

Análise da deformação de barra metálica por nivelamento geométrico e modelagem por elementos finitos

RESUMO

Leandro Ítalo Barbosa de Medeiros

leandro.medeiros@ufpi.edu

orcid.org/0000-0002-0437-1269

Universidade Federal do Piauí (UFPI),

Teresina, Piauí, Brasil.

Universidade Federal do Paraná (UFPR),

Curitiba, Paraná, Brasil.

Pedro Luís Faggion

faggion@ufpr.br

orcid.org/0000-0002-4881-8720

Universidade Federal do Paraná (UFPR),

Curitiba, Paraná, Brasil.

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 dos levantamentos e ajustamentos das observações, 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 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.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos de elementos finitos. Nivelamento geométrico geodésico. Monitoramento de estruturas metálicas. Deformações metálicas.

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 (FOSSEN, 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 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, como no monitoramento de usinas (SILVA; FAGGION; VEIGA, 2014); detecção de deslizamentos (SALVINI et al., 2022), monitoramento de estruturas metálicas (ARSENE, 2018); prédios antigos (FREGONESE et al., 2013), e diversas outras estruturas, sendo também utilizado na validação de diversas outras metodologias de detecção de movimentos estruturais verticais (GUMUS; SELBESOGU; CELIK, 2016). Essa metodologia é fundamental para o estudo de deformações, uma vez que permite a detecção das flechas de deslocamentos verticais, como visto em Zonta, Nadal e Prata (2014).

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 mais complexas tridimensionais. 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 (CERVERA et al., 2013; BISHOP, 2014; GONZÁLEZ; LEE; PARK, 2017). 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.

Alguns estudos envolvendo a aplicação da geodésia em conjunto com MEF podem ser vistos em Fregonese et al. (2013), que tratam da aplicação destes na avaliação da conservação estrutural de obras antigas; Gikas et al. (2016) o qual analisa a estabilidade de uma passarela estaiada por cabos; Acosta et al. (2018) que comparam os resultados obtidos de um monitoramento por GNSS com a simulação por MEF aplicados a uma represa; e Ostapiv et al. (2020) que apresentam uma avaliação experimental de estruturas geodésicas de bambu reforçadas com cabos.

Com a combinação do nivelamento geométrico de alta precisão (OGUNDARE, 2015; NADAL et al. 2010; KUCHMISTER et al., 2020), bem como do MEF, faz-se possível realizar uma análise completa da deformação da estrutura metálica 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. O presente trabalho se diferencia dos demais, principalmente, pelo uso das metodologias em ambiente controlado, e com experimentos mecânicos em estruturas em alumínio, material que vem sendo cada vez mais utilizado em diversas obras da engenharia.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Instrumentação Geodésica (LAIG) da Universidade Federal do Paraná, dotado de uma infraestrutura para realização de nivelamentos geodésicos de alta precisão em ambiente controlado, como mostram Nadal et al. (2010), e Gemin, Matos e Faggion (2016). Para tanto, utilizou-se uma barra (perfil) de alumínio com comprimento de 2,03m, apoiada sobre dois tripés topográficos (Figura 1). A barra de alumínio utilizada possui 38mm de altura e largura, 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 1 – Disposição da barra utilizada no experimento



Fonte: Autoria própria (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.

Figura 2 – Grampos de utilizados para fixar a barra aos tripés



Fonte: Autoria própria (2023).

A fim de estimular a deflexão central da barra, utilizou-se um conjunto de cargas, em formato de anilhas (Figura 3). Cada anilha possui massa de 1Kg, e foram sendo aplicadas duas a duas. Ou seja, a cada série, incrementou-se uma carga de 2Kg, totalizando 10Kg. Em seguida, foram retiradas todas as cargas e realizado um novo levantamento, a fim de verificar o comportamento estrutural da barra.

Figura 3 – Barra exposta a carga de 6Kg



Fonte: Autoria própria (2023).

