CONSTRUÇÃO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM PÓRTICO DIDÁTICO INSTRUMENTADO PARA O ENSINO DE MECÂNICA VETORIAL

Autores: Victor Santos Pinheiro, Nicolly Rodovalho Costa, Marcelo Chagas.

Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Cachoeiro de Itapemirim, Rodovia ES-482, Fazenda Morro Grande, 29311-970 - Cachoeiro de Itapemirim - ES, Brasil, victorpinheiro584@gmail.com, nicollyrodovalho@gmail.com, marcelo.chagas@ifes.edu.br

Resumo

Este trabalho apresenta o projeto, a construção e a validação experimental de uma bancada didática em escala real voltada ao ensino de estática do ponto material e decomposição de forças na formação básica em mecânica. Concebido sob princípios de sustentabilidade a partir do reaproveitamento de uma estrutura em pórtico, o aparato foi instrumentado com dinamômetros digitais dotados de células de carga, roldanas e suportes móveis com ajuste angular na viga superior. O sistema viabiliza a reprodução física de problemas clássicos da literatura, transpondo diagramas bidimensionais para ensaios mecânicos sob carregamento estático. Foram avaliadas três configurações: tração direta uniaxial, decomposição simétrica em dois cabos e arranjo com tirante inclinado contraposto na horizontal. Os ensaios confrontaram os modelos analíticos de equilíbrio ($\sum F_x = 0$ e $\sum F_y = 0$) com os esforços trativos medidos. O equipamento consolidou-se como um recurso didático de baixo custo e alta robustez, favorecendo a compreensão prática, visual e quantitativa dos fenômenos vetoriais e das incertezas mecânicas reais.

Palavras-chave: Decomposição vetorial. Bancada didática. Ensino em mecânica. Validação experimental.

Área do Conhecimento: Engenharia Mecânica

Introdução

A Mecânica Vetorial constitui uma das bases formativas fundamentais nos cursos técnicos e de engenharia mecânica, fornecendo os princípios teóricos essenciais para a compreensão do comportamento estrutural de componentes e máquinas. Dentre seus tópicos basilares, o estudo da estática e da decomposição de forças no plano destaca-se por suportar a análise de sistemas em equilíbrio, dimensionamento de elementos mecânicos e estabilidade estrutural.

O equilíbrio estático de um corpo ou ponto material no plano bidimensional (xy) é governado pela Primeira Lei de Newton, a qual estabelece que um sistema permanece em repouso quando a resultante de todas as forças concorrentes que atuam sobre ele for nula:

$$\sum \vec{F} = \vec{0}$$

Em termos escalares cartesianos, essa condição vetorial desdobra-se no sistema de equações simultâneas fundamentais:

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \end{cases}$$

Para sistemas estendidos (corpos rígidos), a condição de equilíbrio estático exige também a anulação do momento resultante em relação a qualquer ponto arbitrário do plano:

$$\sum M_z = 0$$

Embora esses princípios sejam matematicamente bem consolidados na literatura clássica (MERIAM; KRAIGE; BOLTON, 2022; BEER et al., 2019), o processo de aprendizagem frequentemente esbarra na elevada abstração necessária para relacionar diagramas de corpo livre (DCL) bidimensionais com os esforços de tração e compressão reais atuantes em sistemas físicos.

A abordagem puramente analítica em sala de aula convencional tende a limitar a percepção espacial e a intuição física dos discentes em relação à influência direta dos ângulos de amarração na intensidade das tensões mecânicas geradas.

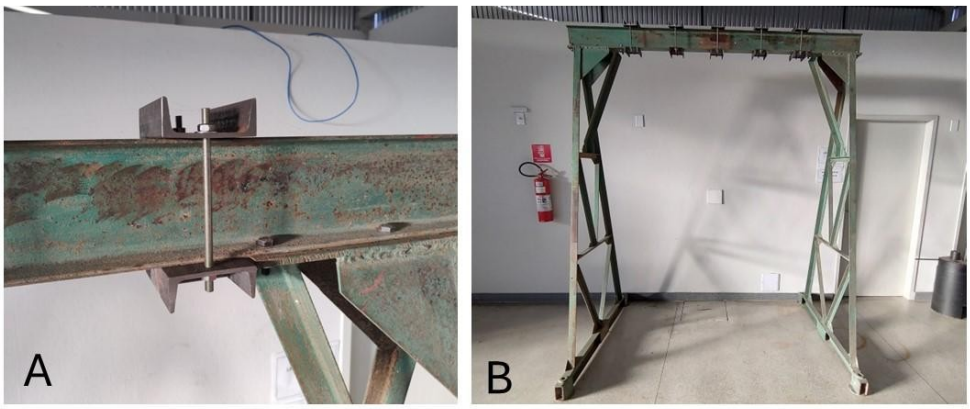
Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar o projeto, a construção e a validação experimental de uma estrutura em pórtico estrutural instrumentado com dinamômetros digitais, desenvolvida com materiais reaproveitados para o ensino de equilíbrio estático e decomposição vetorial nos cursos técnicos em mecânica.

