

CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE BAIXO CUSTO PARA O ENSAIO DE UMA VIGA ENGASTADA

Thiago Victor do Nascimento¹, Raimundo Gomes de Amorim Neto²

Resumo: As vigas são os elementos estruturais importantes no âmbito da construção civil, são submetidas a receberem cargas verticalmente tendo uma boa resistência e flexibilidade, também com uma ampla variação de modelos. Assim, este trabalho se propôs ao desenvolvimento de um sistema de ensaio simples para ensino didático de estruturas por meio da análise de uma viga engastada, utilizando materiais com baixo custo desde a sua concepção e utilizando um *smartphone* como um instrumento de coleta a transmissão de deformações, para calcular o módulo de elasticidade. O experimento teve adição de cargas pontuais na extremidade de uma viga de PVC com dois vãos diferentes tendo o protótipo como o engaste do material. Os resultados obtidos foram relevantes, visto que, os quatro dados do módulo de elasticidade encontrados são bem próximos e mantiveram-se no intervalo sugerido. Os dados obtidos mostraram a potencialidade do equipamento e sua possível utilização e replicabilidade.

Palavras chave: Ensino de estruturas; Protótipo; Viga engastada.

1. INTRODUÇÃO

A engenharia civil é uma área fundamental para o desenvolvimento das sociedades, sendo responsável pelo planejamento, construção e manutenção de obras que impactam diretamente o cotidiano, dentro dessa área importante destaque se dá a engenharia de estruturas, que se dedica ao estudo e aplicação dos princípios físicos e matemáticos que garantem a estabilidade, segurança e durabilidade das construções. Um elemento estrutural de extrema relevância nessa subárea são as vigas [1].

A importância das vigas reside na sua capacidade de oferecer resistência e flexibilidade, garantindo que as estruturas possam suportar tanto o peso próprio quanto as cargas adicionais, como móveis, pessoas e intempéries. O correto dimensionamento e escolha do material das vigas, que podem ser de concreto, aço ou madeira, são cruciais para assegurar a segurança e eficiência das construções [2].

A realização de ensaios de vigas envolve em geral a necessidade de uma grande quantidade de equipamentos e programas de computador para analisar os dados, e uma infraestrutura de alto custo, que por vezes pode ser proibitiva para pequenos centros de pesquisa e de ensino, neste horizonte a construção de modelos que ainda que sejam mais simples, mas que possam ser facilmente replicados, pode contribuir de forma ágil no estudo das peças aqui estudadas [3].

Neste sentido este trabalho se propõe a apresentar uma metodologia prática, replicável e de baixo custo para o projeto, construção, análise e implementação de um instrumento didático, com o fim de analisar alguns parâmetros relativos ao estudo de uma viga em ambiente acadêmico. A premissa fundamental foi a construção desde a fase inicial e passando por uma série de ensaios para validar a possibilidade de ensino didático de estruturas do equipamento desenvolvido, bem como a sugestão de melhorias e adaptações para modelos futuros de aplicações de ensaios.

2. DESENVOLVIMENTO

A mecânica dos materiais analisa o comportamento das estruturas quando submetidas a cargas, envolvendo a determinação das tensões e deformações [1]. Nesse contexto, o presente trabalho busca contribuir para o ensino de estruturas, abordando o conceito de vigas e suas reações de apoio, com foco principal na viga engastada em uma extremidade e livre na outra.

2.1. Vigas

Viga é um elemento estrutural linearmente horizontal submetido a cargas verticais, de modo que se obtém momento fletor, esforço cortante e, possivelmente, esforço normal. Apesar de não ser comum, pode ser exigida horizontalmente. As vigas são bastante usadas na construção civil, como em viadutos, pontes e em outros componentes estruturais, onde recebem cargas verticalmente [4].

Elas têm conexões básicas com outros componentes, tendo como exemplo a viga de ponte, além disso, é um

elemento estrutural, mesmo que esteja rigidamente conectado a outros componentes, para avaliar o desempenho estabelecido ao longo de um eixo. É normal a análise ser de forma isolada nas vigas de edifícios, pois estão conectadas a pilares e a outros elementos [2].