A Tabela 1 apresenta o procedimento de incremento de carga, bem como da retirada, ao final, adotado para cada série.

Tabela 1 – Séries de Cargas

Série	Carga
1	0 Kg
2	2 Kg
3	4 Kg
4	6 Kg
5	8 Kg
6	10 Kg
7	0 Kg

Fonte: Autoria própria (2023).

Como dito, o monitoramento do comportamento dessa estrutura metálica nos experimentos foi realizado através de nivelamento geométrico. Utilizou-se para tanto um nível geodésico digital modelo Leica DNA03, com precisão $\pm 0,3\text{mm/km}$ para 1km duplo nivelado (LEICA, 2004). O Equipamento foi instalado sobre um tripé industrial, o qual é dotado de um sistema de amortecimento de vibrações, possibilitando uma maior estabilidade, com a redução da interferência da movimentação no solo seu entorno (Figura 4), principalmente pelos operadores do equipamento.

Figura 4 – Nível DNA03 sendo operacionalizado, instalado sobre tripé industrial



Fonte: Autoria própria (2023).

O nível digital DNA03 tem sido amplamente utilizado em diversos trabalhos que exigem alta precisão de resultados de nivelamento geométrico. Alguns exemplos são os estudos de Andolfato (2010); Andolfato e Faggion (2011), Gemin, Matos, Faggion (2016); Kuchmister et al. (2020) e Canto e Seixas (2020).

Foram utilizadas miras confeccionadas em fitas de código de barras para leitura de nível eletrônico. Tais miras são perfeitamente compatíveis para a leitura com níveis Leica (ANDOLFATO; FAGGION, 2011). Posicionaram-se quatro miras: uma mira de referência, fixada na parede localizada ao fundo da sala (Mira R1), e três miras fixadas na barra. Uma à esquerda, uma ao centro e uma à direita, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Disposição das miras utilizadas



Fonte: Autoria própria (2023).

O processo construtivo dessas miras pode ser visto em Andolfato (2010), onde o autor apresenta também uma proposta de automação de níveis geodésicos digitais. Para o controle da variação da temperatura, a fim de evitar dilatação das miras, manteve-se o ambiente de ensaio fechado e aclimatado durante todo o experimento. As miras de vante foram nomeadas como: mira V1, mira V2 e mira

V3. Salienta-se, aqui, que os prismas e alvos de leitura fotogramétricas vistos na Figura 5, são objetos de um artigo a ser publicado posteriormente para o experimento. A Tabela 2 apresenta as leituras de nível para cada mira, em cada uma das séries.

Tabela 2 – Séries de leituras das miras

Carga (Kg)	Leituras de mira (m)			
	R1	V1	V2	V3
0	0,20809	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: Autoria própria (2023).

O cálculo dos desníveis foi realizado pelo método de visadas iguais, ou seja, com o nível posicionado com uma diferença inferior a 2m de distância com relação a cada uma das miras. Este método apresenta como vantagem a eliminação de erros sistemáticos provocados pelo não paralelismo entre o eixo de colimação óptico e o eixo do nível tubular (erro de colimação), bem como evita o erro devido à refração atmosférica, e ainda o erro devido a não consideração da curvatura terrestre (NADAL et al. 2010; GHILANI; WOLF, 2015). O cálculo dos deslocamentos se deu segundo a Equação 1:

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

Da equação 1, tem-se que Δh_n é o desnível entre a mira de ré e cada uma das miras de vante para cada série; 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 7, que é a quantidade de séries medidas. Deste modo, 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 (Δh_1), 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; Δh_1 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 2Kg.

Para efeito de comparação dos resultados, utilizou-se o modelo dos elementos finitos (MEF), uma metodologia utilizada para analisar o comportamento de estruturas e sistemas complexos em engenharia e ciências

aplicadas. O modelo de elementos finitos é uma ferramenta poderosa que permite a análise de problemas complexos que não podem ser resolvidos de forma analítica. Bastante utilizado em diversas áreas da engenharia, incluindo análise estrutural, mecânica dos fluidos, transferência de calor, eletromagnetismo e muitas outras aplicações (ACOSTA et al. 2018; DA SILVA FILHO, 2009; OSTAPIV et al., 2020).

