

DIMENSIONAMENTO E VALIDAÇÃO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS / DESIGN AND VALIDATION OF AN EXPERIMENTAL BENCH FOR MECHANICAL VIBRATION ANALYSIS

Bruno Santiago dos Santos Mendes¹, Raphael Lima Miranda Gonçalves Fagundes², Yuri José Oliveira Moraes³

¹Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil — bruno.mendes@estudante.ufjf.br

²Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil —

raphael.fagundes@estudante.ufjf.br

³Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil — yurijmoraes@ufjf.br

Recebido em: 16/12/2025 | Aprovado em: 22/01/2026 | Publicado em: 03/02/2026

Resumo / Abstract

Este trabalho desenvolveu uma bancada experimental de baixo custo para o estudo de vibrações mecânicas, composta por um pórtico estrutural com dois graus de liberdade e um sistema de excitação pendular, cujo dimensionamento foi baseado em modelos analíticos, análises paramétricas e critérios multicritério. A força de impacto foi definida a partir da conservação de energia e limitada a valores seguros, enquanto análises modais e transitórias confirmaram a confiabilidade do modelo, a ausência de ressonância e a operação dentro de limites seguros de deslocamento e aceleração. A estrutura, fabricada em escala laboratorial por meio de processos convencionais, apresentou elevada confiabilidade, evidenciada pela concordância entre a análise numérica, que identificou frequências naturais de 2,29 Hz e 5,62 Hz, e os resultados experimentais de 2,20 Hz e 6,06 Hz, respectivamente, com erros inferiores a 10%, validando sua aplicação em ensaios experimentais e estudos futuros de vibração e controle passivo estrutural.

Palavras-chave: vibrações mecânicas; bancada experimental; método dos elementos finitos; pórtico estrutural; vibração livre.

This work presents the design, dimensioning, and validation of a low-cost experimental bench for the study of mechanical vibrations. The system consists of a structural frame with two degrees of freedom and a pendulum-based excitation mechanism, whose design was based on analytical models, parametric analyses, and multicriteria decision criteria. The impact force was defined using energy conservation principles and limited to safe values, while modal and transient analyses confirmed the reliability of the model, the absence of resonance, and operation within safe displacement and acceleration limits. The structure was manufactured at laboratory scale using conventional processes and showed high reliability, evidenced by the agreement between numerical analysis, which identified natural frequencies of 2.29 Hz and 5.62 Hz, and experimental results of 2.20 Hz and 6.06 Hz, respectively, with errors below 10%, validating its application in experimental tests and future studies on vibration and passive structural control.

Keywords: mechanical vibrations; experimental bench; finite element method; structural frame; free vibration.

1. Introdução / Introduction

A adequada concepção estrutural é uma etapa fundamental para a realização de estudos experimentais confiáveis em vibrações mecânicas (RAO, 2008; FRANÇA; SOTELO JÚNIOR, 2006). Nesse contexto, o dimensionamento e a fabricação de estruturas experimentais devem garantir não apenas a resistência mecânica e a estabilidade geométrica, mas também a representatividade física do comportamento dinâmico a ser investigado (ZHANG et al., 2020). A definição criteriosa de parâmetros como massa, rigidez, geometria e condições de ligação é essencial para assegurar respostas vibratórias compatíveis com os modelos teóricos adotados (INMAN, 2013).

Assim, este trabalho dedica-se ao projeto, dimensionamento e construção de estruturas em escala laboratorial, desenvolvidas com o objetivo de permitir a aplicação controlada de excitações e a avaliação da resposta dinâmica do sistema. A fabricação priorizou soluções construtivas simples, de baixo custo e fácil montagem (LIMA, A. S. et al, 2023), sem comprometer a precisão experimental. Dessa forma, as estruturas concebidas possibilitam a repetibilidade dos ensaios e fornecem uma base consistente para a análise do desempenho de dispositivos passivos de controle de vibrações (SOONG; SPENCER JR., 2002).

2. Metodologia / Methodology

2.1 Bancada Pendular / Pendulum Bench

Foi adotado um sistema de pêndulo, conforme ilustrado na Figura 1, por sua simplicidade, baixo custo e facilidade de controle da força de impacto. A bancada permite variar o impacto por meio do ajuste da massa e da altura de queda, podendo operar em diferentes níveis da estrutura.