2.1.1. Tipos de vigas

As vigas se caracterizam em relação aos apoios, ou seja, a quantidade de equação irá determinar seu estado de equilíbrio estático, no qual será isostático, hipostático ou hiperestático, sendo considerados equilíbrio estaticamente indeterminadas as estruturas de vigas com número de equações maior do que incógnitas [5]. Segundo [1], as vigas mais utilizadas são a biapoiada ou chamada de simplesmente apoiada, em balanço, a biengastada ou engastada, a biapoiada com balanço e as contínuas. Denomina-se o vão de uma viga a distância entre dois apoios seguidos. Na Figura 1 e Figura 2 mostra alguns tipos de vigas e seu estado de equilíbrio.

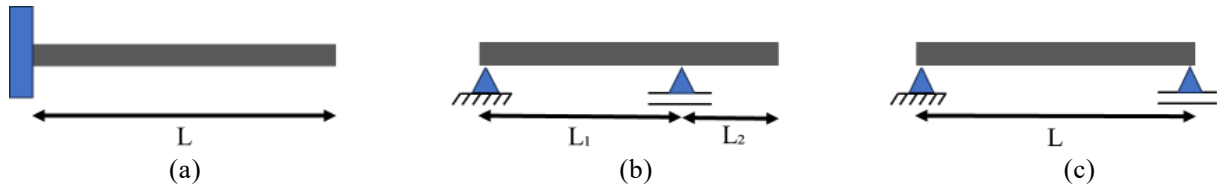


Figura 1. Vigas estaticamente determinadas: engastada (a), biapoiada com balanço (b), biapoiada (c). Adaptada de [5]

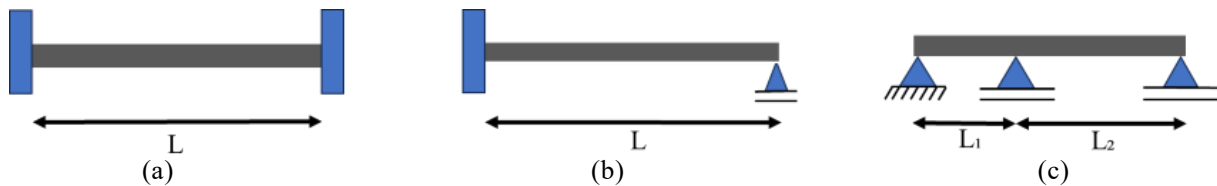


Figura 2. Vigas estaticamente indeterminadas: viga biengastada (a), viga engastada numa extremidade e apoiada na outra (b) e viga contínua (c). Adaptada de [3]

2.2. Inclinação e Deflexão de vigas

É muito importante analisar o estudo das deflexões, principalmente nos projetos estruturais, ou seja, em estruturas estaticamente indeterminadas é fundamental haver essa verificação. A deflexão é o deslocamento vertical que a viga sofre quando recebe uma aplicação de carga, como mostra a Figura 3b, levando em consideração o plano cartesiano xy , onde x é o eixo das abscissas e y eixo das ordenadas, a deflexão para cima no eixo y é positiva e negativa para baixo [5].

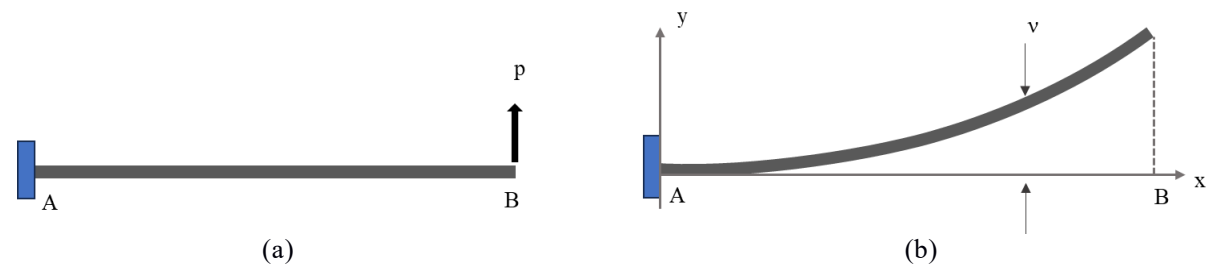


Figura 3. Viga engastada com carga pontual ascendente na extremidade (a) e Curva de deflexão de uma viga engastada (b). Adaptada de [5]

Para obter as deflexões de vigas na maior parte dos casos recorre às equações diferenciais da curva de deflexão e suas associações. Para adquirir a equação da curva de deflexão é preciso destacar a deflexão v sendo uma função da coordenada x . Detalhando a curva de deflexão na Figura 4, onde distância x tem origem em A e vai até o ponto m_1 , onde se encontra a deflexão v . A deflexão no segundo ponto m_2 ($x + dx$) representada por $v + dv$ é o desenvolvimento da deflexão ao longo da curva a partir de m_1 até m_2 , conforme à medida que nos movemos [5].