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; VIEIRA, 2020), deslocamentos de superficiais (ACOSTA et al., 2018) e análise de estruturas viárias (GIKAS et al., 2016).

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. Neste artigo, utilizou-se o *software ANSYS*, versão gratuita estudantil, para a modelagem da barra. Tal software tem sido utilizado em diversas aplicações envolvendo MEF, tais como em: Barros e Rodrigues (2023), que o utilizam para a simulação de desgastes de engrenagens metálicas; Miloch e Faria (2021) e Faria (2022) que trabalham com o software na análise do desempenho dos componentes metálicos de fundações de obras de engenharia; e Mushtaq, Colella e Gaetani (2022), que aplicam o *software ANSYS* na análise de turbina supersônica para aplicações em motores de detonação rotativa. 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* (THOMPSON; THOMPSON, 2017; MALI; PISE, 2023).

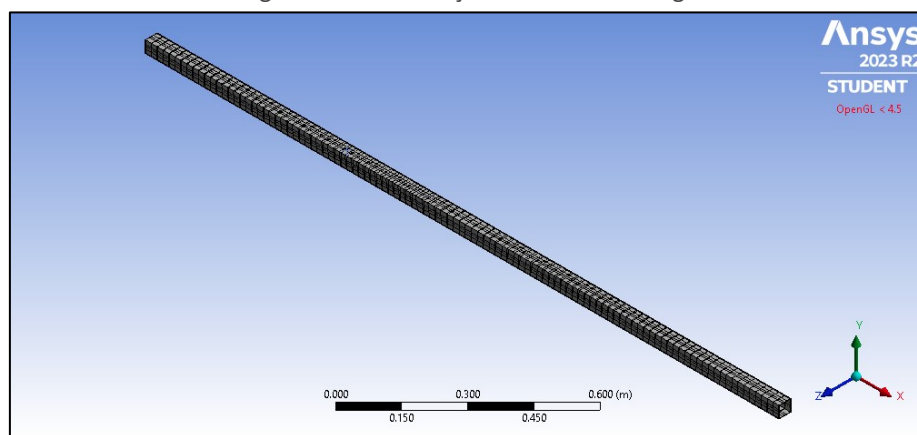
O módulo de Young, também conhecido como módulo de elasticidade, é uma propriedade fundamental dos materiais que descreve sua capacidade de deformar elasticamente quando submetidos a uma força e, em seguida, retornar à sua forma original quando a força é removida. Ele é frequentemente denotado pela letra "E"

e é uma medida da rigidez do material (MALI; PISE, 2023). Em outras palavras quanto maior o valor do módulo de *Young*, mais rígido é o material (THOMPSON; THOMPSON, 2017). Neste caso, adotou-se $7,0 \times 10^{10}$ Pa para o módulo de elasticidade do alumínio.

A etapa seguinte é o desenho digital paramétrico, 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, 2,03m 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; CRISTOFORO, 2022). A Figura 6 apresenta o resultado do processo de discretização do modelo.

Figura 6 - Discretização do modelo da viga



Fonte: Autoria própria (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.

A última etapa da simulação é a inserção das cargas e o processamento. Nesta etapa, onde já foram inseridos previamente os locais de aplicação, são apresentadas ao software os valores referentes às cargas para que este realize a simulação de estresse.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

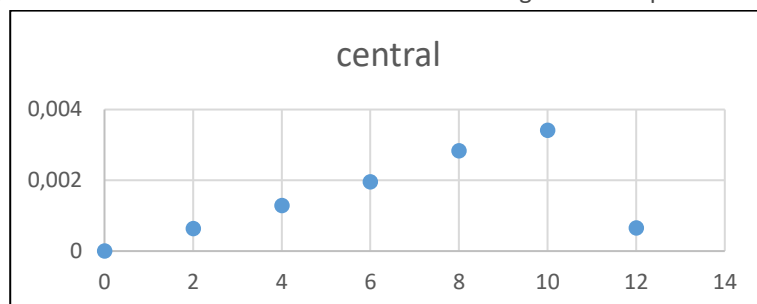
As figuras 7 a 9 apresentam os resultados obtidos das séries por nivelamento geométrico. No eixo horizontal, apresentam-se as cargas, no eixo vertical as variações em metros.