Metodologia

O desenvolvimento baseou-se em princípios de sustentabilidade e engenharia reversa, utilizando como chassi principal uma estrutura metálica em pórtico pré-existente no Ifes Campus Cachoeiro de Itapemirim. A estrutura passou por processos de restauração superficial, alinhamento e reforço estrutural para garantir estabilidade e rigidez dimensional durante os ensaios estáticos sob carregamento.

Para possibilitar versatilidade na fixação e ajuste angular dos tirantes, foram confeccionados e instalados na viga superior do pórtico cinco conjuntos de suportes móveis equidistantes. Cada fixador foi fabricado a partir de dois segmentos de perfil "U" soldados a barras redondas transversais, travados por meio de barras roscadas de aço M10, arruelas de pressão e porcas sextavadas (Figura 1A). A visão geral da estrutura montada com os pontos de ancoragem superiores está ilustrada na Figura 1B.

Figura 1 - Estrutura base da bancada: (A) Detalhe construtivo do suporte móvel de fixação; (B) Pórtico estrutural restaurado.



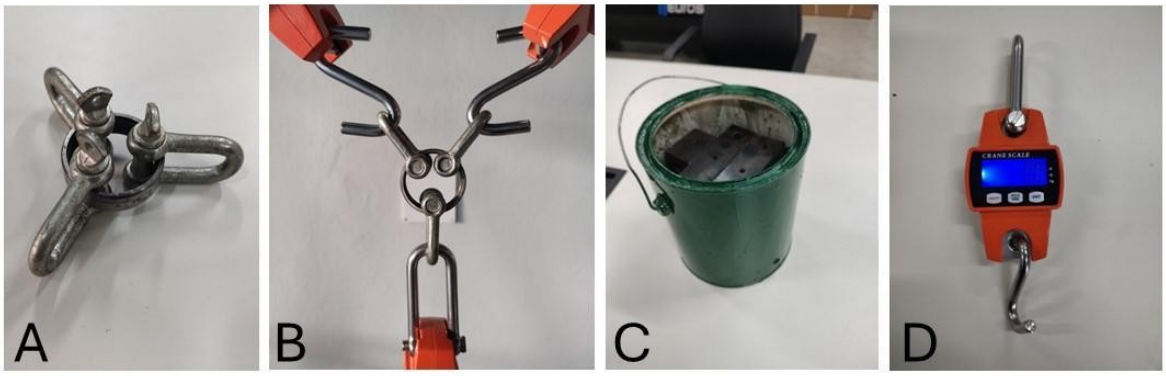
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Nos pontos de ancoragem da viga, foram acoplados conectores metálicos do tipo mosquetão e roldanas de polímero com $\phi = 20\ \mathrm{mm}$, permitindo o direcionamento dos cabos com baixo atrito residual. Como sistema auxiliar de içamento e tensionamento, foi acoplada uma talha manual de corrente com capacidade nominal de $1\ \mathrm{t}$ ($9,8\ \mathrm{kN}$).

Para materializar o conceito físico de partícula concorrente (ponto material bidimensional), desenvolveu-se um nó central composto por um anel usinado em aço estrutural associado a três manilhas forjadas com pino roscado (Figura 2A e 2B). A carga padrão aplicada ao sistema consistiu em um lastro metálico aferido com peso de aproximadamente $100\ \mathrm{N}$ (massa correspondente a $\approx 10,2\ \mathrm{kg}$).

A instrumentação do aparato contou com dinamômetros digitais do tipo gancho, dotados de células de carga com capacidade nominal de até $3000\ \mathrm{N}$ e resolução de $0,1\ \mathrm{N}$ (Figura 2D), responsáveis pelo registro em tempo real das forças de tração geradas em cada ramo do sistema. Os cabos de sustentação empregados foram cordas trançadas de poliamida com diâmetro nominal de $10\ \mathrm{mm}$, caracterizadas por elevada resistência à tração e baixa extensibilidade elástica nas faixas de trabalho utilizadas.

Figura 2 - Elementos usados na aplicação de carga: (A) Anel central com manilhas; (B) Montagem do nó; (C) Peso; (D) Dinamômetro digital com célula de carga.