Devido à aplicação de cargas, a viga apresenta deflexão e também rotação em todos os pontos ao longo do eixo, com isso, surge o ângulo de rotação θ , que está entre o eixo x e a tangente da curva de deflexão, próximo ao ponto m_1 como mostra a Figura 4b. Foi considerado os eixos x para direita e y para cima positivos, o ângulo de rotação positivo no sentido anti-horário. No ponto m_2 o ângulo de rotação ($\theta + d\theta$) tem o acréscimo de $d\theta$, em relação ao primeiro. O $d\theta$ é o quanto o ângulo aumenta de acordo com o deslocamento de m_1 para m_2 . Se forem feitas várias linhas normais às tangentes, o $d\theta$ será o ângulo entre elas, e suas interseções num ponto vai ser o centro de curvatura O' e a distância da curva até O' é o raio de curvatura ρ [5].

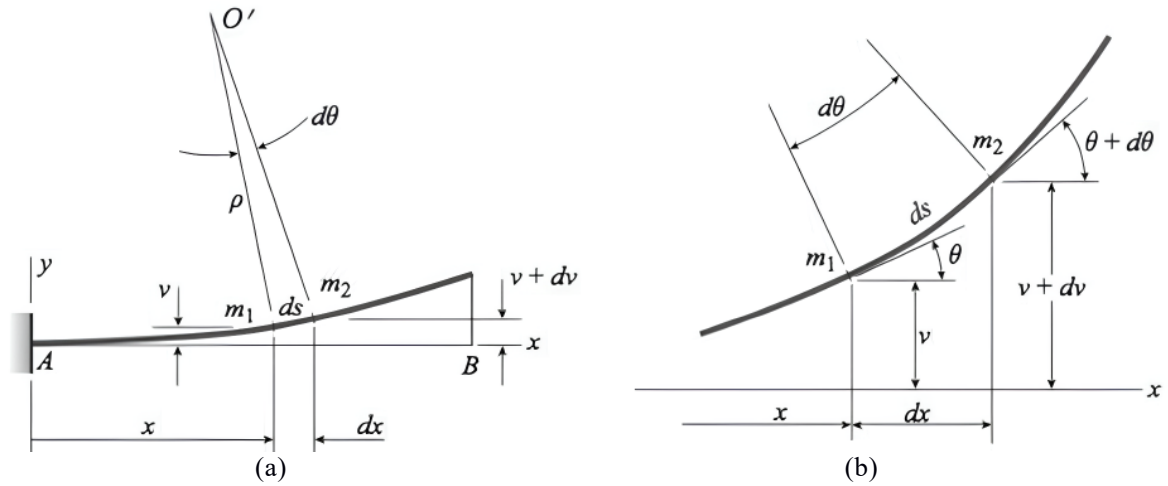


Figura 4. Curva de deflexão de uma viga engastada, para obtenção da sua equação diferencial (a), curva ampliada para uma melhor visualização (b). [5]

2.2.1. Vigas com pequenos ângulos de rotação

De acordo com [5], todas as estruturas sofrem pequenas variações quando são solicitadas, por serem muito pequenas, as variações passam a ser despercebidas visualmente, por isso, as curvas de deflexão de várias vigas e colunas possui ângulos de rotação muito pequenos, além da deflexão e curvatura seguirem a mesma aparência. Nesse caso, pode-se fazer aproximações matemáticas que facilitam quando se vai fazer o estudo de vigas. Quando o ângulo de rotação é um valor pequeno o ds ao longo da curva de deflexão é aproximadamente uma reta, igual o dx no eixo x , nesse caso, $ds \approx dx$. Essa aproximação torna a curvatura κ na Equação (1):

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{dx} \quad (1)$$

Como o ângulo de rotação é pequeno, torna-se a aproximação $\theta \approx \tan\theta$, como pode ser vista na Equação (2):

$$\theta \approx \tan\theta = \frac{dv}{dx} \quad (2)$$

Assim, pode-se expressar que a inclinação dv/dx e o ângulo de rotação θ em radianos são iguais. Colocando a derivada de θ em relação à x na equação (2), adquire-se a Equação (3).