Figura 7 - resultados encontrados do nivelamento geométrico para a mira V1



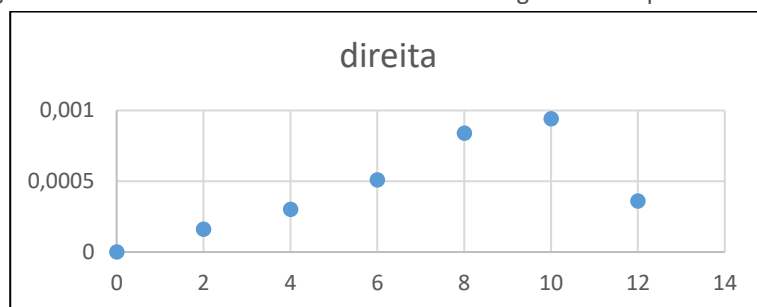
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 8 - Resultados encontrados do nivelamento geométrico para a mira V2



Fonte: Autoria própria (2023).

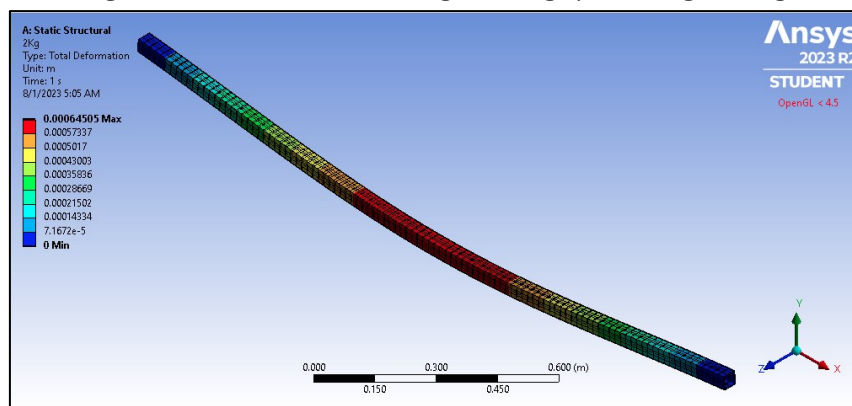
Figura 9 - resultados encontrados do nivelamento geométrico para a mira V3



Fonte: Autoria própria (2023).

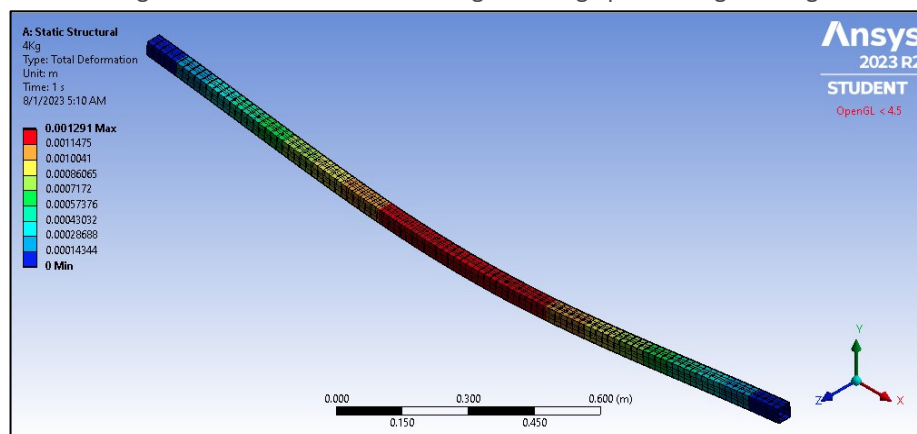
As figuras 10 a 14, apresentam os resultados obtidos da simulação por elementos finitos para as cargas de 0Kg, 2Kg, 4kg, 6Kg, 8Kg, 10Kg 0Kg.