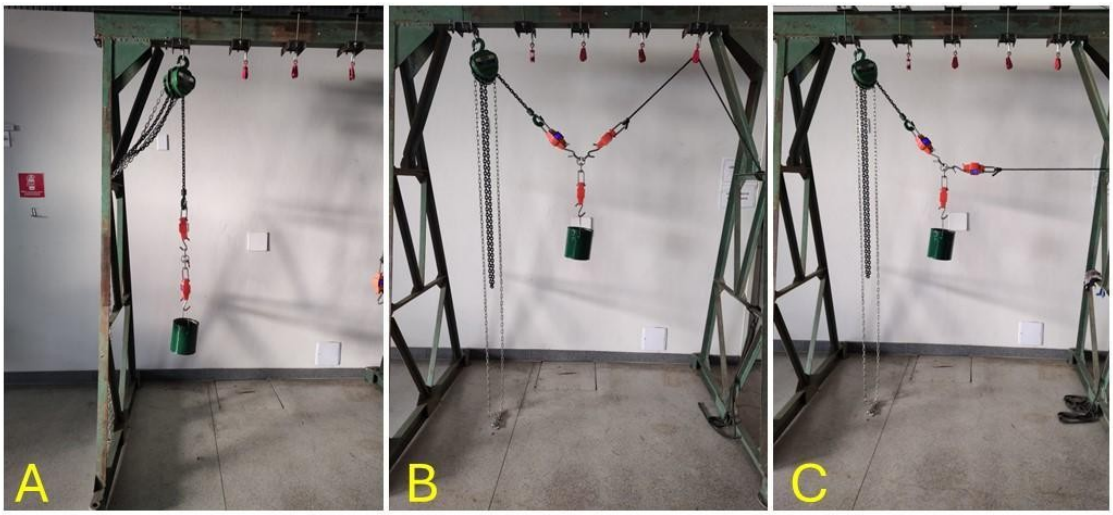
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A determinação da geometria de cada montagem foi realizada por meio de medições diretas de distâncias e ângulos com o auxílio de trena milimétrica e goniômetro mecânico. A partir desses parâmetros espaciais e do monitoramento contínuo dos dinamômetros digitais, estruturou-se o protocolo experimental para reproduzir fisicamente configurações clássicas da literatura de mecânica vetorial, permitindo confrontar os modelos matemáticos teóricos de equilíbrio estático com os esforços de tração medidos em condições reais de operação.

Resultados

A bancada didática desenvolvida demonstrou versatilidade na reprodução de problemas clássicos de estática do ponto material encontrados na literatura de engenharia, transpondo os diagramas de corpo livre bidimensionais para ensaios físicos em escala real. Foram avaliadas três configurações estáticas padrão, representadas na Figura 3. A Figura 3A ilustra o ensaio de tração direta uniaxial, no qual uma única linha vertical sustenta o lastro, comprovando o equilíbrio estático vertical e a equivalência direta entre peso e tração. Na Figura 3B, apresenta-se a configuração simétrica em "Y", caracterizada pela bifurcação do cabo principal em dois tirantes sob o mesmo ângulo de inclinação em relação à vertical (θ). Por sua vez, a Figura 3C representa o arranjo assimétrico com tirante inclinado em um ângulo α contraposto por um tirante tracionado na horizontal, situação frequentemente encontrada em projetos de içamento e estruturas estaiadas.

Figura 3 - Ensaios experimentais montados no pórtico: (A) Tração direta uniaxial; (B) Decomposição simétrica em dois cabos; (C) Decomposição ortogonal e inclinada.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Com base nas leituras geométricas (ângulos medidos com goniômetro) e no peso aferido do lastro ($P = 100$ N), calcularam-se analiticamente as forças teóricas, a partir das equações fundamentais de equilíbrio ($\sum F_x = 0$ e $\sum F_y = 0$). A Tabela 1 sintetiza a modelagem matemática aplicada a cada caso, os equacionamentos esperados e suas devidas condições físicas propostas para análise.

Tabela 1 - Modelagem analítica das configurações experimentais reproduzidas na bancada.