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{d^2v}{dx^2} \quad (3)$$

Essa nova equação é válida para uma viga de qualquer material e que os ângulos de rotação sejam pequenos. Se o material da viga for elástico linear e seguir a lei de Hooke, a curvatura terá a Equação (4) como solução. Onde M é o momento fletor e EI é a rigidez à flexão da viga.

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (4)$$

Igualando a Equação (3) com a Equação (4), elabora-se a equação da linha elástica, que pode ser visualizada na Equação (5).

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (5)$$

2.2.2. Módulo de elasticidade

O Módulo de elasticidade ou módulo de *Young* é uma propriedade mecânica que demonstra a rigidez de um material, ou seja, é a capacidade que o material tende a se deformar temporariamente quando sofre uma aplicação de carga. Quanto mais rígido for o elemento maior será o E , um exemplo, é o aço que tem $E = 200$ GPa. No entanto, vale ressaltar que o E só irá ser utilizado se o material for linearmente elástico. Da mesma forma, se a tensão no

material exceder seu limite de proporcionalidade, o diagrama tensão-deformação acaba não sendo uma reta, e a Equação 6 fica inválida [4], na Figura 5 ilustra o diagrama de tensão-deformação.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (6)$$

Sendo, σ a tensão normal, E o módulo de elasticidade e ε deformação longitudinal.

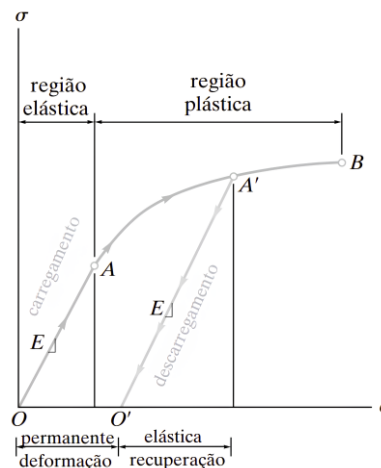


Figura 5. Diagrama de tensão-deformação. [2]

2.3. Importância de equipamentos em laboratório de ensino

Nas disciplinas estruturais de ensino é visto na teoria as deformações que um elemento estrutural sofre quando submetido a cargas. Existem equipamentos que possibilitam a observação direta de fenômenos estruturais, como flexão, torção, flambagem e tensões em elementos estruturais como vigas, treliças e pilares. A obtenção desses equipamentos tem-se um custo elevado, por ser tecnológica e ter uma grande precisão na coleta de dados.

O protótipo desenvolvido auxilia nos ensaios em laboratório para mostrar na prática como uma viga engastada se deforma e sua deflexão quando é aplicado uma carga pontual na extremidade livre. A viga utilizada é feita de material de PVC, sendo aplicadas cargas de areia e a coleta de dados através do aplicativo *phyphox* com auxílio de um *smartphone*. O protótipo obteve um baixo custo e simplicidade na sua construção, mostrando na prática o comportamento de uma viga engastada. Nesse contexto a utilização do protótipo em laboratório de ensino é viável para que os professores façam a aplicação mostrando o comportamento de vigas que tenham uma flexibilidade notável, ou seja, o material não pode ser rígido.

3. METODOLOGIA

3.1. Construção do protótipo

Para a realização da construção do protótipo foram elaboradas as seguintes etapas, como mostra a Figura 7.

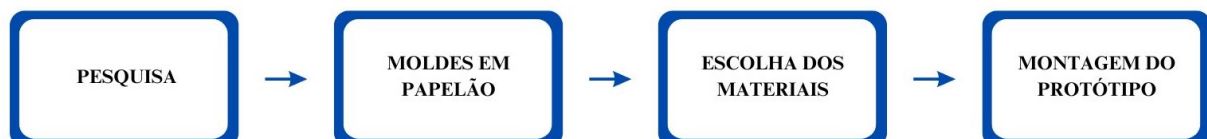


Figura 7. Etapas da construção do protótipo. (Autoria própria, 2025)

3.1.1. Pesquisa

Para idealização do protótipo foram pesquisados alguns modelos mecânicos que tivessem como função engastar peças. O equipamento que serviu de base para dar início ao projeto de construção foi uma morsa, que é um equipamento bastante utilizado em oficinas mecânicas, porém, durante a pesquisa pode-se comprovar que sua utilização não era viável, pois no engaste é preciso ter fixação em três direções, já a morsa tem fixação apenas em duas direções.

