura 2.2.3 – Barra exposta a carga de 6 kg



Fonte: Os autores (2023).

A Tabela 2.2.1 apresenta o incremento de carga em cada série.

Tabela 2.2.1 – Incrementos de Cargas

Série	Cargas
1	0 kg
2	2 kg
3	4 kg
4	6 kg
5	8 kg
6	10 kg
7	0 kg

Fonte: Os autores (2023)

Para o nivelamento geométrico, utilizou-se um nível geodésico digital modelo Leica DNA03, instalado sobre um tripé industrial.

Para as observações, foram utilizadas fitas de código de barras para leitura de nível digital, desenvolvidas por Andolfato (2010). Para o controle da variação da temperatura, a fim de evitar dilatação das miras, manteve-se o ambiente de ensaio controlado, com variação de temperatura do início ao final do experimento inferior a dois graus.

Posicionaram-se quatro miras nos pontos medidos: uma mira de referência, fixada na parede localizada ao fundo da sala, e três miras fixadas na barra. Uma à esquerda, uma ao centro e uma à direita, como mostra a Figura 2.2.5. As miras foram nomeadas como R1, para a mira de referência, e V1, V2 e V3, para as miras monitoradas.

Figura 2.2.4 – Disposição das miras utilizadas



Fonte: Os Autores (2023).

Adotou-se então o modelo matemático do nivelamento geométrico, conforme NBR 13133 (ABNT, 2021). O procedimento consistiu em realizar uma leitura da mira de ré, e em seguida das miras de vante para cada uma das séries, ou seja, para 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, as variações de diferença de nível a cada incremento de carga são iguais ao deslocamento vertical da estrutura nos pontos medidos.

Para efeito de comparação dos resultados, utilizou-se o método dos elementos finitos (MEF), uma metodologia amplamente utilizada para analisar o comportamento de estruturas e sistemas complexos em engenharia e ciências aplicadas (DA SILVA FILHO, 2009). O modelo de elementos finitos é uma ferramenta poderosa que permite a análise de problemas complexos que não podem ser resolvidos de forma analítica. É amplamente utilizado em diversas áreas da engenharia, incluindo análise estrutural, mecânica dos fluidos, transferência de calor, eletromagnetismo e muitas outras aplicações.

O MEF é baseado na subdivisão da estrutura em pequenos elementos geométricos, nos quais as equações matemáticas que descrevem o comportamento físico do problema são aproximadas (HUGHES ET AL, 2012). O processo do modelo de elementos finitos envolve os seguintes passos: I) Discretização: A estrutura ou sistema é dividido em elementos finitos. Cada elemento é uma geometria simples, como triângulos ou quadrados em 2D, ou tetraedros e hexaedros em 3D. Esses elementos são conectados através de nós (ou pontos), que são os pontos onde as quantidades físicas do problema são determinadas. II) Formulação das equações: Para cada elemento, são estabelecidas as equações que descrevem o comportamento físico do problema, como equações de equilíbrio, transporte de calor, dinâmica estrutural, entre outras. Essas equações são geralmente obtidas a partir de princípios físicos e leis de conservação relevantes. III) Aplicação de condições de contorno: Condições de contorno são impostas nos nós ou elementos para representar as condições reais do problema, como fixação de pontos, aplicação de forças, temperaturas, entre outras restrições. IV) Montagem do sistema global de equações: As equações de todos os elementos são combinadas para formar um sistema global de equações que descreve o comportamento de toda a estrutura. V)

Resolução do sistema: O sistema global de equações é resolvido numericamente para determinar as incógnitas, como deslocamentos, temperaturas, tensões, entre outras.

VI) Pós-processamento: Os resultados são analisados e interpretados para fornecer informações relevantes sobre o comportamento da estrutura, como deformações e tensões (SILVA, 2016), fluxo de calor (COELHO e VIEIRA, 2020), entre outros.

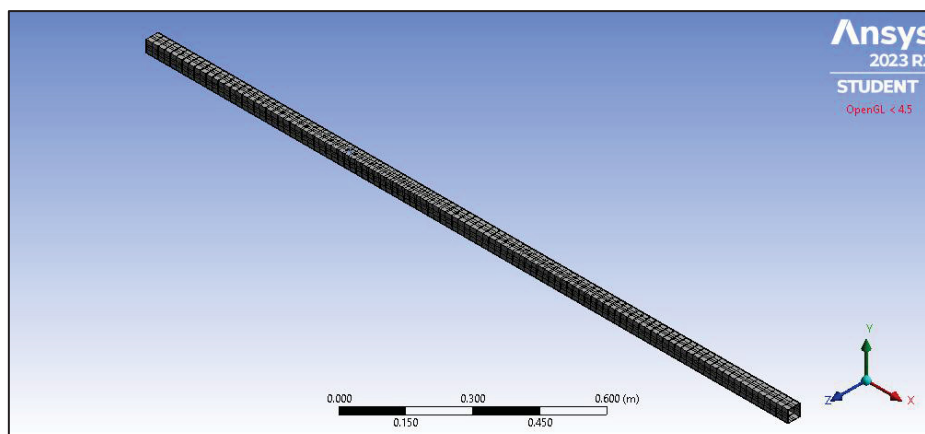
Apesar de envolver modelos matemáticos complexos, o desenvolvimento de diversos softwares, inclusive gratuitos, têm viabilizado a aplicação do MEF nas mais diversas áreas da engenharia. Para a modelagem da viga por elementos finitos utilizando-se o software ANSYS, são necessárias algumas etapas. Na primeira etapa, define-se o material a ser utilizado através do seu módulo de elasticidade, ou módulo de Young.

O módulo de Young, também conhecido como módulo de elasticidade, é uma propriedade fundamental dos materiais que descreve sua capacidade de deformar elasticamente quando submetidos a uma força e, em seguida, retornar à sua forma original quando a força é removida. Ele é frequentemente denotado pela letra "E" e é uma medida da rigidez do material (BEER, F.P. e JOHNSTON Jr., 1982). Em outras palavras quanto maior o valor do módulo de Young, mais rígido é o material. Neste caso, adotou-se $7,0 \cdot 10^{10}$ Pa, para o módulo de elasticidade do alumínio.

A etapa seguinte é o desenho, ou importação do desenho, da estrutura a ser simulada. Deste modo, adotou-se o desenho de maneira igual ao da barra de alumínio sobre a qual foram exercidos os esforços. Ou seja, 2,03 m de comprimento longitudinal, 38mm de lado, e com parede de 1mm.

Em seguida, parte-se para a discretização do modelo, com a escolha do tamanho de cada elemento. Neste estudo, os elementos foram escolhidos de modo que houvesse no mínimo três elementos no menor comprimento da barra metálica. Este valor propicia uma melhor abstração dos movimentos da barra. Salienta-se que, segundo um número muito baixo para o tamanho dos elementos resulta em consumo computacional desnecessário (ARROYO; LAHR; CHRISTOFORO, 2022). A Figura 2.2.6 apresenta o resultado do processo de discretização do modelo.

Figura 2.2.5 – Discretização do modelo da viga



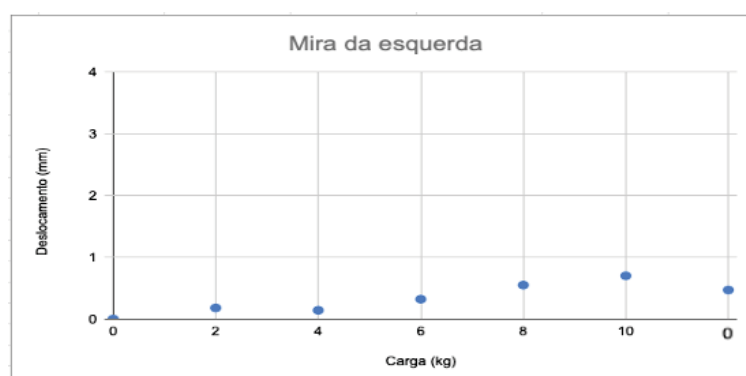
Fonte: Os Autores (2023).

A próxima etapa é a determinação dos apoios, bem como dos locais de cargas a serem aplicadas. Neste sentido, utilizou-se os apoios nas extremidades inferiores da barra, com suporte fixo. Já para os locais de cargas, estas foram dispostas de maneira central, com dois pontos de contato, semelhante ao realizado no experimento.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

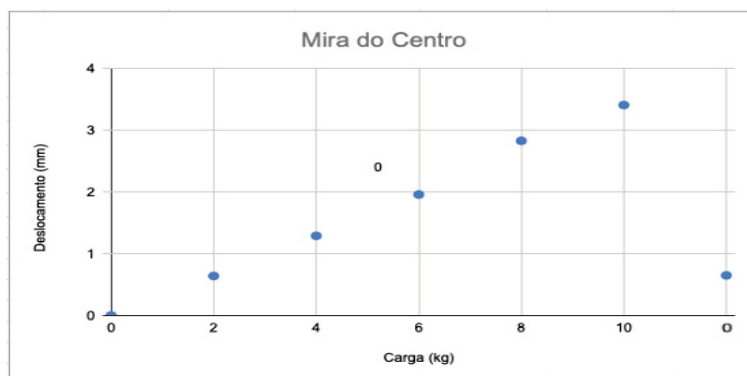
As figuras 2.3.1 a 2.3.3 apresentam os resultados obtidos das séries por nivelamento geométrico. No eixo horizontal, apresentam-se as cargas.

Figura 2.3.1 – Resultados encontrados do nivelamento geométrico para a mira V1



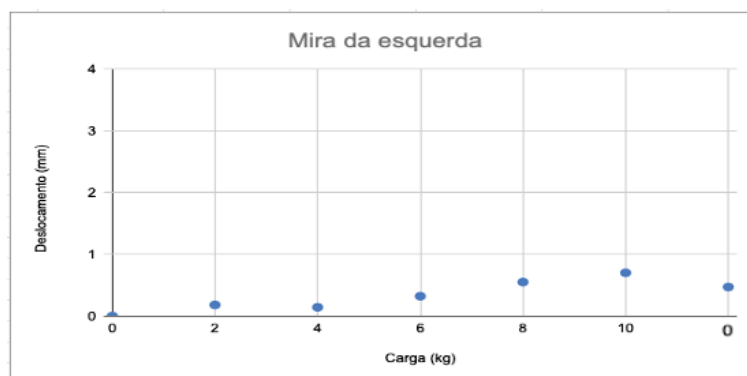
Fonte: Os Autores (2023).

Figura 2.3.2 – Resultados encontrados do nivelamento geométrico para a mira V2



Fonte: Os Autores (2023).

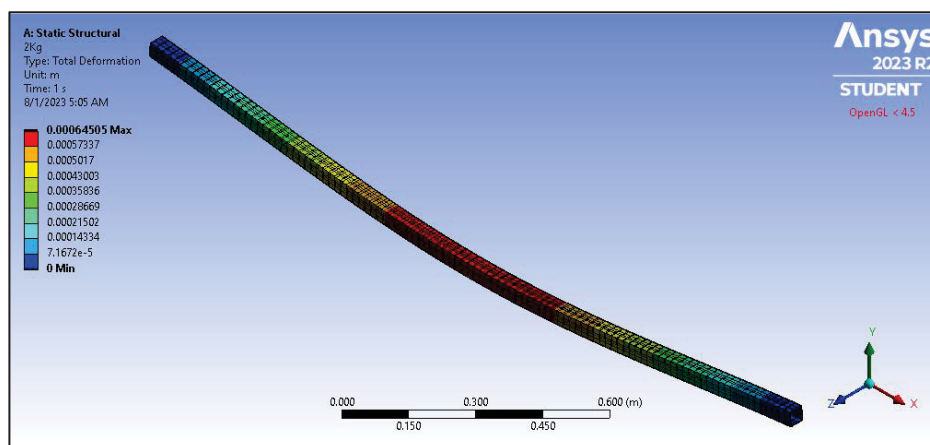
Figura 2.3.3 – Resultados encontrados do nivelamento geométrico para a mira V3



Fonte: Os Autores (2023).

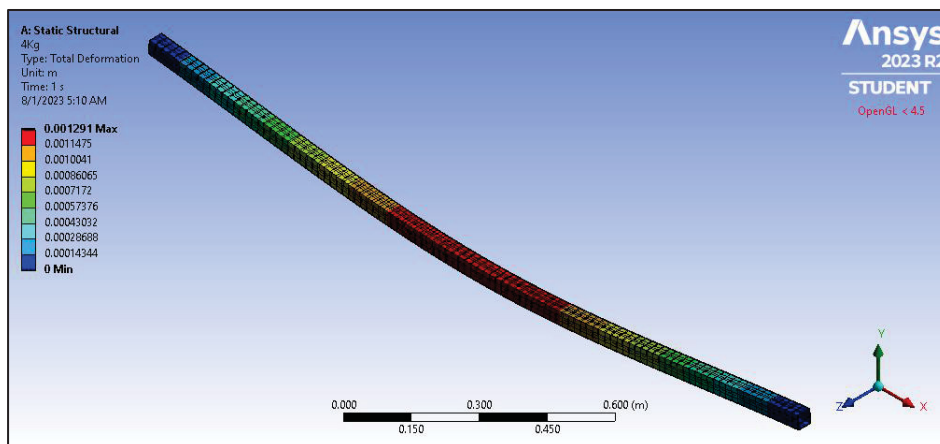
As figuras 2.3.4 a 2.3.8, apresentam os resultados obtidos da simulação por elementos finitos para as cargas de 2 kg, 4 kg, 6 kg, 8 kg e 10 kg.

Figura 2.3.4 – Resultado da modelagem da viga para a carga de 2 kg



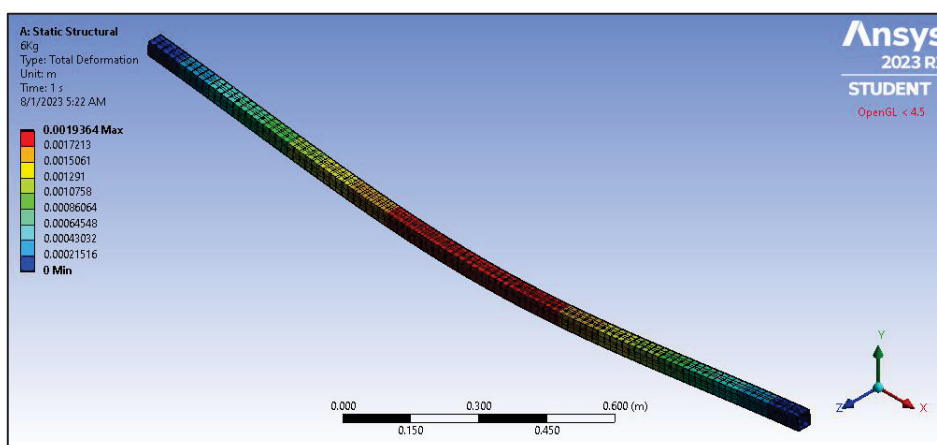
Fonte: Os Autores (2023).

Figura 2.3.5 – Resultado da modelagem da viga para a carga de 4 kg



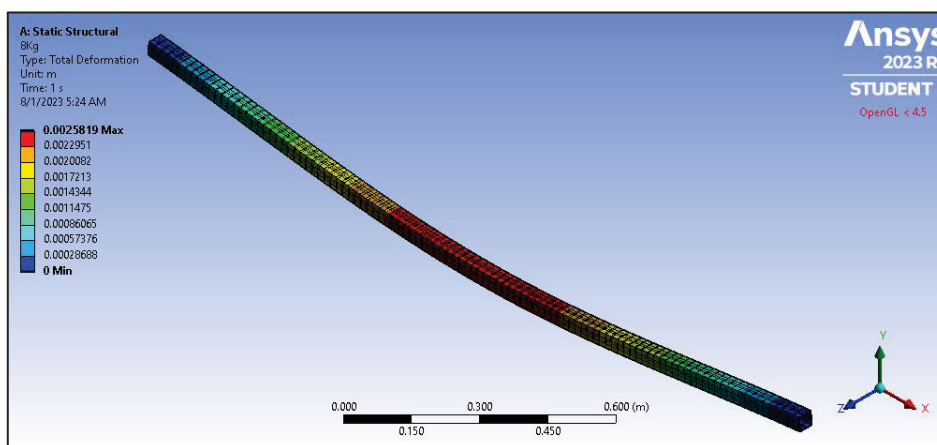
Fonte: Os Autores (2023).