Figura 10 – Resultado da modelagem da viga para a carga de 2Kg



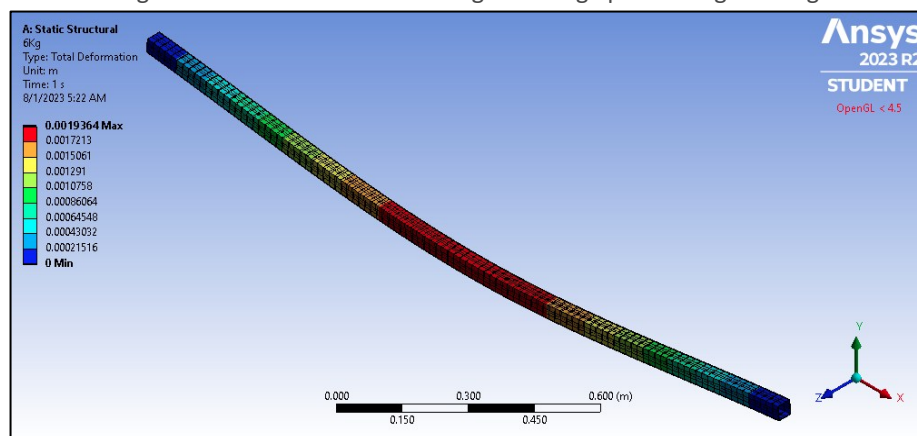
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 11 – Resultado da modelagem da viga para a carga de 4Kg



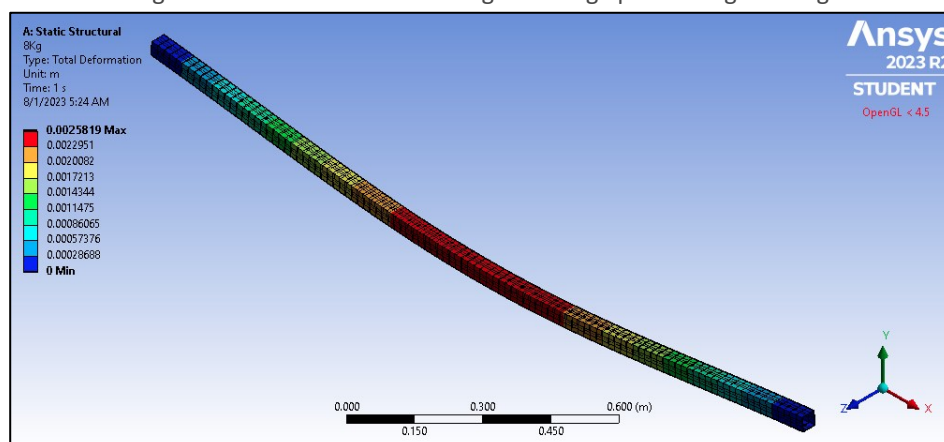
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 12 – Resultado da modelagem da viga para a carga de 6Kg