3.1.2. Moldes em papelão

Foi idealizado um modelo mecânico com papelão, a fim de se obter um melhor molde de engaste para a análise do experimento, como mostra a Figura 8. Esse método foi importante na construção do protótipo, no qual, tornou-se possível uma utilização viável e prático. Além disso, com uma boa resistência e durabilidade.



Figura 8. Molde do engaste feito com papelão. (Autoria própria, 2025)

3.1.3. Escolha dos materiais

Para a escolha dos materiais, foram consideradas suas características, como resistência, durabilidade e custo, uma vez que o produto final deveria ter um baixo valor de fabricação. Na Tabela 1 é mostrado todos os materiais utilizados para a confecção do protótipo.

Tabela 1. Materiais utilizados na construção do protótipo. (Autoria própria, 2025)

Materiais	Quantidade	Preço (R\$)
Chapa de aço 30x20 cm	1	50,00
Parafuso sextavado rosca inteira	2	4,00
Arruela lisa	1	0,15
Eletrodos	6	6,00
Bucha reforçada 10 mm	4	1,40
Parafuso sextavado rosca soberba	4	4,00

3.1.4. Montagem do protótipo

Com as chapas de aço cortadas conforme o modelo de papelão, iniciou-se o processo de soldagem do molde. Conforme o protótipo foi sendo construído foi passando por melhoramento para obter-se um engaste que atendesse aos requisitos necessários para a realização do experimento. Ao término da soldagem foram feitos alguns furos para a fixação do protótipo em uma superfície e também para regular o engaste na viga, usando parafusos borboleta. Na Figura 9 mostra a parte do processamento até a finalização do protótipo.



Figura 9. Construção do protótipo, processo de moldagem (a), finalização do equipamento (b). (Autoria própria, 2025)

3.2. Phyphox

O *Phyphox*, *physical phone experiments*, é um aplicativo desenvolvido no 2º Instituto de Física da Universidade RWTH Aachen, na Alemanha, disponível na versão gratuita para *smartphones* Android e iOS. Tem como principal objetivo utilizar os sensores do *smartphone* para realizar alguns experimentos. Apesar de uma ampla variedade de experimentos que podem ser realizados, depende de cada modelo, pois alguns celulares podem não possuir os sensores necessários [6], na Figura 6 mostra todos os sensores disponíveis no aplicativo.

No aplicativo, dispõe a opção de acesso remoto, que se propõe a outros dispositivos conectados na mesma rede *WI-FI* controlar remotamente o experimento que está sendo realizado no *smartphone*. Após a experimentação é possível coletar todos os dados resultantes e exportá-los em planilhas eletrônicas, onde o tratamento de dados pode ser realizado pela *Microsoft Excel*® [6].



Figura 6. Telas iniciais do aplicativo, com as opções de experimentos que podem ser realizados, seguindo a ordem de (a), (b) e (c). (Autoria própria, 2025)

3.2.1. Estudo e escolha do sensor para realizar o experimento

Por oferecer uma ampla variedade de experimentos que podem ser realizados através dos sensores do celular, o *phyphox* foi bem compreendido ao ser analisado. O presente trabalho analisa uma viga engastada com a extremidade livre, que ao ser submetida a cargas, cria-se um ângulo de rotação. Observou-se que o aplicativo possui uma funcionalidade de medição de inclinação, permitindo a determinação de angulações a cada movimento do celular, por esse motivo o sensor de inclinação foi utilizado para encontrar os ângulos de rotação na viga quando submetida a cargas. Além disso, todos os dados coletados podem ser exportados em vários formatos, inclusive em Excel®.