Figura 2.3.6– Resultado da modelagem da viga para a carga de 6 kg



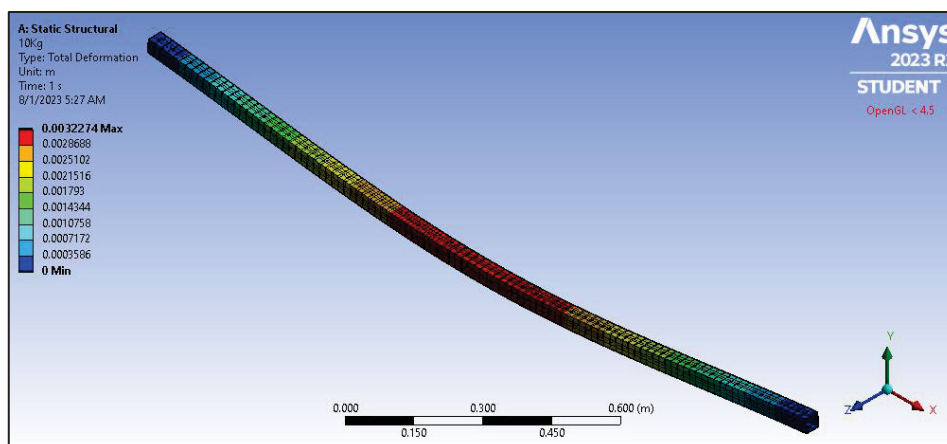
Fonte: Os Autores (2023).

Figura 2.3.7 – Resultado da modelagem da viga para a carga de 8 kg



Fonte: Os Autores (2023).

Figura 2.3.8 – Resultado da modelagem da viga para a carga de 10 kg



Fonte: Os Autores (2023).

Como esperado, observa-se que na área central da barra, em tons avermelhados, ocorrem os maiores deslocamentos a cada série. Deste modo, para fins de comparação, a tabela 2.3.1 apresenta os resultados de deslocamento máximo da simulação bem como os deslocamentos obtidos do nivelamento geométrico para a mira central.

Tabela 2.3.1 – Resultados de deslocamento máximo

Série	Carga	Deslocamentos (mm)		Diferença (mm)
		Nivelamento	Simulação MEF	
1	2 kg	0,64	0,57	0,07
2	4 kg	1,29	1,29	0,00
3	6 kg	1,96	1,93	0,02
4	8 kg	2,83	2,58	0,25
5	10 kg	3,41	3,22	0,18

Fonte: Os Autores (2023).

Como visto, se considerarmos a diferença entre os deslocamentos obtidos com nivelamento geométrico e da simulação pelo MEF, estas se encontram em alguns casos no centésimo do milímetro, ou seja, tais diferenças são menores que o milímetro.

Em todas as séries percebe-se que a tendência de deslocamento, tanto no nivelamento quanto na simulação apontam para valores muito próximos.

A semelhança dos resultados aponta que a forma como a metodologia foi aplicada possibilitou determinar valores de deslocamento próximos aos esperados, validando tanto a técnica quanto o modelo criado.

2.4 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o nivelamento geométrico é uma metodologia eficaz no monitoramento de deformações estruturais verticais, tendo em vista que os resultados encontrados são muito próximos dos esperados, calculados por simulação computacional.

Conclui-se ainda que, a união dos dois métodos supracitados é capaz de apresentar o comportamento do corpo monitorado de forma integral, e não somente pontual, o que possibilita uma avaliação mais abrangente do comportamento do corpo monitorado.

Por fim, conclui-se que a utilização do software aqui apresentado, desde que inseridos os parâmetros corretamente, corrobora para uma análise eficaz do comportamento de estruturas sob efeitos de carga.

REFERÊNCIAS

- ANDOLFATO, S. H. D. Sistema de Automação de Nível Digital. Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná, 2010.
- ARROYO, F. N.; LAHR, F. A. R.; CHRISTOFORO, A. L. INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA MALHA EM SIMULAÇÕES NUMÉRICAS VIA ELEMENTOS FINITOS. *Revista Internacional de Ciências*, v. 12, n. 2, p. 95–107, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13133: Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro, 1994.
- BEER, F.P. e JOHNSTON Jr., E.R. Resistência dos Materiais. Editora McGraw-Hill Ltda. 1982.
- BISHOP, J. E. A displacement-based finite element formulation for general polyhedra using harmonic shape functions: FINITE ELEMENT FORMULATION FOR GENERAL POLYHEDRA. *International journal for numerical methods in engineering*, v. 97, n. 1, p. 1–31, 2014.
- CERVERA, M. et al. Explicit mixed strain–displacement finite elements for compressible and quasi-incompressible elasticity and plasticity. *Computational mechanics*, v. 58, n. 3, p. 511–532, 2016.
- COELHO, N. DE A.; VIEIRA, D. DA S. Utilização do Método dos Elementos Finitos no Estudo Térmico de Elementos Simples de Concreto. *RCT - Revista de Ciência e Tecnologia*, v. 6, 2020.
- COELHO, N. DE A.; VIEIRA, D. DA S. Utilização do Método dos Elementos Finitos no Estudo Térmico de Elementos Simples de Concreto. *RCT - Revista de Ciência e Tecnologia*, v. 6, 2020.
- ARSENE, C. "REVIEWING THE VERTICAL OF A METALLIC CONSTRUCTION THROUGH GEOMETRIC LEVELLING." *Agricultura* 105.1-2 (2018): Agricultura, 2018, Vol.105 (1-2). Web.

DA SILVA FILHO, F. C. Modelagem de problemas de engenharia: solução de equações diferenciais pelo método dos elementos finitos. *Revista Tecnologia*, [S. l.], v. 26, n. 2, 2009. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/95>. Acesso em: 28 ago. 2023.

FOSSSEN, H. *Structural Geology*. Cambridge University Press, Cambridge, 2010. 463p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511777806>

FREGONESE, L. et al. Surveying and monitoring for vulnerability assessment of an ancient building. *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 13, n. 8, p. 9747–9773, 2013.

GONZÁLEZ, J. A.; LEE, Y.-S.; PARK, K. C. Stabilized mixed displacement–pressure finite element formulation for linear hydrodynamic problems with free surfaces. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, v. 319, p. 314–337, 2017.

GUMUS, K.; SELBESOGLU, M. O.; CELIK, C. T. Accuracy investigation of height obtained from Classical and Network RTK with ANOVA test. *Measurement: journal of the International Measurement Confederation*, v. 90, p. 135–143, 2016.

HIBBELER, R. C. *Resistência dos materiais*. 7. ed. São Paulo: Pearson Education: Prentice-Hall, 2010

HUGHES, Thomas JR; BAZILEVS, Yuri; COTTRELL, J Austin. *Isogeometric analysis: toward integration of CAD and FEA*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

JERKE, A.; FAGGION, P. L.; DA CRUZ, W. Fatores que influenciam no monitoramento geodésico de barragens utilizando estação total. *Revista de Geociências do Nordeste*, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 47–59, 2022. DOI: 10.21680/2447-3359.2022v8n1ID25857

MEDEIROS, L. I. B. de; FAGGION, P. L.; ALVES, S. de S. O. Análise do Desempenho de ETR no Monitoramento Dinâmico de Estrutura Metálica por Leitura Contínua de Direções. *Revista Brasileira de Cartografia*, [S. l.], v. 72, n. 2, p. 280–293, 2020. DOI: 10.14393/rbcv72n2-52637. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/52637>.

PACHECO, T. M., LIMA, J. M. F., LIMA, P. R. L. "Influência do modelo de fissuração na modelagem em elementos finitos de vigas de concreto armado", Science & Engineering Journal, v. 22, n. 2, pp. 57 – 63, Jul.–Dez. 2013.

PELISSER, F., B. V. SILVA, M. H. MENGER, B. J. FRASSON, T. A. KELLER, A. J. TORII, AND R. H. LOPEZ. "Structural Analysis of Composite Metakaolin-based Geopolymer Concrete." Revista IBRACON De Estruturas E Materiais 11.3 (2018): 535-43.

R. W. CLOUGH, Proc. 2nd ASCE Conf. on Electronic Computation, Pittsburgh, Pennsylvania (1960).

Salvini, Riccardo, Claudio Vanneschi, Chiara Lanciano, and Renzo Maseroli. "Ground Displacements Estimation through GNSS and Geometric Leveling: A Geological Interpretation of the 2016–2017 Seismic Sequence in Central Italy." Geosciences (Basel) 12.4 (2022): 167. Web.

SILVA, C. A. G. DA. Construção de um biomodelo com interposição de placa oclusal para análise de tensões nos discos articulares da ATM pelo método dos elementos finitos. 2016.

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. RBC. REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (ONLINE), v. 66, p. 45-57, 2014

WU, K.; YANG, F.; PU, Z; SHI, J. Effect of strain rate on detwinning and superelastic behavior of Ni-Ti shape memory alloys. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v.7, n.2, p.138-144, 1996

CAPÍTULO 3

ANÁLISE COMPARATIVA DA FLEXÃO DE BARRA METÁLICA SOB CARGAS, POR DIFERENTES MÉTODOS GEODÉSICOS: NIVELAMENTO GEOMÉTRICO, NIVELAMENTO TRIGONOMÉTRICO E FOTOGRAMETRIA A CURTAS DISTÂNCIAS

Resumo: A análise da flexão e da deformação de estruturas metálicas desempenha 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, nivelamento trigonométrico leap-frog e nivelamento 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.

3.1 INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, no contexto das Geociências, a medição de deflexões estruturais, recalques, deslocamentos e deformações de estruturas é realizada empregando-se métodos de auscultação geodésica, como nivelamento 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 nivelamento 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 nivelamento trigonométrico é um método indireto para a determinação de desníveis 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 centro do 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 operam 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 feixes 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

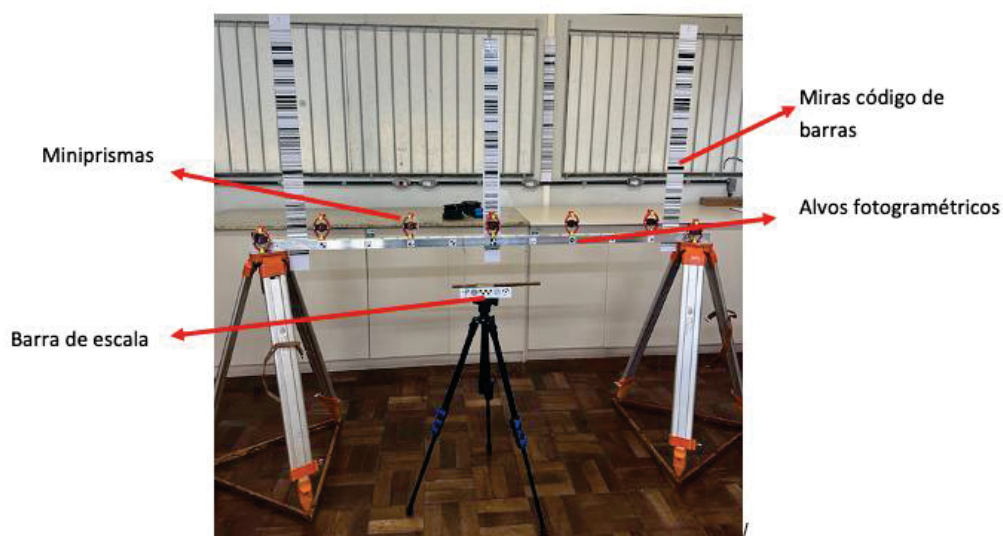
3.2 MATERIAL E MÉTODOS

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 3.2.1.

Figura 3.2.1 – Objeto de estudo e alvos utilizados nas mensurações.



Fonte: Os 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, 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 3.2.2 mostra os dois equipamentos estacionados sobre os tripés e direcionados para o perfil de alumínio.

Figura 3.2.2 – ETR TS15 e Nível DNA03 instalados sobre tripés industriais.



Fonte: Os 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 (DETCHEV; 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 3.2.3.

Figura 3.2.3 – Distribuição dos alvos fotogramétricos



Fonte: Os 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, com precisão de plotagem submilimétrica, 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 3.2.1. 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 3.2.4, é possível ainda observar o experimento com 8 kg de carga aplicada, ou seja, a Série 5.

Tabela 3.2.1 – 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: Autoria própria (2024).

Figura 3.2.4 – Demonstração da aplicação das cargas.



Fonte: Autoria própria (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 3.2.5. 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, minimizando erros sistemáticos e de colimação, e ainda 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 3.2.5 – 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).

$$\Delta h_{AB} = h_i - h_p + [D_i * \cos(Z)] \quad (3)$$

onde, Δh_{AB} é o desnível entre o ponto de estação e o ponto monitorado; h_i é altura do instrumento; h_p a altura do prisma; D_i 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 as os termos h_i e h_p da Equação 3, resultando na Equação 4.

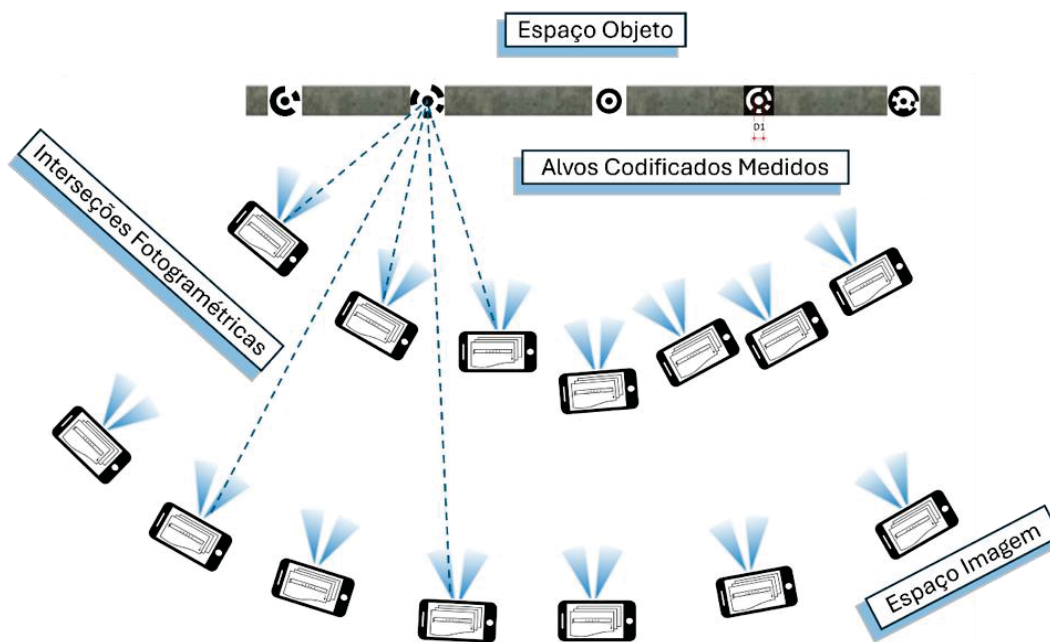
$$\Delta h_{AB_n} = [D_i * \cos(Z)]_{vante} - [D_i * \cos(Z)]_{re} \quad (4)$$

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 3.2.6).

Figura 3.2.6 – Figura Modelo de aquisição de múltiplas imagens a partir do SfM.



Fonte: Os 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).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3.3.1 apresenta as leituras do nivelamento geométrico 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 3.3.1 – Leituras do nivelamento geométrico.

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: Os 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.