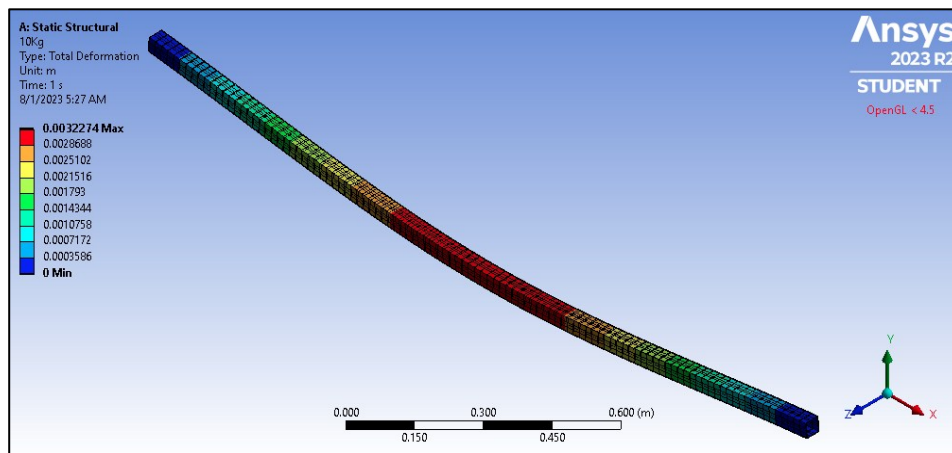
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 13– Resultado da modelagem da viga para a carga de 8Kg



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 14– Resultado da modelagem da viga para a carga de 10Kg



Fonte: Autoria própria (2023).

Como esperado, observa-se que a área central da barra, em tons avermelhados, presencia os maiores deslocamentos a cada série. Deste modo, para fins de comparação, a Tabela 3 apresenta os resultados de deslocamento máximo da simulação bem como os deslocamentos obtidos do nivelamento geométrico para a mira central.

Tabela 3 - resultados de deslocamento central por série

Série	Carga	Deslocamentos (mm)		Diferença (mm)
		Nivelamento	Simulação MEF	
1	02 Kg	0,64	0,57	0,07
2	04 Kg	1,29	1,29	0,00
3	06 Kg	1,96	1,93	0,02
4	08 Kg	2,83	2,58	0,25
5	10 Kg	3,41	3,22	0,18

Fonte: Autoria própria (2023).

Ao analisar as colunas de deslocamentos, percebe-se que os valores aumentam juntamente com o incremento de carga, o que já era esperado para o experimento.

Em todos as séries percebe-se que para o deslocamento, tanto no nivelamento geodésico quanto na simulação por MEF, os resultados se apresentam em valores muito próximos.

Analisando-se a coluna das diferenças 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 praticamente nulas.

A semelhança dos resultados indica que os métodos escolhidos são capazes de verificar os deslocamentos em conjunto. Neste sentido, o MEF pode corroborar para uma análise global da barra sob esforços. Ou seja, em conjunto aos deslocamentos máximos, pode-se analisar ainda outras regiões da barra, além dos pontos onde foram inseridas as miras para o nivelamento. Neste sentido, o MEF se apresenta como uma ferramenta poderosa na simulação de esforços em

estruturas, podendo ser utilizado em conjunto aos métodos abrangidos pela Geomática.

Ainda, a semelhança dos resultados aponta para um nivelamento geométrico bem executado, sendo capaz de detectar deformações verticais reais dos pontos escolhidos do corpo monitorado.

Não obstante, os resultados apontam para uma correta discretização da estrutura, bem como da escolha dos parâmetros de composição e condições de contorno do corpo monitorado para a simulação por MEF.

CONCLUSÃO

Tendo a certeza de que o nivelamento geométrico foi realizado cumprindo-se todo o rigor do método, pela semelhança dos resultados, conclui-se que o método dos elementos finitos, quando executado com correta escolha de parâmetros de materiais e condições de contorno, é capaz de apresentar resultados fidedignos à realidade.

Por outro lado, 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 de tal estrutura.

Por fim, conclui-se que a utilização do software aqui apresentado, em sua versão estudantil e gratuita, desde que inseridos os parâmetros corretamente, corrobora para uma análise eficaz do comportamento de estruturas sob efeitos de carga, podendo ser aplicado, também, em outros campos acadêmicos.