3.3. Realização do experimento

O experimento foi realizado no laboratório de materiais de construção da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - Campus Mossoró, no qual o equipamento foi instalado. Antes de começar o experimento foi colocado um gancho com rosca na ponta da viga de PVC (Policloreto de Vinila), posteriormente resina epoxi em todo o espaço ao redor do eixo do gancho para evitar deslizamento quando aplicar-se as cargas e com fita dupla face colou-se a capa do celular na ponta do material.

A coleta de dados ocorreu em duas etapas, na qual, a primeira teve uma viga engastada com 1 metro de comprimento e as cargas utilizadas foram areia com três amostra de 1 kg cada. Foi acoplado o celular na ponta da viga e compartilhou-se o acesso remoto dos dados com o notebook para obter uma melhor visualização. Com tudo ajustado deu início ao experimento usando primeiramente o peso do celular que foi considerado o ponto inicial, após o tempo de 100s que foi o tempo usado em todos adicionamentos de cargas, foi adicionado 1 kg do conjunto balde/areia, ao passar o tempo foi acrescentado mais 1 kg, quando foi adicionando a última carga, percebeu-se que a viga encostou na superfície onde o protótipo estava acoplado, por esse motivo a última carga foi descartada da análise.

Por fim foi retirada a carga total de areia e iniciado novamente o aplicativo com intuito de analisar se o ângulo era o mesmo do início, percebeu-se que o ângulo tinha aumentado. Nesse caso, houve deslizamento do protótipo ou do elemento estrutural.

Na segunda etapa alterou comprimento da viga para 1,5 metros e foram separadas quatro cargas de areia de 0,5 kg cada. O procedimento desse percurso foi idêntico ao primeiro, mudando apenas o peso adicionado. Ao adicionar a terceira carga notou-se que o balde com as primeiras cargas encostou-se no piso, por isso, foi considerado para o experimento apenas os dois primeiros pesos. O experimento descrito pode ser visto na Figura 10.



Figura 10. Realização do experimento, preparação dos utensílios (a), experimento sendo realizado (b). (Autoria própria, 2025)

3.4. Dedução da fórmula para encontrar o módulo de elasticidade (E)

Para caso de uma viga engastada com extremidade livre, tendo uma carga pontual nessa extremidade, pelo equilíbrio das forças verticais e momentos é possível encontrar as reações de apoio para essa estrutura, como mostra a Figura 11.

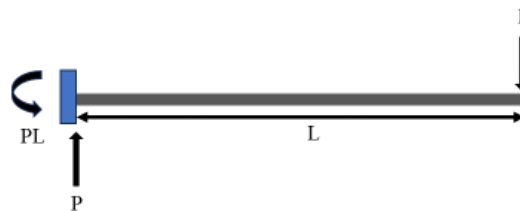


Figura 11. Viga com suas reações de apoio. (Autoria própria, 2025)

Inserindo uma seção na viga variando de 0 a L para obter-se o momento gerado pelos esforços, tem-se a Figura 12.

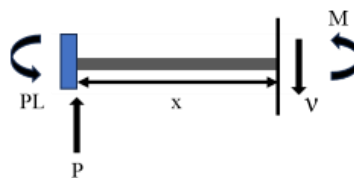


Figura 12. Seção ao longo da viga. (Autoria própria, 2025)

Fazendo a somatória de momentos, tem-se as Equações de (7) a (9).

$$\sum M_z = 0 \quad (7)$$

$$PL + M - Px = 0 \quad (8)$$

$$M = P \cdot x - PL \quad (9)$$

Substituindo a Equação (9) na Equação (5), tem-se:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{P \cdot x - PL}{EI} \quad (10)$$

Isolando o EI na Equação (10) e aplicando o método de integração a partir da Equação (11), obtém-se as Equações (12) e (13).

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = P \cdot x - PL \quad (11)$$

$$EI \frac{dv}{dx} = \frac{Px^2}{2} - PLx + C_1 \quad (12)$$

$$EI \cdot v = \frac{Px^3}{6} - \frac{PLx^2}{2} + C_1x + C_2 \quad (13)$$

Foi utilizado as condições de contorno $dv/dx = 0$ e $v = 0$ para $x = 0$, com isso, foi obtido os seguintes valores para as constantes de integração: $C_1 = 0$ e $C_2 = 0$.