Ensaio	Condição Fisíca	Parâmetros Geométricos	Equacionamento Analítico
Caso (A)	Cabo vertical uniaxial	$\theta = 0^\circ$	$T = P$
Caso (B)	Dois cabos com carga centrada	$\theta = 30^\circ$	$T = \frac{P}{2\cos(\theta)}$
Caso (C)	Cabo inclinado e cabo horizontal	$\alpha = 45^\circ$	$T_1 = \frac{P}{\sin(\alpha)}$ $T_2 = \frac{P}{\tan(\alpha)}$

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Durante a operação do aparato, a leitura contínua dos dinamômetros digitais permitiu validar as relações trigonométricas descritas na modelagem teórica. Observou-se diretamente a amplificação e a redistribuição das forças de tração nos cabos em função da variação angular imposta, evidenciando aos discentes a importância prática do dimensionamento adequado de tirantes e amarrações. Pequenas discrepâncias observadas nas leituras devem-se ao peso próprio dos elementos de fixação (manilhas e nós em aço) e ao atrito residual nas roldanas de polímero, fatores que enriquecem a contextualização prática frente às hipóteses de cabos e polias ideais adotadas na literatura teórica.

Discussão

A transição dos modelos matemáticos abstratos de mecânica vetorial para ensaios experimentais em escala real evidencia fenômenos físicos que frequentemente são desconsiderados nas simplificações da literatura teórica. Enquanto formulações clássicas de estática do ponto material assumem hipóteses ideais (tais como polias perfeitamente lisas (sem atrito), cabos inextensíveis e nós centrais sem massa), o aparato desenvolvido insere os discentes em um cenário de engenharia real, no qual atritos estáticos nos mancais das roldanas e o peso próprio dos conectores metálicos e manilhas influenciam diretamente a leitura dos sensores.

Essa confrontação prática permite discutir e quantificar fontes de incerteza experimental inerentes aos sistemas mecânicos. Como destacado por Ribeiro (2015), o ensino de mecânica vetorial se beneficia substancialmente de abordagens que complementem o cálculo tradicional com recursos visuais e aplicados. Contudo, a bancada física em escala didática supera os limites das simulações computacionais ao possibilitar a percepção tátil da magnitude dos esforços trativos, permitindo aos estudantes correlacionar a variação dos ângulos de ancoragem diretamente com o aumento exponencial da tensão mecânica nos tirantes.

A flexibilidade geométrica oferecida pelos suportes móveis na viga superior viabiliza a emulação de diferentes condições de içamento de cargas, amarrações industriais e estruturas estaiadas. Esse fator estreita a conexão entre os tópicos introdutórios de estática e as disciplinas aplicadas subsequentes do curso técnico em mecânica, como Elementos de Máquinas, Resistência dos Materiais e Segurança na Movimentação de Cargas.

Dessa forma, o equipamento consolida-se como um recurso didático robusto e de baixo custo, viabilizado pelo reaproveitamento de materiais estruturais, demonstrando que soluções tecnológicas acessíveis podem proporcionar elevado rigor metrológico e pedagógico no ambiente laboratorial.

Conclusão

O desenvolvimento da bancada didática para ensaios de estática e decomposição vetorial mostrou-se plenamente viável, destacando-se pela sustentabilidade e pelo baixo custo decorrentes do reaproveitamento de componentes estruturais. A instrumentação com dinamômetros digitais e a concepção dos suportes móveis conferiram ao aparato robustez mecânica, precisão nas leituras e versatilidade para reproduzir diferentes arranjos de içamento e sistemas de forças no plano.

A bancada preenche uma lacuna importante no ensino técnico em mecânica, permitindo aos discentes transpor os diagramas de corpo livre bidimensionais da literatura para ensaios físicos em escala real. A confrontação direta entre o equacionamento analítico e os dados experimentais proporciona uma compreensão aprofundada da influência angular nos esforços de tração, além de contextualizar a atuação de atritos residuais e massas próprias presentes em sistemas mecânicos reais.

Como trabalhos futuros, prevê-se a integração de células de carga conectadas a sistemas de aquisição automatizada de dados via microcontroladores, bem como a avaliação do impacto pedagógico do aparato na retenção conceitual dos estudantes ao longo das disciplinas aplicadas de mecânica.

Referências

BACICH, L.; MORAN, J. **Metodologias ativas para uma educação inovadora: uma abordagem teórico-prática.** Porto Alegre: Penso, 2018.

BEER, F. P. *et al*. **Mecânica vetorial para engenheiros: estática**. 11. ed. Porto Alegre: AMGH/McGraw-Hill, 2019.

MERIAM, J. L.; KRAIGE, L. G.; BOLTON, J. N. **Mecânica para engenharia: estática**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

RIBEIRO, B. N. M. Propostas computacionais para o ensino de mecânica vetorial: materiais potencialmente significativos. **Episteme Transversalis**, v. 8, n. 1, p. 1-15, 2015.

Agradecimentos

Este trabalho contou com financiamento da Fapes - Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo, através do Edital Fapes Nº 28/2022 - Universal.