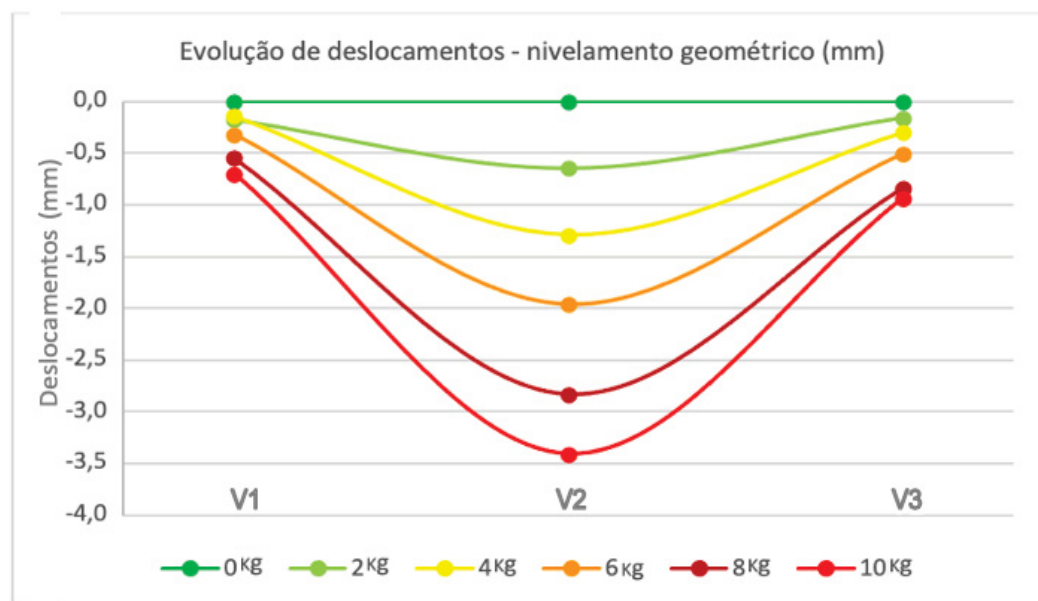
Tabela 3.3.2 – Diferenças de nível com relação à mira de referência em metros.

Carga (kg)	Leituras de mira (m)		
	V1 (m)	V2 (m)	V3 (m)
0	0,51070	0,50226	0,51504
2	0,51083	0,50282	0,51512
4	0,51091	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: Os autores (2024).

Na Figura 3.3.1, 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 3.3.1 – Evolução de deslocamentos – niv. geométrico



Fonte: Os autores (2024).

Os resultados do nivelamento 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 3,4 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 3.3.2 apresenta a nomenclatura aplicada a cada um dos miniprismas utilizados para o nivelamento trigonométrico com a ETR.

Figura 3.3.2 – Nomenclatura aplicada aos miniprismas



Fonte: Os autores (2024).

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

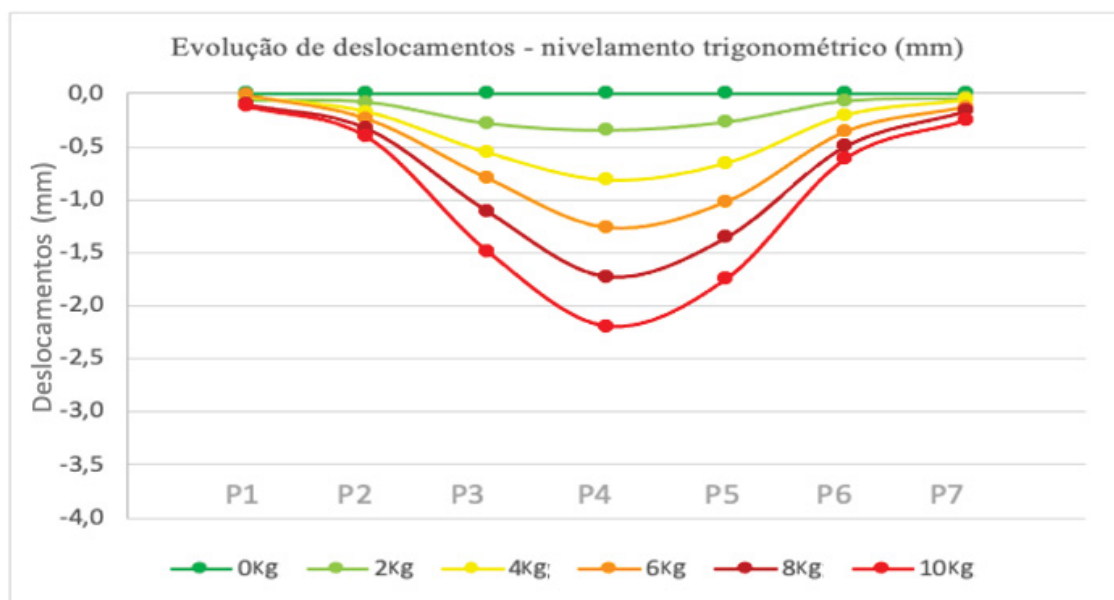
Tabela 3.3.3 – Coordenadas verticais (Z) dos prismas para cada série.

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: autoria própria (2024).

Na Figura 3.3.3, têm-se a comparação da variação vertical dos prismas para o conjunto de séries.

Figura 3.3.3 – Evolução de deslocamentos – nivelamento trigonométrico.

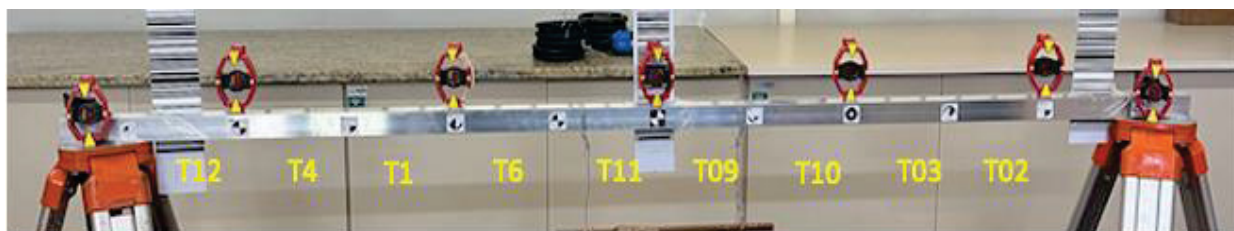


Fonte: Os autores (2024).

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

A Figura 3.3.4 apresenta a disposição dos alvos utilizados para o processo fotogramétrico.

Figura 3.3.4 – Disposição dos alvos utilizados para o processo fotogramétrico.



Fonte: Os Autores (2024).

A tabela 3.3.4 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; ALRUZOUQ 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 3.3.4 - Coordenadas verticais dos alvos fotogramétricos (m)

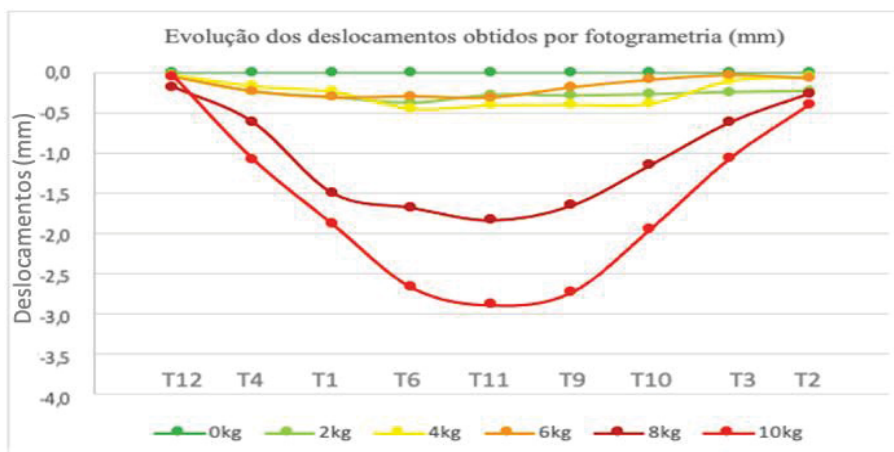
Cargas (kg)	T12	T4	T1	T6	T11	T9	T10	T3	T2
0	0,1491	0,1491	0,1491	0,1491	0,1492	0,1491	0,1491	0,1491	0,1491
2	0,1492	0,1488	0,1488	0,1487	0,1489	0,1488	0,1488	0,1489	0,1489
4	0,1491	0,1489	0,1489	0,1487	0,1488	0,1487	0,1487	0,1490	0,1491
6	0,1490	0,1488	0,1488	0,1488	0,1489	0,1489	0,1490	0,1491	0,1490
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: autoria própria (2024).

A Figura 3.3.5 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 3.3.5 – Evolução de deslocamentos – nivelamento por fotogrametria

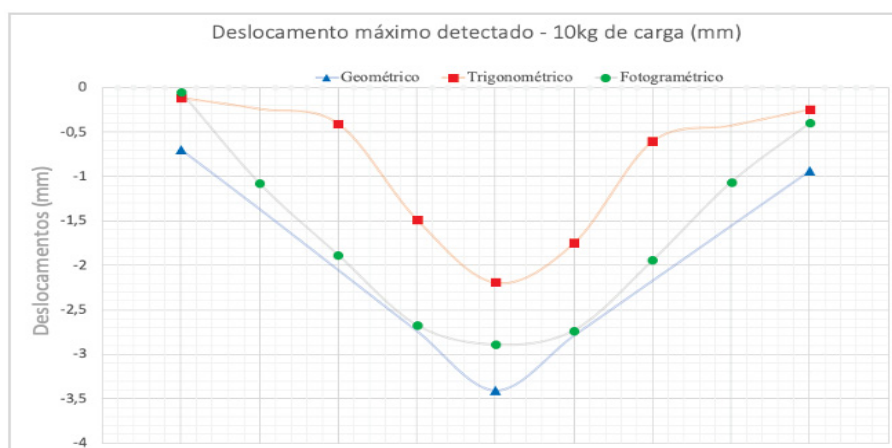


Fonte: Os autores (2024).

Da Figura 3.3.5, 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 3.3.6, tem-se a sobreposição dos gráficos oriundos dos três métodos, para a carga de 10 kg.

Figura 3.3.6 – Sobreposição dos gráficos para a carga de 10 kg.



Fonte: Os autores (2024).

Da Figura 3.3.6, 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 nivelamento geométrico, e a menor, de 2,5mm, para o nivelamento trigonométrico. O uso da fotogrametria para esta finalidade apresentou resultado mediano com relação aos demais (2,9 mm).

3.4 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 nivelamento 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 nivelamento 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 o a câmera do smartphone a resultados obtidos com equipamentos fotogramétricos mais robustos, como sugerido por Datchev, 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.

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 nivelamento 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 beam 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 nivelamento 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 Maua 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.

Muguio, 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.; Hilleshein, 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: algorithms and applications*. 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.

CAPÍTULO 4

Monitoramento Geodésico de Viga de Concreto Armado Sob Esforços de Flexão: Topografia 3D, Fotogrametria Terrestre, Nivelamento Geométrico e Varredura Scanner

4.1 INTRODUÇÃO

O monitoramento de estruturas de concreto armado é uma atividade desempenhada em muitas áreas da engenharia civil, onde garantir a estabilidade e a integridade dessas estruturas pode prevenir desastres e melhorar a eficiência dos projetos. Em especial, vigas de concreto armado estão sujeitas a uma variedade de esforços ao longo de sua vida útil, incluindo cargas estáticas e dinâmicas, que podem levar ao desenvolvimento de deformações. A compreensão dessas deformações, particularmente sob flexão, é necessária para a avaliação de desempenho estrutural, diagnóstico de possíveis falhas e manutenção preventiva (COSTA e QUARCIONI, 2024; ASSIS, 2007).

Historicamente, os métodos de monitoramento utilizados incluem técnicas de contato direto, como extensômetros e relógios comparadores, que medem as deformações em pontos localizados da estrutura. Embora precisos, esses métodos possuem limitações. A necessidade de contato direto com a estrutura pode interferir nos ensaios, e a cobertura espacial é restrita a poucos pontos de medição. Além disso, essas técnicas podem ser sensíveis a fatores ambientais, como deslises devido à rugosidade da estrutura (CRUZ, JUNGES e PELLANDA, 2021; FRANÇOSO, 2019).

Nos últimos anos, avanços tecnológicos têm permitido a utilização de novos métodos de monitoramento. Entre esses, destacam-se os métodos geodésicos e fotogramétricos, que oferecem a possibilidade de realizar medições sem a necessidade de contato direto com a estrutura monitorada. O nivelamento geométrico e trigonométrico, a varredura a laser scanner e a fotogrametria terrestre são capazes de capturar a geometria completa de uma estrutura e monitorar suas deformações com alta precisão, proporcionando uma visão detalhada das variações ao longo do tempo e do espaço. Esses equipamentos e métodos, que podem ainda ser combinados, oferecem uma abordagem robusta para o estudo de deformações estruturais (FRANÇOSO, 2019).

A estação total robotizada, amplamente utilizada em levantamentos topográficos, oferece precisão milimétrica em medições de distâncias, e de segundos para ângulos, o que permite o monitoramento de pontos específicos da viga, inclusive em tempo real. A fotogrametria terrestre, com o uso de câmeras de alta resolução, presentes inclusive em *smartphones*, e software específicos, transforma uma sequência de imagens 2D em modelos tridimensionais que permitem uma análise visual e métrica das deformações. O laser scanner, por sua vez, determina as coordenadas de milhões de pontos sobre a superfície da estrutura, gerando nuvens de pontos de alta densidade, possibilitando a identificação de deformações distribuídas ao longo de toda a viga. O nível digital contribui com medições precisas dos desníveis ao longo do ensaio, fornecendo informações sobre as deflexões verticais (FRANÇOZO, 2019; JERKE; FAGGION e DA CRUZ, 2022).

Diante do exposto, este estudo visa explorar a combinação dessas quatro metodologias para o monitoramento de uma viga de concreto armado submetida a flexão em um ensaio com prensa hidráulica. O objetivo principal é avaliar a eficiência dos métodos geodésicos no acompanhamento das deformações. Além de comparar os resultados obtidos por cada método, este trabalho busca contribuir para a discussão sobre a viabilidade de sua integração em monitoramentos estruturais, oferecendo uma alternativa precisa aos métodos convencionais.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

A viga utilizada foi produzida no laboratório de estruturas do LACTEC, que é o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, localizado no Campus Politécnico da UFPR. Esta possui 200 cm de comprimento, com uma seção transversal retangular de 10 cm de largura por 20 cm de altura. A armadura longitudinal foi projetada com duas barras de aço CA50 de 10 mm de diâmetro, posicionadas próximas à face inferior da viga, para resistir aos esforços de tração, e duas barras de aço CA50 de 5 mm de diâmetro, posicionadas próximas à face superior, para garantir a estabilidade e resistência aos esforços de compressão.

Para a armadura transversal, foram utilizados estribos de aço CA50 de 5 mm de diâmetro, dispostos a cada 15 cm ao longo do comprimento da viga, com a finalidade de controlar o cisalhamento e manter a integridade estrutural sob carregamento. O concreto foi dosado seguindo o traço volumétrico de 1:1,5:2,5

(cimento, areia e brita, respectivamente), conforme as recomendações da norma ABNT NBR 12655:2015. A mistura foi composta por areia natural de granulometria média, brita número 1 como agregado graúdo, e cimento Portland tipo CII. O fator água-cimento adotado foi de 0,53, garantindo uma relação adequada entre trabalhabilidade e resistência. A Figura 4.2.1 apresenta o processo de montagem da caixaria e ferragem da viga de concreto armado.

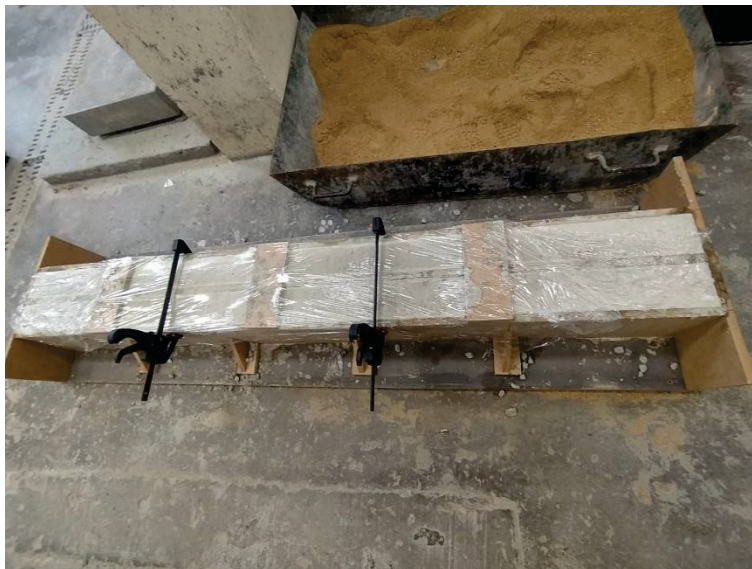
Figura 4.2.1 – Processo de montagem da caixaria e ferragem da viga



Fonte: Os autores (2024).