Como a derivada da deflexão em relação a x é igual ao ângulo formado, foi usada a notação θ no lugar de dv/dx . Substituindo o valor da constante de integração C_1 na Equação (12), obtém-se a Equação (14).

$$EI \cdot \theta = \frac{Px^2}{2} - PLx \quad (14)$$

Como o trabalho estuda uma viga com carga pontual na sua extremidade, logo, para se obter a equação geral da rotação para esse caso, basta substituir a constante x por L . A partir da Equação (15) até a Equação (18) tem-se a equação geral da rotação.

$$EI \cdot \theta = \frac{PL^2}{2} - PL \cdot L \quad (15)$$

$$EI \cdot \theta = \frac{PL^2}{2} - PL^2 \quad (16)$$

$$EI \cdot \theta = -\frac{PL^2}{2} \quad (17)$$

$$E = -\frac{PL^2}{2 \cdot \theta \cdot I} \quad (18)$$

Na Equação (18) a incógnita E foi isolada tendo assim, a equação para obter-se o módulo de elasticidade do material a ser estudado.

3.5. Obtenção do momento de Inércia

A viga utilizada para o experimento trata-se de uma barra prismática de PVC vazada com dupla simetrias. Para se obter o momento de inércia, nesse caso, é preciso sectionar a seção transversal como mostra a Figura 13.

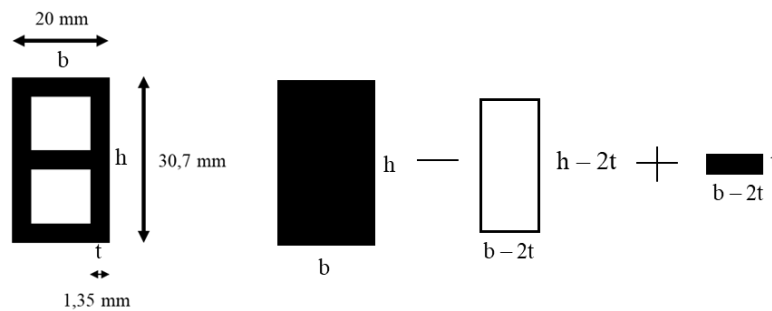


Figura 13. Dimensões sectionadas da seção transversal. (Autoria própria, 2025)

Para calcular o momento de inércia do modelo da viga estudada utiliza-se a Equação (19).

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} - \frac{(b - 2t) \cdot (h - 2t)^3}{12} + \frac{(b - 2t) \cdot t^3}{12} \quad (19)$$

A Equação (19) é válida para toda seção transversal retangular vazada com dupla simetria, caso a seção seja retangular maciça utiliza-se apenas $b \cdot h^3/12$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os dados coletados pode-se fazer um gráfico com intuito de mostrar o comportamento das vigas durante a aplicação de cargas nas duas etapas, tendo assim, uma melhor visualização de como o aplicativo coletou todos os ângulos em graus com passar do tempo, como ilustrado nas Figuras 14.

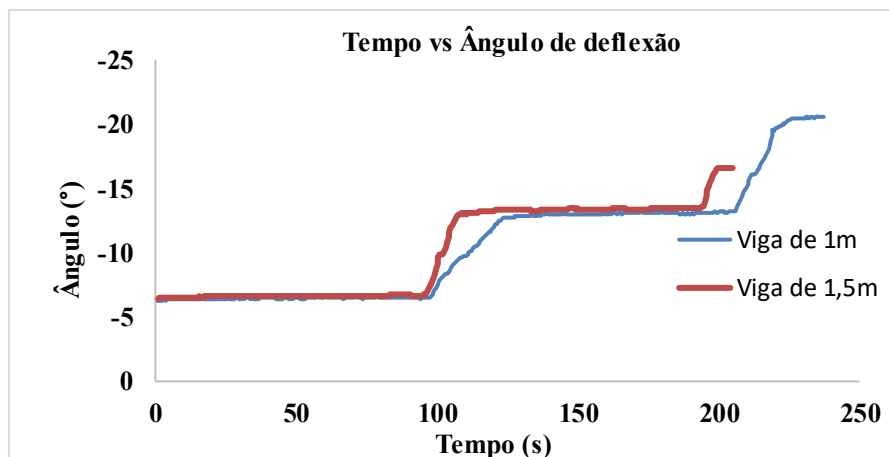


Figura 14. Gráfico do tempo versus ângulo de deflexão para as duas vigas. (Autoria própria, 2025)