Analysis of steel bar deformation by geometric leveling and finite element modeling

ABSTRACT

Geometric leveling is a measurement methodology used to determine level differences between points of interest. Essential in several engineering projects, when executed with adequate equipment and with the due accuracy of the survey, it is capable of presenting results with sub-millimeter precision, which allows it a wide use in monitoring procedures of the most diverse natural and anthropic structures. On the other hand, Finite Element Model are a numerical modeling approach used to simulate the structural behavior of materials under different load and restraint conditions. In this method, the structure is discretized into small interconnected elements, allowing accurate answers to be obtained at different points. In this work, an aluminum beam exposed to different loads was monitored in order to verify the displacements found using geometric leveling with a geodesic level, comparing the expected displacements to those modeled by finite elements. The results found by both methodologies present variations in the tenth of a millimeter.

KEYWORDS: Finite Element Models. Geodesic geometric level. Monitoring of metallic structures. Metal deformations.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao PPGCG da UFPR pela disponibilidade do Laboratório para os ensaios, bem como ao Prof. Dr. Luis Augusto K. Veiga e à técnica do LAIG, Me. Dayane Wiggers, pelo auxílio no levantamento dos dados.

REFERÊNCIAS

ACOSTA, L. E.; DE LACY, M. C.; RAMOS, M. I.; CANO, J. P.; HERRERA, A. M.; AVILÉS, M.; GIL, A. J.. Displacements Study of an Earth Fill Dam Based on High Precision Geodetic Monitoring and Numerical Modeling. **Sensors**, v. 18, n. 5, p. 1369, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18051369>.

ANDOLFATO, S. H. D.. **Sistema de Automação de Nível Digital**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Curitiba, 2010.

ANDOLFATO, S. H. D.; FAGGION, P. L.. Desenvolvimento de um sistema de automação de níveis digitais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 17, n. 2, p. 188-199, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702011000200002>.

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. <https://doi.org/10.12957/ric.2022.63559>.

ARSENE, C.. Reviewing the vertical of a metallic construction through geometric levelling. **Agricultura**, v. 105, n. 1-2, 2018. <https://doi.org/10.15835/agrisp.v105i1-2.13043>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT).. Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

BARROS, F. A.; RODRIGUES, R N.. Estudo numérico de desgaste em engrenagens cônicas de dentes retos pelo método dos elementos finitos. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 15, n. 1, p. 1-11, 2023.

BISHOP, J. E.. A displacement-based finite element formulation for general polyhedra using harmonic shape functions. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 97, n. 1, p. 1-31, 2014. <https://doi.org/10.1002/nme.4562>.

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, p. 294-311, 2020.
<http://dx.doi.org/10.14393/rbcv72n2-50539>.

CERVERA, M.; LAFONTAINE, N.; ROSSI, R.; CHIUMENTI, M.. Explicit mixed strain–displacement finite elements for compressible and quasi-incompressible elasticity and plasticity. **Computational Mechanics**, v. 58, p. 511-532, 2016.
<https://doi.org/10.1007/s00466-016-1305-z>.

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. <https://doi.org/10.18227/rct.v6i0.6502>.

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

FARIA, A. W.. Contribuição a otimização multiobjetivo de radiers estacados modelados via elementos finitos. **Revista De Engenharia E Tecnologia**, v. 14, n. 4, p. 200-211, dez. 2022. disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/20752>. acesso em: 02 dez. 2023.

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

FREGONESE, L.; BARBIERI, G.; BIOLZI, L.; BOCCIARELLI, M.; FRIGERI, A.; TAFFURELLI, L.. Surveying and Monitoring for Vulnerability Assessment of an Ancient Building. **Sensors**, v. 13, n. 8, p. 9747-9773, 2013. <http://dx.doi.org/10.3390/s130809747>.

GEMIN, A. R. S.; MATOS, 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, p. 2054-2062, 2016. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv68n10-44301>.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R.. **Elementary Surveying An Introduction to Geomatics**, 14th. New York: Pearson Education, 2015. 936p.

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. <http://dx.doi.org/10.1080/00396265.2015.1097582>.

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2017.03.004>.