Com essas características, o concreto atingiu aproximadamente de 25 MPa de f_{ck} (resistência característica à compressão do concreto) após o período de cura de 28 dias. O f_{ck} influencia diretamente a capacidade do concreto de suportar cargas de compressão, a durabilidade e a segurança estrutural. Ele também impacta o controle de deformações, como retração e fluência, e influencia o custo, uma vez que concretos com f_{ck} mais altos requerem materiais e processos de maior qualidade (ABNT NBR 6118). A Figura 4.2.2 apresenta as vigas utilizadas durante o seu processo de cura. Salienta-se que a viga esteve armazenada em câmara úmida até o dia do experimento.

FIGURA 4.2.2 – Viga em processo de cura.



Fonte: Os autores (2024).

A Figura 4.2.3 apresenta o sistema de prensa e apoios utilizada no experimento.

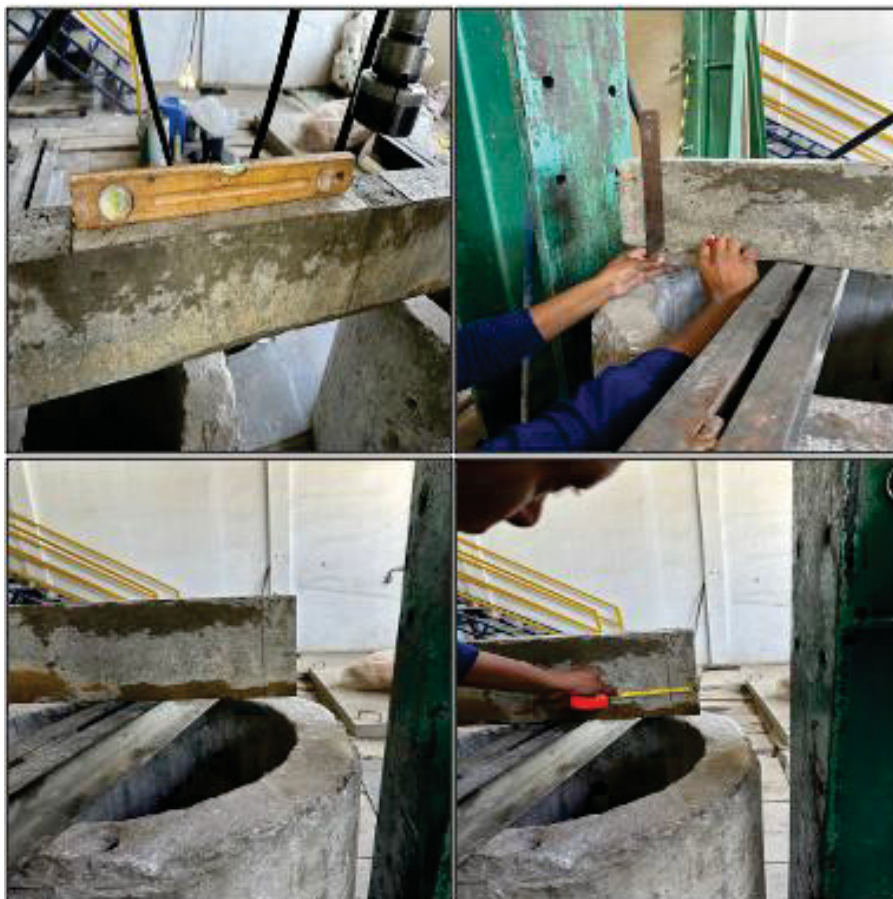
Figura 4.2.3 – Prensa hidráulica e apoios



Fonte: Os autores (2024)

Adotou-se um distanciamento de 5 cm de cada borda para o posicionamento dos apoios, ainda, utilizou-se um nível de bolha tubular para o nivelamento da viga para o experimento, como visto na Figura 4.2.4.

Figura 4.2.4 – Ajuste da viga no sistema da prensa hidráulica



Fonte: Os autores (2024)

A aplicação de carga foi realizada por meio de uma prensa hidráulica de 20 toneladas de capacidade, capaz de aplicar cargas progressivas e controladas, no ponto central da viga. A Figura 4.2.5 apresenta a central de controle da prensa.

Figura 4.2.5 – Central de Controle da prensa hidráulica



Fonte: Os autores (2024)

O monitoramento foi realizado para cada incremento de carga. Ou seja, aumentava-se a carga, estabilizava-se o sistema, e então fazia-se o monitoramento com todos os métodos. As cargas foram aplicadas de maneira gradual, de 300 kg em 300 kg. Com exceção da última carga, a qual saltou de 3.000 kg para 3.600 kg. Neste momento houve o rompimento da viga.

Para as medições das flexões, utilizou-se como equipamento não geodésico um relógio comparador de deslocamento, da marca Huggenberger Zurick, que apresenta em seu display resolução de 0,05 mm. O relógio foi posicionado com um deslocamento de 18 cm à direita do ponto central da viga. O deslocamento foi necessário para que o pistão de carga não tocasse o relógio durante a aplicação das cargas. A Figura 4.2.6, apresenta tal aparato.

Figura 4.2.6 – Relógio comparador de flexão



Fonte: Os autores (2024).

Para o nivelamento geométrico, foram utilizadas quatro miras, confeccionadas com miras de código de barras para leitura por nível digital (ANDOLFATO; FAGGION, 2011). Uma das miras foi posicionada na estrutura metálica da prensa, como mira de referência (MR), imóvel durante todo o experimento, garantindo assim a mesma referência para todo o ensaio, enquanto as outras três foram fixadas à estrutura monitorada. Da esquerda para a direita, conforme indicado na figura 4.2.7, as miras foram denominadas Mira M1, Mira M2 e Mira M3.

Figura 4.2.7 – Posicionamento das miras de leitura de código de barras



Fonte: Os autores (2024).

Para as medições, utilizou-se um nível digital geodésico modelo Leica DNA03, com precisão de $\pm 0,3$ mm/km para 1 km de nivelamento duplo (KUCHMISTER et al., 2020; GEMIN; MATOS; FAGGION, 2016). O nível foi montado sobre um tripé industrial (figura 4.2.8), equipado com um sistema de amortecimento de vibrações, e a altura do instrumento foi mantida constante, conforme recomendado nos experimentos de Gemin, Matos e Faggion (2016). A mudança de altura de nível foi necessária apenas uma vez, na última leitura central da mira, após o rompimento. O procedimento de mudança de altura foi necessário pois a nova altura da viga se tornou inferior ao campo de leitura do equipamento.

A distância entre o equipamento e as miras foi de: 3,71 m para a mira MR; 3,83 m para a mira M1; 3,96 m para a mira M2; e 4,18 m para a mira M3. Tais distâncias atendem ao requisito do método do nivelamento geométrico por visadas igual (ABNT, 2021).

Figura 4.2.8 – Nível geodésico DNA03 sobre tripé industrial em local estável.



Fonte: Os autores (2024).

O modelo matemático do nivelamento geométrico foi adotado de acordo com a NBR 13133 (ABNT, 2021). O procedimento consistiu em realizar leituras da mira de ré, seguidas pelas leituras das miras de vante para cada série de medições, correspondendo a cada incremento de carga. A diferença de nível foi calculada subtraindo-se a leitura da mira de ré das leituras das miras de vante. Considerou-se a primeira diferença de nível, obtida com carga zero, como a referência inicial. Assim, as variações nas diferenças de nível em cada incremento de carga foram interpretadas como o deslocamento vertical da estrutura.

Para o nivelamento trigonométrico, foram utilizados seis miniprismas posicionados em cada ponto monitorado. Os miniprismas foram colados na parte superior da estrutura, espaçados ao longo da viga de concreto. As medições foram realizadas utilizando uma Estação Total Robotizada (ETR) modelo Leica TS15, com precisão angular de $\pm 1''$ e precisão linear de $\pm(1 \text{ mm} + 1,5 \text{ ppm})$, além de uma precisão de $0,97''$ para o sistema de Reconhecimento Automático de Alvos. Foram utilizados 4 prismas circulares como referência, posicionados em locais estáveis, fora da estrutura monitorada. (ATR) (JERKE; FAGGION, 2020; MEDEIROS; FAGGION; ALVES, 2020; EHRHART; LIENHART, 2015). A ETR foi montada sobre um tripé industrial,

posicionado sobre uma área de concreto estável, para garantir a estabilidade durante as medições, como mostra a figura 4.2.9.

Figura 4.2.9 – Estação total robotizada ETR TS15 sobre tripé industrial.



Fonte: Os autores (2024).

As leituras foram realizadas de maneira automatizadas, utilizando uma programação nativa do equipamento. Inicialmente, realizou-se e medição da posição de todos os prismas, apenas na posição direta da luneta do equipamento. Em seguida, essas observações são armazenadas na memória do equipamento, que as utiliza como uma posição aproximada para a busca automatizada dos alvos (Automatic Target Recognition - ATR). Foram realizadas três séries de leituras conjugadas. Após armazenadas, o equipamento realiza as demais séries de maneira automatizada, na posição direta e inversa da luneta. Um estudo mais aprofundado sobre este procedimento pode ser visto em Medeiros, Faggion e Alves (2020).

As flexões da barra foram determinadas a partir das variações posicionais dos prismas de vante em relação ao prisma de ré, para cada incremento de carga (MARKOVIĆ et al., 2019; ZONTA; NADAL; PRATA, 2014). A posição da barra sem carga foi adotada como a referência inicial. O cálculo das diferenças de nível para

cada série foi realizado utilizando o modelo simplificado de nivelamento trigonométrico, adequado para distâncias curtas.

Para a fotogrametria a curtas distâncias, utilizou-se um smartphone iPhone 14, com as seguintes especificações de câmera: sensor principal de 48 MP, resolução de até 8064 por 6048 pixels, e tamanho do sensor de 9,8 mm.

No método fotogramétrico, as imagens foram processadas utilizando o *software Agisoft Metashape*. Para cada incremento de carga, foram capturadas aproximadamente 20 fotografias, garantindo um recobrimento mínimo de 70% entre imagens consecutivas do corpo de prova.

Para garantir a repetibilidade no posicionamento das imagens, uma barra auxiliar de alumínio, graduada a cada 20 cm, com uso de uma régua de alumínio, calibrada utilizando interferômetro laser com precisão submilimétrica), foi utilizada para posicionar o celular sempre nas mesmas posições ao longo do experimento, paralelamente à viga monitorada. As imagens foram capturadas e processadas para cada série, mantendo consistência no ângulo e na distância. A figura 4.2.10 mostra a barra graduada destacada pelo retângulo vermelho.

Figura 4.2.10 – Barra graduada para tomada de imagens fotogramétricas



Fonte: Os autores (2024).

A partir de cada conjunto de imagens, foi gerado um modelo tridimensional da viga monitorada. O software Agisoft Metashape detectou automaticamente as nove feições-alvo (*target*), as quais foram utilizadas para o monitoramento do comportamento estrutural. A variação do comportamento da estrutura foi verificada pela análise da variação posicional dos alvos. Tais alvos tiveram suas coordenadas

determinadas pela posição da primeira leitura, com carga zero. A figura 4.2.11 apresenta os alvos detectados automaticamente no *software* após o processamento para a carga 0 kg figura 4.2.11.a e para a carga 3.600 kg figura 4.2.11.b.

Figura 4.2.11 – Alvos detectados automaticamente pós-processamento



Fonte: Os autores (2024).

Neste estudo, optou-se por utilizar apenas os pontos reconhecidos automaticamente, e não todos os pontos da nuvem de pontos, como o procedimento realizado para os dados coletados com o laser scanner terrestre. A escolha do procedimento se deu pela diversidade nas opções de processamento dos dados. Para o modelo fotogramétrico, optou-se pelo mais prático e rápido.

O desafio principal do método fotogramétrico é o correto registro das nuvens de pontos. Este registro é o que torna as nuvens comparáveis entre si. É neste momento que os eixos vertical e horizontal das nuvens são organizados para que sejam os mesmos para todos os conjuntos de pontos.

Para a varredura a laser, utilizou-se o modelo de laser scanner terrestre BLK360 (figura 4.2.12), da Leica Geosystems, equipado com um laser de Classe 1 e comprimento de onda de 830 nm, associado a um prisma rotativo vertical e uma base

rotativa horizontal. O equipamento também conta com três câmeras HDR de 150 megapixels e uma câmera termográfica. Durante as varreduras, o scanner é capaz de capturar até 360 mil pontos por segundo, com um alcance que varia de 60 cm até 60 metros (LEICA GEOSYSTEMS, 2018).

Figura 4.2.12 – Laser scanner BLK360 utilizado



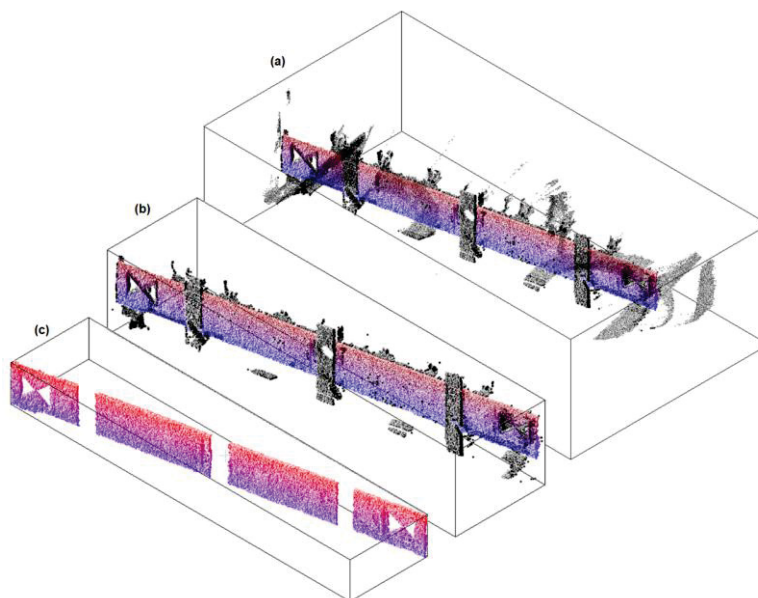
Fonte: Os autores (2024).

O equipamento foi posicionado à frente da barra utilizada como suporte ao levantamento fotogramétrico. Ficando cerca de 2,0 m da estrutura monitorada. A extração da nuvem de pontos foi realizada com uso do software Leica Cyclone Register. De posse da nuvem de pontos, procedeu-se então ao processamento.

A primeira etapa do processamento das nuvens de pontos consistiu em três segmentações manuais para obter a Região de Interesse (Region-of-Interest – Roi), onde se isolou a face da viga de concreto em si. As segmentações foram executadas no software CloudCompare. As nuvens resultantes da segmentação estão visíveis na Figura 4.12.13, em (a), (b) e (c). Em (a) tem-se o primeiro recorte em relação à nuvem inteira, em (b) está o segundo recorte, os pontos descartados estão em preto; por fim, em (c) está a Roi que servirá de molde para segmentar as outras nuvens. A nuvem

em (c) está colorida com um gradiente azul-vermelho na direção Z, assim como em (a) e (b).

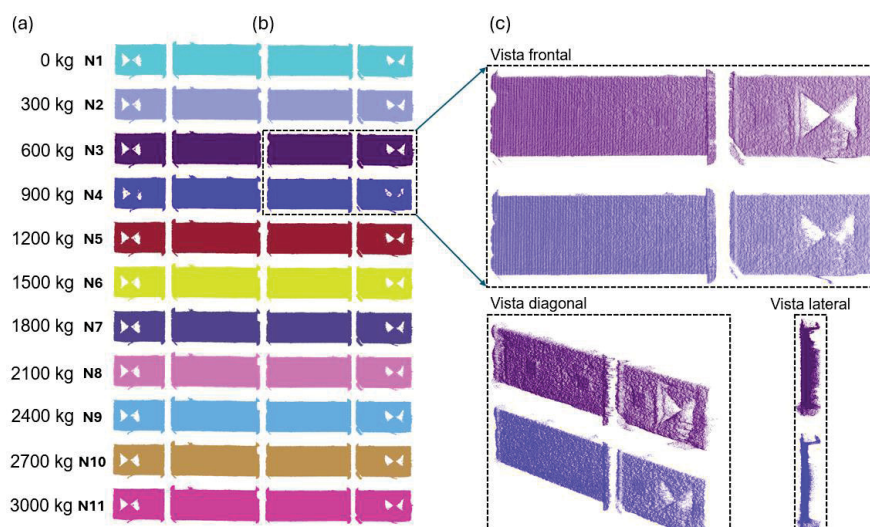
Figura 4.2.13 – Nuvens de pontos resultantes da segmentação



Fonte: Os autores (2024).