Para análise de resultados foi obtido uma média aritmética dos ângulos de cada carga adicionada nas duas etapas no intervalo de 100s. Posteriormente foi calculado o momento de inércia substituindo as cotas da seção transversal na Equação (19). Com todos dados necessários para calcular o módulo de elasticidade, iniciou-se o cálculo usando a Equação (18), colocando o valor de θ em radianos. As Tabelas 2 e 3 mostram todos os dados obtidos na primeira e segunda etapa respectivamente. O resultado final obtido pela Equação (18) tem-se a unidade em kgf/m^2 , nesse caso, foi convertido em GPa.

Tabela 2. Dados para viga com 1 metro. (Autoria própria, 2025)

Peso (kgf)	Comprimento (m)	Ângulo de deflexão (°)	Momento de inércia (m^4)	Módulo de Elasticidade (GPa)
1,00	1,00	-6,46	$1,66\text{e-}08$	2,63
2,00	1,00	-13,02	$1,66\text{e-}08$	2,60

Tabela 3. Dados para viga com 1,5 metros. (Autoria própria, 2025)

Peso (kgf)	Comprimento (m)	Ângulo de deflexão (°)	Momento de inércia (m^4)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0,50	1,50	-6,62	$1,66\text{e-}08$	2,88
1,00	1,50	-12,86	$1,66\text{e-}08$	2,96

Com os módulos de elasticidade encontrados, houve uma análise primeiramente por cada etapa e depois entre todos os módulos encontrados pela Equação (18) com o material de PVC em geral. Os resultados obtidos na primeira e segunda etapa apresentaram valores aproximados da teoria. De acordo com [7] o módulo de elasticidade do PVC varia entre 2,4 - 4,14 GPa, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Características do PVC. (7)

Material	Módulo de elasticidade		Coeficiente de Poisson
	GPa	10 ⁶ psi	
Polímeros			
PVC (Cloreto de polivinila):	2,41-4,14	0,35-0,60	0,38

Nesse caso, foi comparado os módulos de elasticidades encontrados no trabalho com o da Tabela 4, pode-se notar que os resultados encontrados com auxílio do protótipo e *smartphone* foram promissores, já que estão no

intervalo sugerido por um fabricante.

5. CONCLUSÃO

O protótipo desenvolvido teve uma utilização notável, mostrou ter uma boa fixação e resistência quando submetido aos esforços de flexão para pequenas cargas e correspondeu muito bem as expectativas que foram propostas, uma vez que os resultados do módulo de elasticidade obtidos apresentaram semelhanças com os parâmetros reais do material. Além disso, apresentou ser um equipamento simples na sua construção, didático e com uma análise promissora dos dados obtidos.

Durante os experimentos observou-se que o parafuso da posição vertical do engaste obteve uma folga na segunda etapa, podendo ser esse detalhe que tenha ocasionado os dados dessa etapa com pouco mais de diferença. Para obter melhores resultados, recomenda-se colocar o parafuso da vertical como foi feito o modelo na parte horizontal. Outra melhoria seria aumentar o atrito entre o engaste e a viga, ou seja, conceder-se uma superfície mais rugosa ao engaste.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SORIANO, H. L. Estática das Estruturas. 3 ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2013. 422 p.
- [2] MARTHA, L. F. Análise de estruturas: conceitos e métodos básicos. 3 ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2022. 424 p.
- [3] BEER, F. P. et al. Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática. 9 ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. 626 p. Tradução de: Antônio Eustáquio de Melo.
- [4] HIBBELER, R. C. Resistência dos Materiais. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 659 p. Tradução de: Arlete Simille Marques.
- [5] JAMES M. G.; BARRY J. G. Mecânica dos Materiais - Tradução da 7ª edição norte-americana. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010. 858 p. Tradução de: Luiz Fernando de Castro Paiva.
- [6] phyphox. physical phone experiments. Disponível em: <https://phyphox.org/>. Acesso em: 06 nov. 2024.
- [7] Sonelastic, Advanced Impulse Excitation Technique. Disponível em: <https://www.sonelastic.com/pt/fundamentos/tabelas-propriedades-materiais/polimeros.html>. Acesso em: 20 Fev. 2025.