GUMUS, K.; SELBESOGLU, M. O.; CELIK, C. T.. Accuracy investigation of height obtained from Classical and Network RTK with ANOVA test. **Measurement**, v. 90, p. 135-143, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.045>.

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

HUGHES, T. J. R.; BAZILEVS, Y.; COTTRELL, J. A.. **Isogeometric analysis: toward integration of CAD and FEA**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

JERKE, A.; FAGGION, P. L.; CRUZ, W. Fatores que influenciam no monitoramento geodésico de barragens utilizando estação total. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 8, n. 1, p. 47-59, 2022. <http://dx.doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n1id25857>.

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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107951>.

LEICA. DNA03/DNA10 - Manual do usuário. Versão 1.2 – Português. 2004.

MALI, R.; PISE, U.. Modeling elastic properties of biocomposites using various analytical models and ANSYS material designer. **Materials Today: Proceedings**, v. 72, p. 1372-1378, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.334>.

MEDEIROS, L. Í. B. ; 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. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv72n2-52637>.

MILOCH, D. A. DE O.; FARIA, A. W.. Análise de sensibilidade dos parâmetros geotécnicos de um radier estaqueado modelado utilizando o método dos elementos finitos. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 13, n. 4, p. 97-108, dez. 2021.

MUSHTAQ, N.; COLELLA, G.; GAETANI, P.. Design and parametric analysis of a supersonic turbine for rotating detonation engine applications. **International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power**, v. 7, n. 1, p. 1, 2022. <https://doi.org/10.3390/ijtp7010001>.

NADAL, C. A.; FAGGION, P. L.; BRASIL, R. P.; HILLESHEIN, V.. Controle geodésico de trilhos industriais utilizando autocolimação óptica. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s.l.], v. 62, Edição Especial 1, p. 317-321, 2010. <https://doi.org/10.14393/rbcv62n0-43711>.

OGUNDARE, J. O.. **Precision surveying: the principles and geomatics practice**. New York: John Wiley & Sons, 2015.

OSTAPIV, F.; CORREA, G.; STAHLSCHEIDT, S.; OSTAPIV, G.. Simulação e avaliação experimental de estruturas geodésicas de bambu reforçadas com cabos. In: VIII ENSUS – Encontro de Sustentabilidade em Projeto, 2020, on-line. **Anais eletrônicos [...]**. Palhoça: UNISUL, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/229580/ENSUS_2020_paper_165.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 01 dez. 2023.

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, p. 57-63, 2013.

PELISSER, F.; SILVA, B. V.; MENDER, M. H.; FRASSON, B. J.; KELLER, T. A.; TORII, A. J.; LOPEZ, R. H.. Structural analysis of composite metakaolin-based geopolymer concrete. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 3, p. 535-543, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952018000300006>.

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, p. 167, 2022.. <http://dx.doi.org/10.3390/geosciences12040167>.

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**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul 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. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 1, p. 45-57, 2014. <https://doi.org/10.14393/rbcv66n1-43895>.

THOMPSON, M. K.; THOMPSON, J. M.. **ANSYS mechanical APDL for finite element analysis**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

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. <https://doi.org/10.1177/1045389X9600700203>.

ZONTA, C.; NADAL, C. A.; PRATA, J. G.. Monitoramento geodésico tridimensional em ensaios estruturais de madeira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 1, p. 84-99, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702014000100006>.

Recebido: 10 set. 2023

Aprovado: 09 jan. 2024

DOI: 10.3895/rbgeo.v12n2.17563

Como citar: MEDEIROS, L. Í. B.; FAGGION, P. L.. Análise da deformação de barra metálica por nivelamento geométrico e modelagem por elementos finitos. **R. Bras. Geom.**, Curitiba, v. 12, n. 2, p. 142-159, jul./dez. 2024. Disponível em: . Acesso em: XXX.

Correspondência:

Leandro Ítalo Barbosa de Medeiros
Avenida João XXIII, 3820. Apto 1104, Torre 02, CEP 64045-795, Teresina, Piauí, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