A nuvem de pontos mostrada na Figura 3.2.13 (c) é a que interessa neste trabalho. Como as nuvens foram registradas anteriormente no software Cyclone Register (Leica Geosystems®), todas elas estão sobrepostas, portanto, basta que se defina um raio maior que o máximo deslocamento esperado entre as nuvens. Sabe-se, previamente, que o maior deslocamento da viga é de aproximadamente 2,4 cm, (advindo do nivelamento geométrico). Logo, adotou-se um raio de 2,5 cm para a segmentação em lote das nuvens. Tomou-se o cuidado de tomar a nuvem 6 como modelo de referência, pois ela está na mediana das cargas do experimento. A Figura 4.12.14 mostra, em (a), a nomenclatura e carga adotada para as nuvens; em (b), o resultado da segmentação de todas as nuvens dispostas com um espaçamento de 30 cm verticalmente entre si; e, em (c), os detalhes de duas vigas segmentadas em vista frontal, diagonal e lateral.

Figura 4.2.14 – Nomenclatura e cargas adotadas para as nuvens de pontos



Fonte: Os autores (2024).

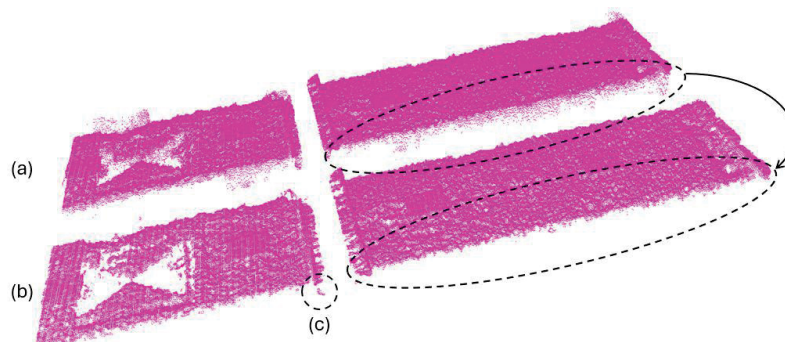
A Figura 4.2.14 (c) mostra que as nuvens recortadas automaticamente trazem consigo feições que haviam sido removidas no modelo. Esse ruído constitui a régua que obstruía a viga em 3 posições, conforme pode ser visto na Figura 4.2.13 (b), e parte dos pontos das bordas, que são gravados atrás da nuvem, como mostra a vista lateral em (c), esses pontos também precisam ser descartados.

O passo seguinte foi a análise e uniformização da densidade da nuvem de pontos. Neste caso, devido ao posicionamento do LST de frente para o centro da viga, é importante corrigir qualquer variação de densidade para que as análises futuras não sejam enviesadas, portanto, fez-se uma amostragem por voxelização utilizando-se um valor de voxel (abreviação em inglês de volume-pixel) igual à mediana da distância entre os pontos da nuvem. Isso garante que utilizaremos a densidade mediana da nuvem para sua amostragem, ou seja, mantêm-se o máximo da densidade original, e, portanto, o máximo de pontos que uma densidade uniforme pode disponibilizar.

Percebe-se que a média, moda e mediana têm valores bem próximos até à quarta decimal. Esses valores sugerem adotar 1 mm como valor para o voxel de amostragem de forma a preservar o máximo dos pontos.

O passo seguinte foi a remoção do ruído próximo às bordas (Figura 4.2.15), a fim de identificar de maneira mais concisa as bordas da viga. Fez-se uma filtragem dos pontos com base no filtro Statistical Outlier Removal (SOR) de Rusu et al. (2008). A nuvem apresentada é a N11 antes (a) e depois (b) do pré-processamento.

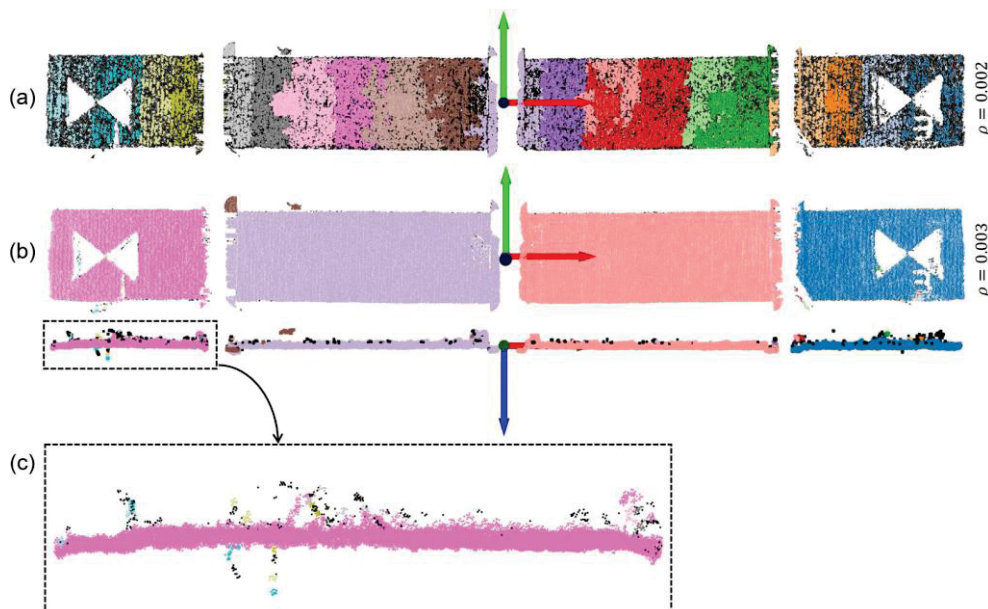
Figura 4.2.15 - Nuvem N11 antes (a) e depois (b) do pré-processamento



Fonte: Os autores (2024).

Se observa, na Figura 4.2.16, que a nuvem está mais limpa, contudo, alguns ruídos permanecem como conjuntos de pontos, como destacado em (c). Para excluir conjuntos de pontos automaticamente, aplicou-se o algoritmo DB-SCAN (Density Based Scan) de Ester et al. (1996). Esse algoritmo permite classificar a nuvem de pontos de acordo com a densidade, separando-a em conjuntos significativos e ruído, para isso, definem-se dois parâmetros, um de densidade ρ e outro k que define a quantidade de vizinhos mínimos para um conjunto. Adotou-se $\rho=0.003$ e $k = 10$.

Figura 4.2.16 – Aplicação do DB-SCAN na nuvem N11



Fonte: Os autores (2024).

A figura 3.2.17 mostra que adotar $\rho=0.003$ é o ideal para este experimento. Em (c) se percebe que o algoritmo preserva a borda da nuvem de pontos e segmenta apenas as regiões que se separam por diferenças de densidades.

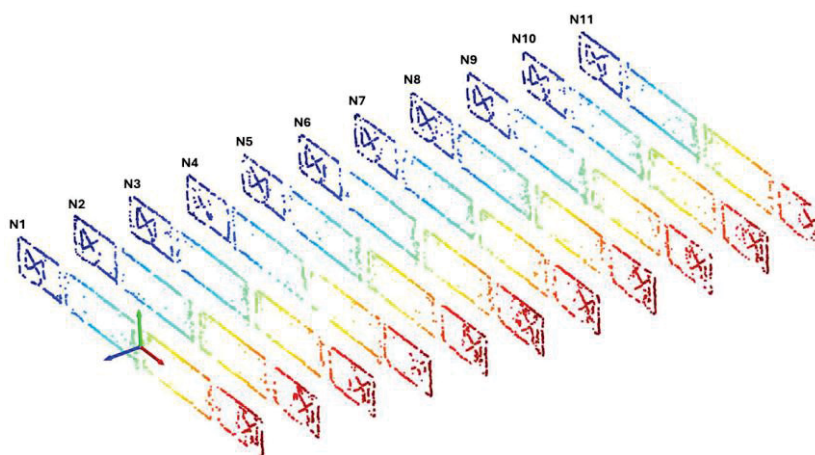
Antes de estimar o plano por RANSAC, a nuvem foi centralizada e orientada nas direções principais pela técnica PCA (Principal Component Analysis). O algoritmo RANSAC é um modelo robusto de estimação que, ao contrário do MMQ, faz a estimação utilizando o mínimo de dados possíveis. Em um plano, isto significa utilizar apenas $n=3$ pontos aleatórios da nuvem. A estimação é então repetida k vezes até que se encontre um modelo consenso entre os modelos estimados aleatoriamente.

Para estimar a quantidade de iterações ideais do RANSAC são necessários dois parâmetros: (1), se definir uma confiabilidade c esperada e (2), encontrar a razão $\omega = \text{inliers}/\text{pontos}$ do conjunto de dados. Caso se deseje que o modelo tenha 99,99 % de chance de ser estimado com dados livres de outliers, adota-se $c=0,9999$. Para estimar a razão ω , basta observar a Figura 3.2.18 (b) e (c). Na Figura 3.2.18, percebe-se que um plano de espessura $e = 0.016 \text{ m}$ (8 mm de espessura para cada lado do plano), compreende facilmente mais de 90 % dos pontos, portanto adotamos $\omega=90 \%$.

Após o processo de segmentação do plano, fez-se a segmentação das bordas da nuvem por meio de um filtro, utilizando o Radius Outlier Removal (ROR).

A figura 3.2.21 apresenta a limpeza das bordas pelo índice de linearidade. Retornam-se pontos com $\text{linearidade} > 90 \%$ utilizando-se uma vizinhança de $k = 25$ pontos. Assim como nos passos anteriores, estes valores foram definidos empiricamente observando-se os resultados de vários testes.

Figura 4.2.17 – Limpeza das bordas das nuvens pelo índice de linearidade

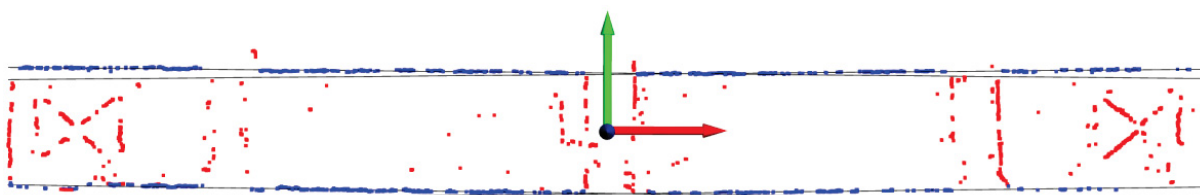


Fonte: Os autores (2024).

De posse das bordas das nuvens apresentadas na figura 3.2.21, faz-se a projeção destas no plano XY. Em seguida, as nuvens são subdivididas em quatro por meio de seus respectivos quadrantes. Em cada uma destas nuvens faz-se a estimação de uma reta que melhor se ajuste aos pontos. Novamente, adotamos o estimador robusto RANSAC, pois as nuvens de cada quadrante ainda possuem muitos outliers.

Na figura 4.2.18 apresenta-se o ajuste das quatro retas em cada um dos quadrantes para a nuvem N11. Adota-se um limiar de 5 mm para a reta ajustada por RANSAC, esse limiar separa os inliers (pontos em azul) dos outliers (pontos em vermelho).

Figura 4.2.18 – Ajuste das quatro retas para a nuvem N11



Fonte: Os autores (2024).

Observa-se na figura 3.2.22 que as retas ajustadas nas bordas da nuvem N11 apresentam o comportamento esperado. As retas estimadas estão desenhadas no intervalo $[-1,1]$, logo, se intersectam aproximadamente no meio da viga.

Dada a simetria da viga deformada, a reta estimada no 1º quadrante deve possuir coeficiente linear e angular positivos; a reta do 2º quadrante deve possuir coeficiente angular positivo e linear negativo; retas no 3º quadrante devem possuir ambos os coeficientes negativos, por fim, a reta que for estimada no 4º quadrante deve possuir coeficiente angular negativo e coeficiente linear positivo.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados os resultados para os deslocamentos acumulados para cada uma das metodologias utilizadas.

A tabela 4.3.1 apresenta os resultados encontrados para o monitoramento com uso do relógio comparador de deslocamentos.

Tabela 4.3.1 – Resultados encontrados com uso do relógio comparador

Série	Carga	Posição (mm)	Deslocamento acumulado (mm)	Evento
1	0 kg	40,10	0,00	Início
2	300 kg	38,20	-1,90	
3	600 kg	37,40	-2,70	
4	900 kg	36,40	-3,70	
5	1200 kg	35,30	-4,80	
6	1500 kg	34,15	-5,95	
7	1800 kg	33,00	-7,10	
8	2100 kg	30,00	-10,10	
9	2400 kg	30,75	-9,35	
10	2700 kg	29,80	-10,30	
11	3000 kg	27,85	-12,25	
12	3600 kg	16,05	-24,05	Rompimento

Fonte: Os autores (2024).

A tabela 4.3.2 apresenta os resultados para o nivelamento geométrico.

Tabela 4.3.2 – Resultados para o nivelamento geométrico

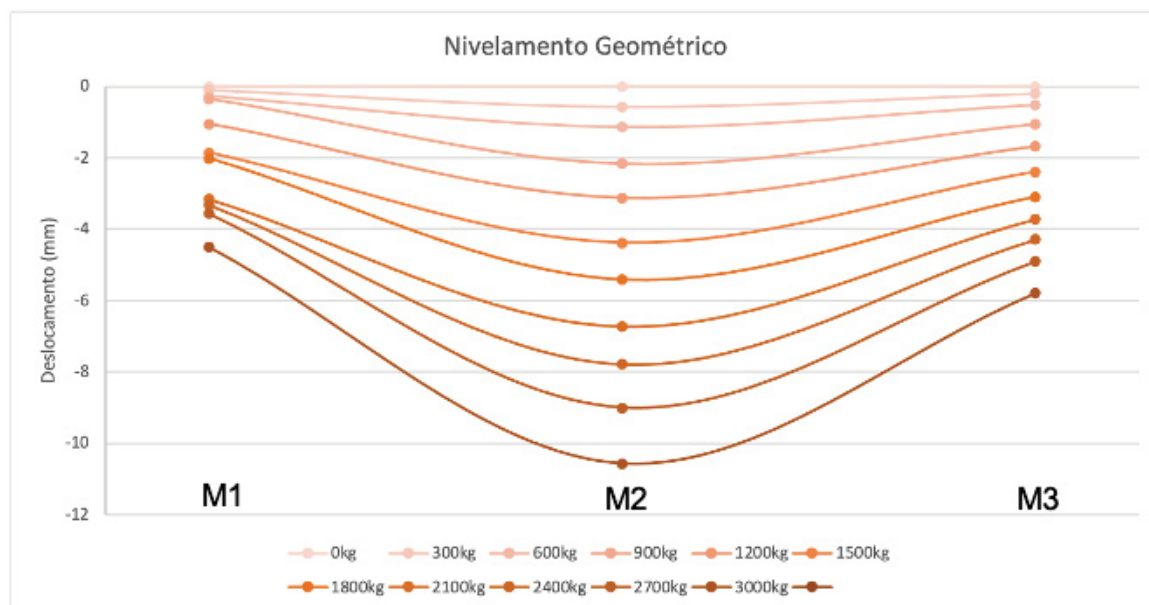
Carga kg	Deslocamento acumulado M1 (mm)	Deslocamento acumulado M2 (mm)	Deslocamento acumulado M3 (mm)
0	0,00	0,00	0,00
300	-0,10	-0,57	-0,20
600	-0,27	-1,14	-0,52
900	-0,35	-2,17	-1,06
1200	-1,05	-3,12	-1,68
1500	-1,86	-4,38	-2,39
1800	-2,02	-5,4	-3,09
2100	-3,16	-6,73	-3,72
2400	-3,32	-7,79	-4,29
2700	-3,56	-9,00	-4,90
3000	-4,5	-10,56	-5,79
3600	-18,64	-25,60	-17,10

Fonte: Os autores (2024).

Ressalta-se que houve o rompimento da viga ao atingir 3600 kg.

A Figura 4.3.1 apresenta os resultados no formato gráfico para o nivelamento geométrico.

Figura 4.3.1 – Resultados no formato gráfico para o nivelamento geométrico



Os autores (2024).

A tabela 4.3.3 apresenta os resultados para o monitoramento trigonométrico.

Tabela 4.3.3 – Resultados para o monitoramento trigonométrico.

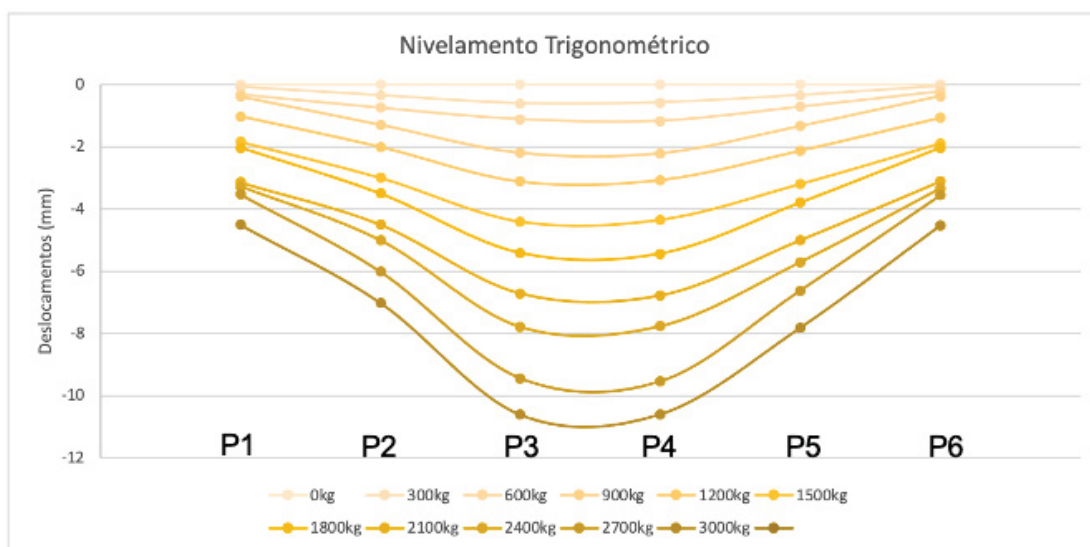
Carga (kg)	Deslocamentos (mm)					
	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)	P4 (mm)	P5 (mm)	P6 (mm)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
300	-0,2	-0,4	-0,6	-0,6	-0,4	-0,1
600	-0,3	-0,8	-1,1	-1,2	-0,7	-0,2
900	-0,4	-1,3	-2,2	-2,2	-1,3	-0,4
1200	-1,0	-2,0	-3,1	-3,1	-2,1	-1,1
1500	-1,8	-3,0	-4,4	-4,4	-3,2	-1,9
1800	-2,0	-3,5	-5,4	-5,4	-3,8	-2,0
2100	-3,2	-4,5	-6,7	-6,8	-5,0	-3,1
2400	-3,3	-5,0	-7,8	-7,8	-5,7	-3,3
2700	-3,5	-6,0	-9,4	-9,5	-6,6	-3,6
3000	-4,5	-7,0	-10,6	-10,6	-7,8	-4,5
3600	-18,6	-20,0	-26,6	-22,6	-20,9	-18,7

Fonte: Os autores (2024).

Ressalta-se que ocorreu o rompimento em 3600 kg.

A figura 4.3.2 apresenta os resultados gráficos para o nivelamento trigonométrico.

Figura 4.3.2 – Resultados gráficos para o nivelamento trigonométrico



Fonte: Os autores (2024).

A tabela 4.3.4 apresenta os resultados para o monitoramento por fotogrametria.

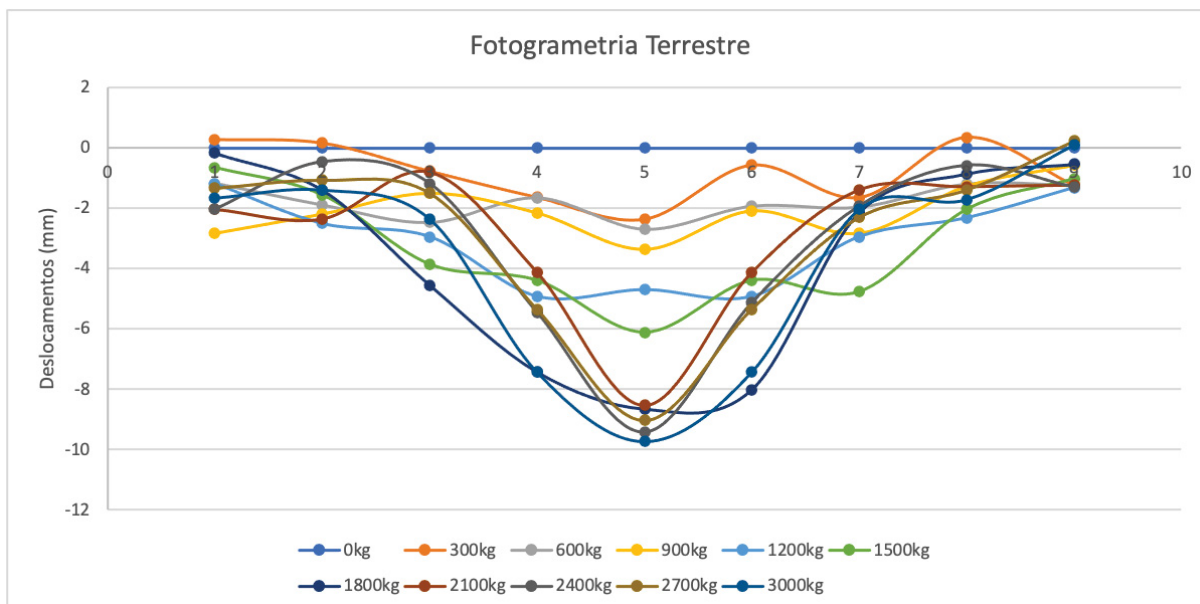
Tabela 4.3.4 – Resultados para o monitoramento por fotogrametria

Carga (kg)	Deslocamentos (mm)								
	T61	T62	T65	T66	T67	T70	T72	T71	T73
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0,28	0,17	-0,77	-1,64	-2,36	-0,57	-1,64	0,36	-1,23
600	-1,18	-1,89	-2,46	-1,65	-2,68	-1,93	-1,96	-1,20	-1,25
900	-2,83	-2,19	-1,50	-2,16	-3,37	-2,09	-2,83	-1,26	-0,57
1200	-1,18	-2,50	-2,94	-4,92	-4,70	-4,92	-2,94	-2,32	-1,31
1500	-0,64	-1,55	-3,85	-4,39	-6,11	-4,39	-4,76	-2,03	-1,02
1800	-0,16	-1,39	-4,55	-7,43	-8,66	-8,02	-2,14	-0,86	-0,53
2100	-2,03	-2,35	-0,80	-4,12	-8,52	-4,12	-1,39	-1,28	-1,23
2400	-2,03	-0,46	-1,18	-5,45	-9,43	-5,13	-1,93	-0,57	-1,30
2700	-1,34	-1,07	-1,50	-5,35	-9,03	-5,35	-2,30	-1,39	0,23
3000	-1,66	-1,39	-2,35	-7,43	-9,73	-7,43	-2,03	-1,71	0,12

Fonte: Os autores (2024).

A figura 4.3.3 apresenta o gráfico de resultados para a fotogrametria terrestre.

Figura 4.3.3 – Gráfico de resultados para a fotogrametria terrestre



Fonte: Os autores (2024).

A tabela 4.3.5 apresenta os parâmetros de cada uma das quatro retas estimadas para cada nuvem de pontos processadas para o laser scanner.

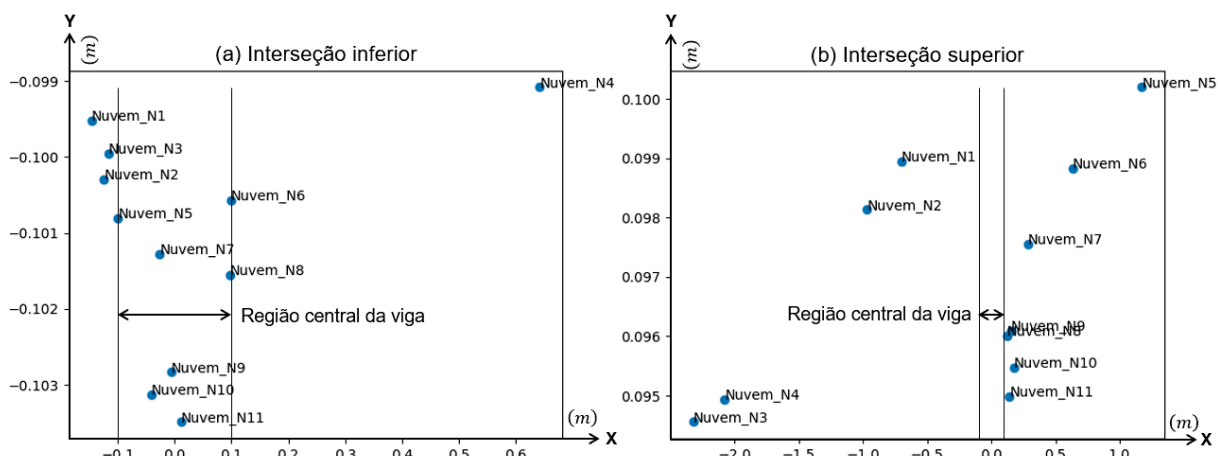
Tabela 4.3.5 - Parâmetros das retas estimadas para cada nuvem de pontos LST.

Nuvem	Reta 1º quad. (x,y)	Reta 2º quad. (x,-y)	Reta 3º quad. (-x,-y)	Reta 4º quad. (-x,y)
N1	$y=0,000x+0,099$	$y=0,003x-0,100$	$y=0,001x-0,097$	$y=0,002x+0,100$
N2	$y=0,000x+0,098$	$y=0,002x-0,100$	$y=0,002x-0,098$	$y=0,002x+0,100$
N3	$y=-0,001x+0,098$	$y=0,003x-0,100$	$y=0,002x-0,098$	$y=0,002x+0,100$
N4	$y=0,001x+0,098$	$y=0,001x-0,100$	$y=-0,003x-0,100$	$y=0,002x+0,101$
N5	$y=0,002x+0,097$	$y=0,004x-0,101$	$y=-0,005x-0,100$	$y=-0,000x+0,099$
N6	$y=0,004x+0,096$	$y=0,005x-0,101$	$y=-0,002x-0,099$	$y=-0,001x+0,098$
N7	$y=0,005x+0,096$	$y=0,005x-0,101$	$y=-0,000x-0,099$	$y=-0,003x+0,098$
N8	$y=0,007x+0,095$	$y=0,006x-0,102$	$y=-0,006x-0,100$	$y=-0,005x+0,097$
N9	$y=0,006x+0,095$	$y=0,008x-0,103$	$y=-0,014x-0,102$	$y=-0,005x+0,097$
N10	$y=0,009x+0,093$	$y=0,007x-0,102$	$y=-0,014x-0,103$	$y=-0,006x+0,096$
N11	$y=0,010x+0,093$	$y=0,009x-0,102$	$y=-0,007x-0,100$	$y=-0,009x+0,095$

Fonte: Os autores (2024)

Como se observa, apenas a partir da nuvem N5 as retas estimadas apresentam um padrão consistente com o esperado. Isso também é evidenciando quando se plotam os pontos de interseção das retas inferiores figura 4.3.4 (a) e superiores figura 4.3.4 (b).

Figura 4.3.4 - Pontos de interseção das retas inferiores (a) e superiores (b)



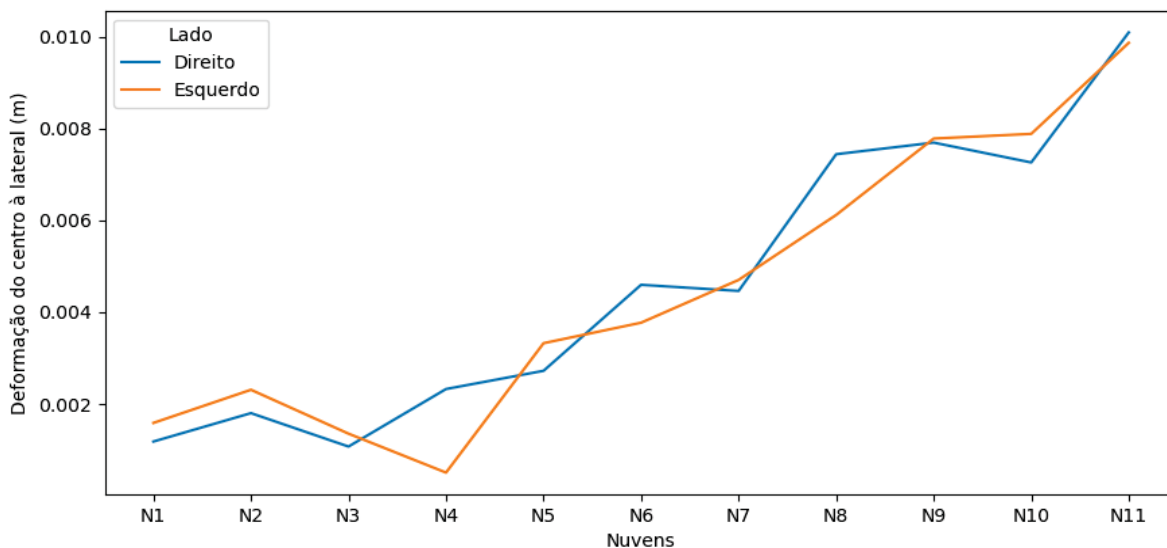
Fonte: Os autores (2024).

Na figura 4.3.4 mostra-se que algumas das coordenadas obtidas através das interseções das retas nas bordas das nuvens não seguem o padrão esperado. Esperava-se que as coordenadas Y dos pontos decrescessem com a sequência das nuvens, que representam o aumento de carga.

As retas estimadas na nuvem $N1$, por exemplo, deveriam ter coeficiente angular nulo, isto é, deveriam ser paralelas e interseccionar o eixo Y exatamente em $[-0,1]$, pois a viga tem aproximadamente 20 cm de altura (0,1 m para cima 0,1 m para baixo).

A Figura 4.3.5 mostra o crescimento de Δy_e e Δy_d para cada nuvem.

Figura 4.3.5 - Crescimento do deslocamento (direita e esquerda) de cada nuvem

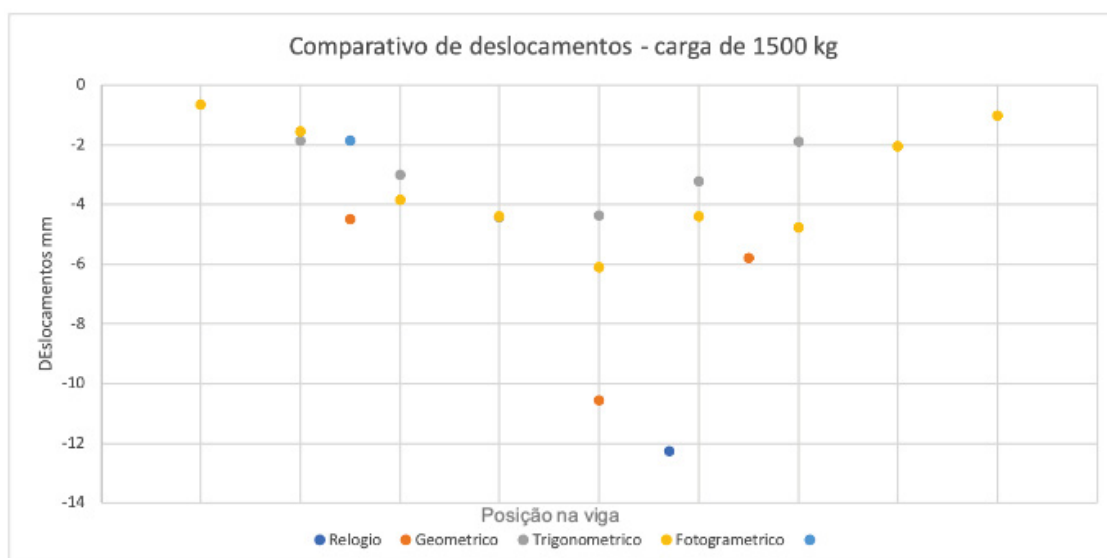


Fonte: Os autores (2024).

Vê-se que a deformação da viga em relação às laterais tem uma amplitude aproximada de 9 mm (1 a 10 mm). O crescimento da deformação com a carga aparenta ser quadrático ou exponencial. Em média, pode-se dizer que a viga deformou $9\text{mm}/3000\text{ kg} = 3\text{ mm}/\text{Ton}$.

A figura 4.3.6 apresenta comparativo dos resultados entre os métodos de nivelamento e o fotogramétrico, bem como com relação ao relógio comparador para a carga de 1500 kg, ou seja, na metade do experimento.

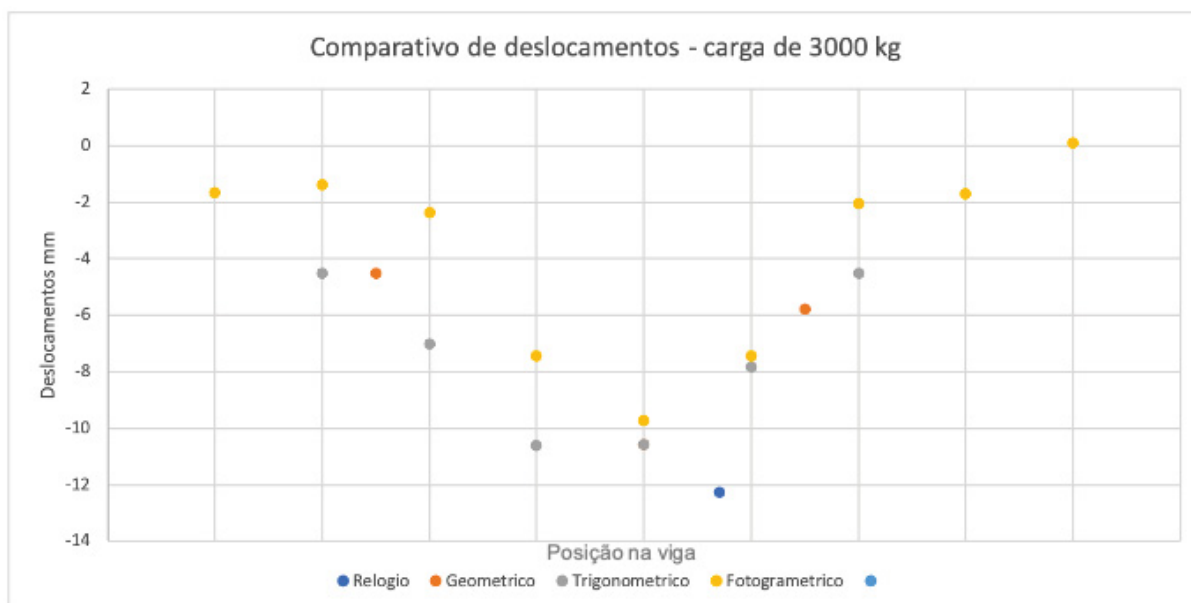
Figura 4.3.6 - Comparativo dos resultados entre os métodos de nivelamento geométrico, trigonométrico, fotogramétrico e relógio comparador.



Fonte: Os autores (2024).

A figura 4.3.7 apresenta comparativo dos resultados entre os métodos de nivelamento e o fotogramétrico, bem como com relação ao relógio comparador para a carga de 3000 kg.

Figura 4.3.7 - comparativo dos resultados entre os métodos de nivelamento, fotogramétrico e relógio comparador.

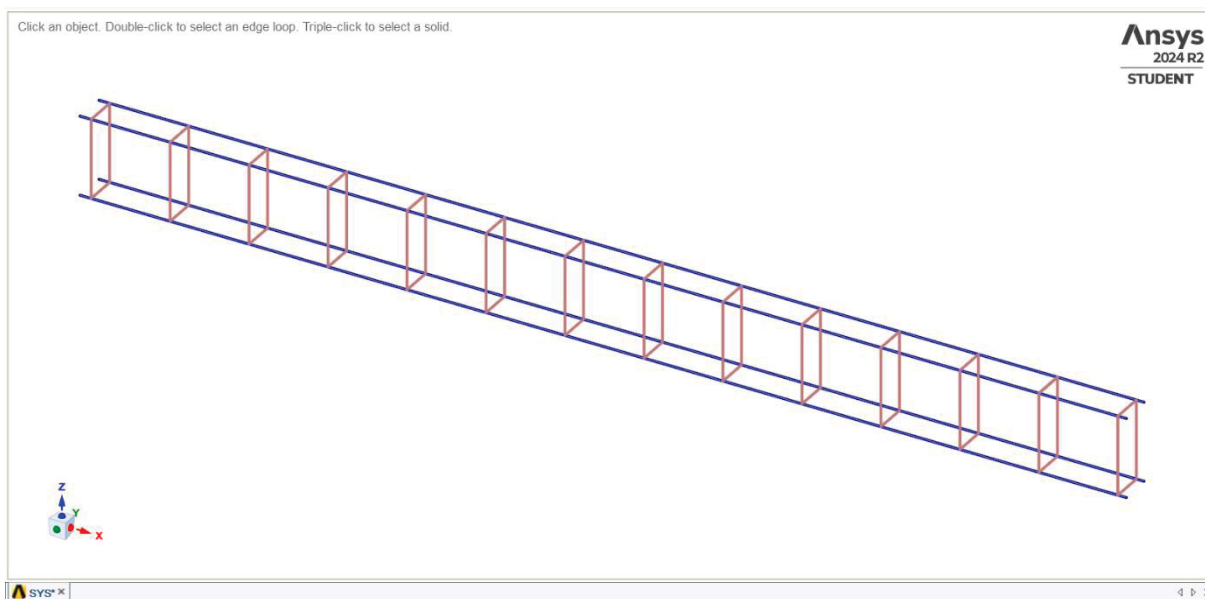


Fonte: Os autores (2024).

Para efeito de comparação dos resultados obtidos pelos métodos geodésicos e não geodésicos de monitoramento, realizou-se a modelagem do sistema prensa/viga por elementos finitos (MEF), e procedendo-se à simulação da aplicação cargas. Os conceitos e procedimentos de aplicação do MEF podem ser vistos, mais aprofundados, no capítulo 2 deste trabalho.

A figura 4.3.8, apresenta a modelagem da armadura CA50, com duas barras inferiores de 10 mm de diâmetro, duas barras superiores de 5 mm de diâmetros estribos de 5 mm de diâmetros, espaçados de 15 cm entre si, de acordo com o projeto executado.

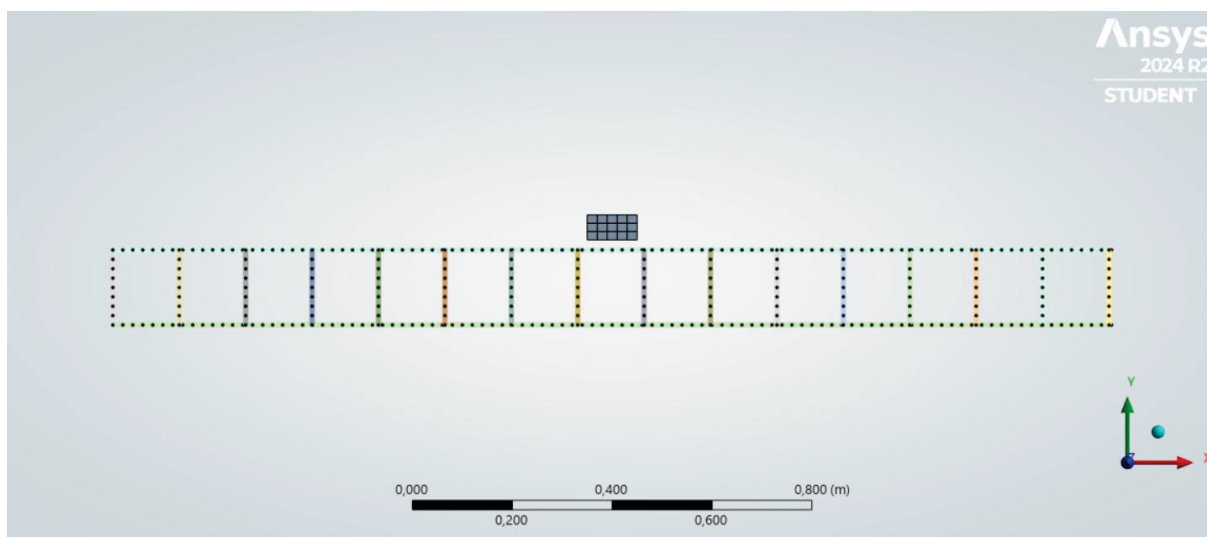
Figura 4.3.8 - Modelagem da armadura de aço CA50.



Fonte: Os autores (2024)

A figura 4.3.9 apresenta a armadura já aplicada o processo de discretização (ver capítulo 2). Nesta figura aparecem também a carga/prensa.

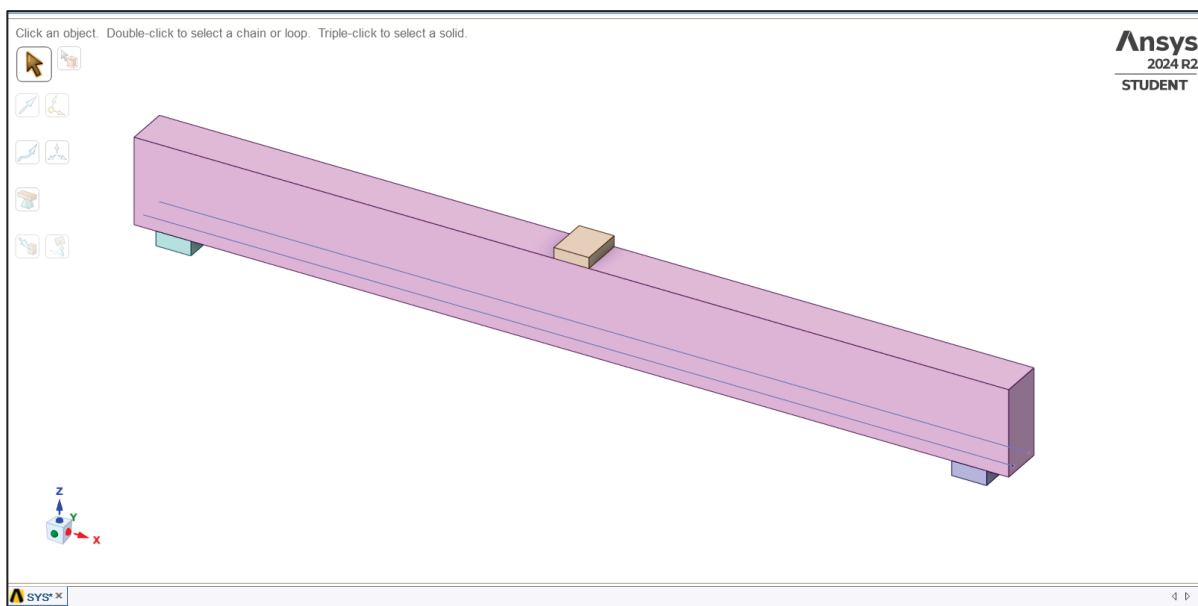
Figura 4.3.9 - Discretização da armadura de aço CA50.



Fonte: Os autores (2024).

A figura 4.3.10 apresenta o modelo do conjunto: prensa, viga e apoios, já organizados e prontos para o processo de discretização e simulação de carga.

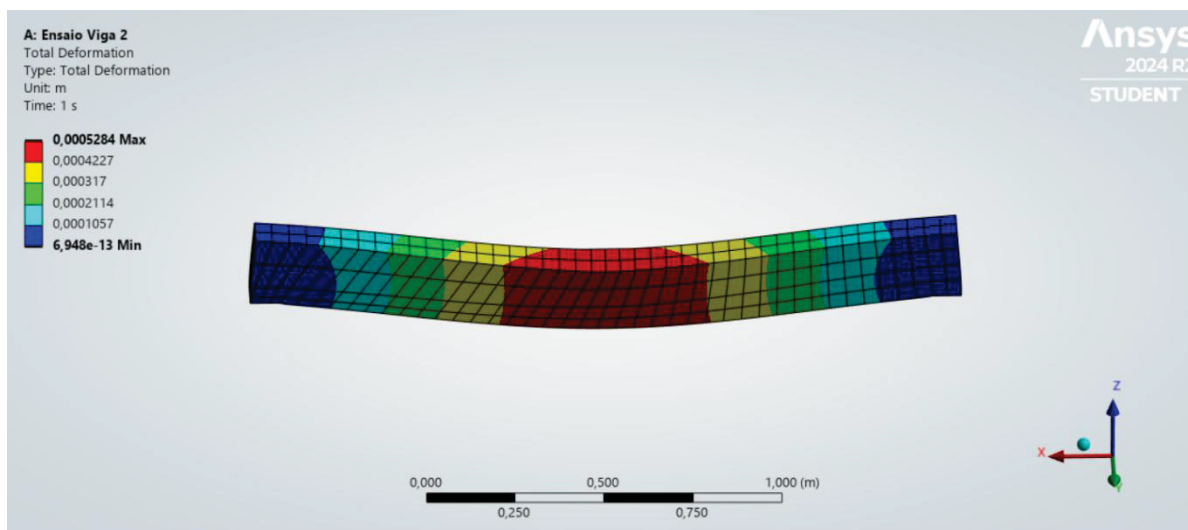
Figura 0.10 - Modelo do conjunto: prensa, viga e apoios.



Fonte: Os autores (2024).

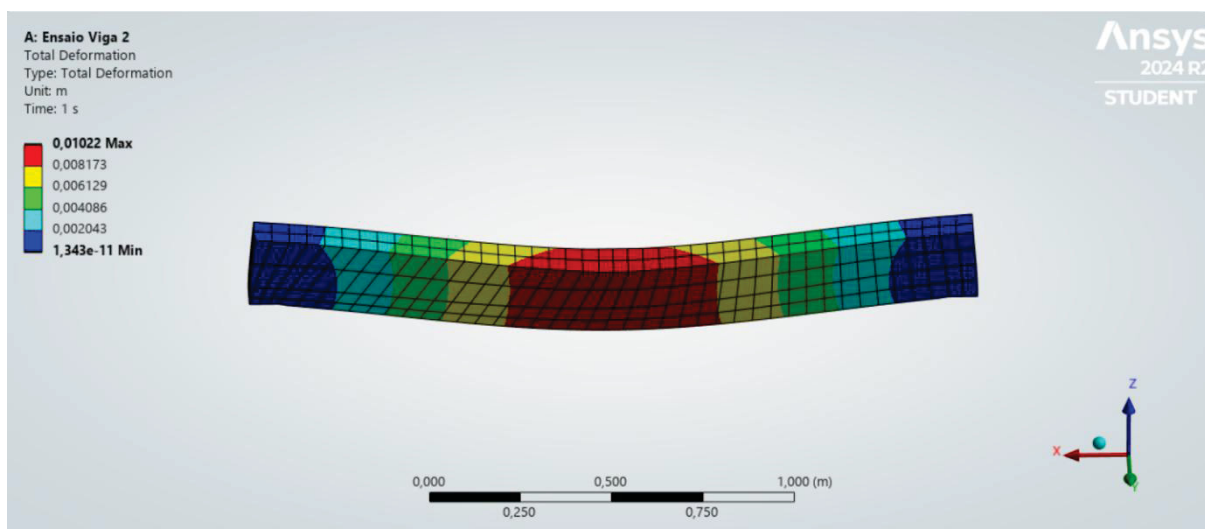
As figuras 4.3.11 e 4.3.12, apresentam os resultados das simulações de cargas, de 300 kg e 3000 kg.

4.3.11 - Resultado da simulação de carga de 300 kg.



Fonte: Os autores (2024).

4.3.12 - Resultado da simulação de carga de 3000 kg.



Fonte: Os autores (2024).

A tabela 4.3.6 apresenta um resumo dos deslocamentos máximos encontrados para cada um dos métodos, para cada carga aplicada.

Tabela 4.3.6 - Resumo dos deslocamentos máximos encontrados para cada um dos métodos.

Carga (kg)	Relógio Comparador (mm)	Nivelamento Geométrico M2 (mm)	Nivelamento Trigonométrico P4 (mm)	Fotogrametria T66 (mm)	Elementos Finitos (mm)
300	-1,93	-0,57	-0,6	-1,64	-0,53
600	-2,74	-1,14	-1,2	-1,65	-1,76
900	-3,73	-2,17	-2,2	-2,16	-2,47
1200	-4,84	-3,12	-3,1	-4,92	-3,17
1500	-5,95	-4,38	-4,4	-4,39	-4,58
1800	-7,14	-5,4	-5,4	-7,43	-5,64
2100	-10,12	-6,73	-6,8	-4,12	-6,70
2400	-9,35	-7,79	-7,8	-5,45	-7,86
2700	-10,31	-9	-9,5	-5,35	-8,98
3000	-12,25	-10,56	-10,6	-7,43	-10,22

Fonte: Os autores (2024).

A partir da tabela, observa-se que existe um padrão de deslocamento para cada incremento de carga de 300 kg, de aproximadamente 1 mm, tanto para os métodos geodésicos quanto para a simulação. O mesmo padrão é detectado pelo relógio comparador, no entanto, para a primeira carga, o relógio aparenta sofrer um arrasto, ainda se acomodando à superfície, a qual possui ondulações em função do seu processo de construção, o que ocasionou um deslocamento aparentemente

superior ao deslocamento real, afetando também no deslocamento acumulado durante todo o experimento.

Apesar de muito próximos, com diferenças muitas vezes no décimo do milímetro, a comparação dos deslocamentos obtidos por nivelamento trigonométrico e geométrico merecem uma atenção, pois os pontos não estavam na mesma coordenada longitudinal da viga.

Ao compararmos os resultados de deslocamentos máximos obtidos pelo MEF, verifica-se uma grande similaridade aos obtidos pelos métodos de nivelamento, principalmente ao nivelamento geométrico. Isto se justifica tanto pela acurácia do método de nivelamento, quanto pela posição da mira central, ou seja, na mesma posição de deslocamentos máximos do MEF.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise comparativa entre os diferentes métodos de monitoramento dos deslocamentos – relógio comparador, nivelamento geométrico, nivelamento trigonométrico por estação total robotizada, varredura laser terrestre e fotogrametria – oferece uma compreensão mais profunda das vantagens e limitações de cada técnica. Embora todos os métodos tenham capturado o comportamento geral da viga de concreto armado sob flexão, cada um apresentou particularidades que influenciam na precisão e no detalhamento dos resultados.

5.1 PRECISÃO

Relógio Comparador: Este método apresentou boa precisão, com uma leitura detalhada dos deslocamentos acumulados. No entanto, as leituras foram afetadas em alguns momentos pelo deslizamento do relógio devido à rugosidade da viga, causando um pequeno erro de medição, especialmente por volta de 2400 kg. A linearidade dos dados foi bastante consistente até o ponto de erro, sendo um bom indicador das deformações globais acumuladas. No entanto, trata-se de um método de ponto único, o que limita sua abrangência espacial.

Nivelamento Geométrico: Apresentou um comportamento muito estável, com alta precisão e linearidade nas leituras, especialmente ao capturar o deslocamento acumulado ao longo da viga. A técnica permitiu monitorar três pontos (M1, M2, M3), oferecendo uma visão mais ampla da distribuição dos deslocamentos ao longo da estrutura. Comparado ao relógio comparador, o nivelamento geométrico teve maior precisão, em três pontos de medição, gerando maior confiabilidade.

Nivelamento Trigonométrico com Estação Total Robotizada: Mostrou-se preciso e estável ao longo de todo o ensaio, com valores de deslocamento em múltiplos pontos da viga sendo medidos de forma confiável. O método apresentou consistência e capturou com detalhes os deslocamentos acumulados em várias seções, especialmente nos alvos centrais. Comparado aos métodos anteriores, sua precisão e abrangência espacial se destacaram, fornecendo uma visão mais detalhada e sistemática dos deslocamentos.

Fotogrametria: embora tenha detectado a distribuição dos deslocamentos em uma ampla gama de alvos, a precisão da fotogrametria foi inferior aos métodos

geodésicos, com a presença de ruídos e variações nos dados, como deslocamentos positivos inesperados em certas cargas (por exemplo, 900 kg em T61). As flutuações nos dados podem ser atribuídas à sensibilidade da técnica, como iluminação e posicionamento da câmera. Em termos de linearidade, a fotogrametria apresentou variações, o que o tornou menos preciso para capturar deslocamentos em pequenos incrementos de carga, para este experimento.

Laser scanner terrestre: O LST ofereceu boa precisão na captura de dados tridimensionais, permitindo um monitoramento detalhado da deformação da estrutura. No entanto, os dados das primeiras séries apresentaram ruídos, o que comprometeu a precisão inicial das medições. Esses ruídos podem ser causados por fatores como reflexões indesejadas, variações ambientais ou pequenas imperfeições na superfície da viga, como no caso das superfícies rugosas do concreto. Para melhorar a linearidade dos resultados, é necessário um pré-processamento rigoroso que inclua a filtragem dos dados e a remoção de pontos fora do padrão.

5.2 ABRANGÊNCIA ESPACIAL

Relógio Comparador: Esse método monitorou apenas um ponto fixo da viga, limitando a abrangência espacial dos resultados. Embora tenha capturado a magnitude do deslocamento acumulado, a falta de dados em outras partes da viga limitou a análise de como a deformação se distribuiu ao longo da estrutura.

Nivelamento Geométrico: Ofereceu uma maior abrangência espacial, monitorando três pontos diferentes ao longo da viga (M1, M2, M3). Isso permitiu uma análise mais completa da distribuição dos deslocamentos e mostrou claramente que a viga sofreu a maior deformação no centro (M2), como esperado em ensaios de flexão.

Nivelamento Trigonométrico com Estação Total Robotizada: Comparado aos outros métodos, este apresentou a maior abrangência espacial, monitorando múltiplos pontos ao longo de toda a viga., pois permitiu a inserção de um grande número de alvos. Tal fato permitiu uma análise detalhada da distribuição dos deslocamentos, especialmente ao comparar os alvos próximos ao centro com os alvos nas extremidades.

Fotogrametria: A fotogrametria permitiu monitorar uma grande quantidade de alvos distribuídos ao longo da viga, o que lhe conferiu uma boa abrangência espacial.

No entanto, a precisão e a consistência dos dados foram comprometidas devido a modelagem da estrutura, tornando as variações ao longo dos diferentes alvos menos confiáveis em alguns momentos. Ainda assim, foi eficaz para capturar o comportamento geral da estrutura.

Laser scanner terrestre: Em termos de abrangência espacial, o LST se destacou por ser capaz de capturar uma grande quantidade de pontos ao longo de toda a viga, fornecendo uma visão tridimensional detalhada da estrutura. Comparado aos outros métodos, como o nivelamento geométrico ou o relógio comparador, o laser scanner oferece uma cobertura muito mais ampla, permitindo a captura de informações sobre o comportamento da viga em todos os pontos simultaneamente. Essa vantagem espacial torna o método ideal para análises globais de estruturas, onde se deseja mapear a distribuição dos deslocamentos ao longo de toda a superfície, sem se limitar a alguns pontos específicos. No entanto, essa grande quantidade de dados pode ser difícil de interpretar sem uma correta filtragem e processamento. O uso de técnicas de detecção de bordas ajudou a destacar regiões de interesse e a reduzir a quantidade de dados irrelevantes, facilitando a análise das áreas que apresentaram maior deformação.

5.3 CONSISTÊNCIA DOS DADOS

Relógio Comparador: Apesar do erro causado pelo deslizamento devido à rugosidade da viga, o método foi consistente em capturar deslocamentos progressivos. No entanto, o erro localizado destacou a importância de cuidados extras na instrumentação quando se lida com superfícies irregulares.

Nivelamento Geométrico: Apresentou dados muito consistentes, sem variações abruptas ou anomalias significativas, fornecendo uma base sólida para comparação com os demais.

Nivelamento Trigonométrico com Estação Total Robotizada: Esse método foi consistente, oferecendo leituras precisas e estáveis ao longo de todo o ensaio. As pequenas variações entre alvos próximos foram coerentes com o comportamento esperado da viga, reforçando a confiabilidade da estação total robotizada.

Fotogrametria: Os dados fotogramétricos, embora úteis, mostraram maior variabilidade e menor consistência. Os deslocamentos positivos inesperados e as flutuações observadas em alguns pontos indicam que a metodologia é sensível a

fatores externos, comprometendo a confiabilidade dos dados em alguns momentos. Em comparação com os métodos geodésicos, a fotogrametria foi a menos consistente. No entanto, salienta-se que estudos para avaliar a flexão de uma viga metálica utilizando fotogrametria estão sendo realizados na USP - São Carlos, e têm apresentado resultados melhores que o milímetro. Como base nisto e nos resultados obtidos neste estudo, recomenda-se a calibração da câmera utilizada, bem como a utilização de um número maior de pontos de controle.

Laser scanner terrestre: A consistência dos dados coletados foi inicialmente comprometida pelas cinco primeiras séries, onde se observou um ruído significativo. Esse ruído, como mencionado, pode ser atribuído a reflexões indesejadas ou problemas no escaneamento inicial. Após a aplicação de técnicas de filtragem, os resultados finais tornaram-se mais consistentes e alinhados com os comportamentos esperados da viga sob flexão. Comparado a métodos como o nivelamento trigonométrico por estação total robotizada, o laser scanner tem uma desvantagem inicial em termos de consistência, pois é mais sensível a interferências externas. Contudo, com o pré-processamento adequado, o método pode gerar resultados extremamente detalhados e confiáveis, desde que o ruído inicial seja adequadamente tratado. Assim, a consistência dos dados do laser scanner melhora significativamente após as primeiras séries de medição.

5.4 FACILIDADE DE APLICAÇÃO

Relógio Comparador: O método é simples de aplicar e bastante robusto para medir deslocamentos em um único ponto, desde que a superfície seja adequada. Entretanto, sua limitação a apenas um ponto de medição restringe sua aplicação em monitoramentos mais amplos.

Nivelamento Geométrico: Embora requeira mais trabalho de campo que o relógio comparador, o nivelamento geométrico é relativamente simples de operar, e ofereceu alta precisão em medições de deslocamentos acumulados ao longo de vários pontos da viga.

Nivelamento Trigonométrico com Estação Total Robotizada: Embora mais complexo, a estação total robotizada é extremamente robusta, oferecendo medições automatizadas e precisas em uma ampla gama de alvos, com mínima interferência

humana, o que reduz a possibilidade de erros. Um ponto negativo foi o tempo de obtenção das observações.

Fotogrametria: a fotogrametria é vantajosa por sua capacidade de capturar muitos pontos simultaneamente. No entanto, exige uma grande capacidade de processamento, devido ao grande número de pontos.

Laser scanner terrestre: embora ofereça a vantagem de capturar uma grande quantidade de dados rapidamente, sua sensibilidade a fatores externos como superfícies refletivas requer maior cuidado na configuração sistema: tanto do equipamento quanto do corpo monitorado. Comparado a métodos mais simples como o relógio comparador ou o nivelamento geométrico, o laser scanner exige maior expertise técnica e um tempo adicional de processamento, em troca proporciona um nível de detalhamento muito superior. O uso de técnicas de detecção de bordas ajudou a destacar regiões de interesse e a reduzir a quantidade de dados irrelevantes, facilitando a análise das áreas que apresentaram maior deformação.

Por fim, salienta-se que um artigo está sendo produzido para tratar exclusivamente da metodologia e resultados encontrados da aplicação do laser scanner terrestre para o monitoramento da flexão de estruturas.

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.
- ASSIS, W. S. de. Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de engenharia civil. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- 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.
- BOLINA, Fabricio Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. *Patologia de estruturas*. Oficina de Textos, 2019.
- 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.
- COSTA, A. A., QUARCIONI, V. A.; Monitoramento da durabilidade de estruturas de concreto armado existentes: conceitos, avanços e perspectivas. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 17, p. e17614, 2024.
- CRUZ, Lucas S.; JUNGES, Elisabeth; PELLANDA, Lucas C. Comparação entre métodos simplificados e refinados para o cálculo de flechas diferidas em vigas contínuas de concreto armado. In: XII CBPE-Congresso brasileiro de pontes e estruturas. 2021.
- Da Cruz, W.; Graça, N.L. S. S.; Faggion, P. L. Utilização de espelho de reflexão frontal aliado ao nivelamento 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 beam 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
- FRANÇOSO, M. et al. Precision Geometric Levelling for the Control of Vertical Displacements in the Recovery and Reinforcement of Concrete Beam, a Case Study Nivelación Geométrica de Precisión para el Control de Desplazamientos Verticales en la Recuperación y Refuerzo de. 2019.
- Gemin, A. R. S.; Matos, É. S.; Faggion, P. L. Investigações preliminares do processo de calibração de sistemas de nivelamento 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.
- JERKE, Andreas; FAGGION, Pedro Luis; DA CRUZ, Wander. Fatores que influenciam no monitoramento geodésico de barragens utilizando estação total. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 8, n. 1, p. 47-59, 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 Maua HPP. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 66, n. 7, 1505-1515, 2014.

LEONHARDT, F. MÖNNIG, E, 2008. Construções de concreto. Princípios básicos de dimensionamento de estruturas de concreto. Vol. 1. Editora Interciência Ltda. Rio de Janeiro, RJ.

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.

Muguio, 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.; Hilleshein, 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.

OLIVEIRA, José Jorge Aragão. Análise teórica da deflexão de vigas de concreto com agregados reciclados de RCD. 2018. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2018.

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.

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: algorithms and applications*. London, England: Springer Nature, 2022.

THOMAZ, Ercio. *Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação*. Oficina de Textos, 2020.

TYMCHUK, Yuriy et al. Walls, pillars and beams: A 3d decomposition of quality anomalies. In: *2016 IEEE Working Conference on Software Visualization (VISSOFT)*. IEEE, 2016. p. 126-135.

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.

6 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar o processamento da nuvem de pontos do levantamento fotogramétrico em sua totalidade, aplicando os métodos de filtragem e pré-processamento;
- Desenvolver de uma metodologia de automação do processamento das nuvens de pontos obtidas com laser scanner para este tipo específico de levantamento.
- Analisar a comparação com outros métodos de monitoramento não geodésicos, como os que envolvem a aplicação de fibra ótica na detecção de deslocamentos.
- Inserir de um maior número de pontos de controle, distribuídos no ambiente de monitoramento, além da calibração prévia da câmera utilizada no método da fotogrametria.

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.
- ASSIS, W. S. de. Sistemas computacionais de apoio à monitoração de estruturas de engenharia civil. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- 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.
- BOLINA, Fabricio Longhi; TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; HELENE, Paulo. *Patologia de estruturas*. Oficina de Textos, 2019.
- 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.
- COSTA, A. A., QUARCIONI, V. A.; Monitoramento da durabilidade de estruturas de concreto armado existentes: conceitos, avanços e perspectivas. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 17, p. e17614, 2024.
- CRUZ, Lucas S.; JUNGES, Elisabeth; PELLANDA, Lucas C. Comparação entre métodos simplificados e refinados para o cálculo de flechas diferidas em vigas contínuas de concreto armado. In: XII CBPE-Congresso brasileiro de pontes e estruturas. 2021.
- Da Cruz, W.; Graça, N.L. S. S.; Faggion, P. L. Utilização de espelho de reflexão frontal aliado ao nivelamento 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 beam 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

FRANÇOSO, M. et al. Precision Geometric Levelling for the Control of Vertical Displacements in the Recovery and Reinforcement of Concrete Beam, a Case Study Nivelación Geométrica de Precisión para el Control de Desplazamientos Verticales en la Recuperación y Refuerzo de. 2019.

Gemin, A. R. S.; Matos, É. S.; Faggion, P. L. Investigações preliminares do processo de calibração de sistemas de nivelamento 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.

JERKE, Andreas; FAGGION, Pedro Luis; DA CRUZ, Wander. Fatores que influenciam no monitoramento geodésico de barragens utilizando estação total. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 8, n. 1, p. 47-59, 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 Maua HPP. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 66, n. 7, 1505-1515, 2014.

LEONHARDT, F. MÖNNIG, E, 2008. Construções de concreto. Princípios básicos de dimensionamento de estruturas de concreto. Vol. 1. Editora Interciência Ltda. Rio de Janeiro, RJ.

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.

Muguio, 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.; Hilleshein, 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.

OLIVEIRA, José Jorge Aragão. Análise teórica da deflexão de vigas de concreto com agregados reciclados de RCD. 2018. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2018.

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.

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: algorithms and applications*. London, England: Springer Nature, 2022.

THOMAZ, Ercio. *Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação*. Oficina de Textos, 2020.

TYMCHUK, Yuriy et al. Walls, pillars and beams: A 3d decomposition of quality anomalies. In: *2016 IEEE Working Conference on Software Visualization (VISSOFT)*. IEEE, 2016. p. 126-135.

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.