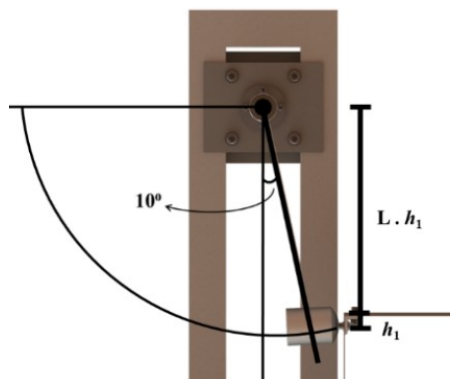


Figura 1 – Sistema de pêndulo projetado / Figure 1 – Designed pendulum system.

A força de impacto do pêndulo é determinada a partir da velocidade da massa no ponto de colisão, a qual é estimada pelo princípio da conservação da energia, desconsiderando perdas. A energia do sistema depende da variação de altura associada ao ângulo de liberação do pêndulo, sendo o impacto projetado para ocorrer a 10° da vertical. Com base na variação do momento linear no instante da colisão, a força de impacto é calculada conforme a Equação 1, em que F representa a força de impacto, m é a massa do corpo pendular, g corresponde à aceleração da gravidade, L é o comprimento da haste do pêndulo e θ é o ângulo de liberação em relação à vertical. O termo $\cos(10^\circ) - \cos(\theta)$ expressa a variação de altura do sistema, enquanto Δt representa o tempo de contato durante a colisão, obtido experimentalmente. Assim, conhecidas a velocidade imediatamente antes do impacto e a duração da colisão, torna-se possível determinar a força média aplicada e padronizar a força de impacto nos ensaios realizados.

$$F = \frac{m \sqrt{2gL(\cos(10^\circ) - \cos(\theta))}}{\Delta t} \quad (1)$$

Ademais, foi realizada uma análise paramétrica do sistema de impacto pendular por meio de simulações numéricas no software Matlab®. Inicialmente, o modelo matemático do pêndulo foi implementado considerando as equações do movimento e a conversão da energia potencial gravitacional em energia cinética no instante do impacto. Na sequência, foram definidas como variáveis de estudo a massa do pêndulo e o comprimento da haste, as quais foram combinadas dentro de faixas previamente estabelecidas, permitindo avaliar sua influência individual e conjunta sobre a força de impacto. Para cada combinação de parâmetros, a força resultante foi estimada a partir da variação de momento linear no instante do impacto, assumindo condições ideais de contato e repetibilidade.

A estrutura auxiliar foi fabricada em perfis de aço RHS 30×50×1,5 mm e apoiada sobre coxins isoladores de vibração, garantindo estabilidade e isolamento dinâmico. O

ajuste da altura de impacto é realizado por parafusos de fixação, permitindo flexibilidade nas configurações experimentais.

2.2 Pórtico Estrutural / Structural Frame

Para o projeto preliminar da estrutura, adotou-se um modelo equivalente ao primeiro modo de vibrar da estrutura, reduzido a um sistema de um grau de liberdade (1 GDL), com o objetivo de facilitar a realização de cálculos analíticos, uma vez que esse modo apresenta o maior pico de amplitude. Ressalta-se, entretanto, que essa simplificação não é capaz de representar os dois graus de liberdade reais do sistema, o que resulta em menor precisão e em um erro relativo mais elevado. Ainda assim, para fins de projeto preliminar, o modelo adotado é considerado adequado e suficientemente representativo do comportamento dinâmico da estrutura. Realizou-se uma análise paramétrica da vibração livre, avaliando o deslocamento máximo em função da espessura, do comprimento das colunas e da massa dos andares, a partir de condições iniciais previamente estabelecidas. A influência da geometria da seção transversal e das condições de contorno foi analisada por meio de parâmetros adimensionais, como o fator de forma e o índice de esbeltez, facilitando a comparação dos resultados.

As colunas foram confeccionadas em aço inoxidável, em detrimento do aço carbono convencional, devido à sua maior rigidez estrutural, característica que contribui diretamente para o aumento da frequência natural do sistema e para a redução de deslocamentos e deformações sob carregamento. Essa maior rigidez é especialmente relevante para garantir a estabilidade global do pórtico e a confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Além disso, o aço inoxidável apresenta melhor resistência à corrosão, o que assegura maior durabilidade do conjunto e menor variação das propriedades mecânicas ao longo do tempo, fator importante para a repetibilidade dos testes. Com base nessas análises, foram estimados os valores de massa equivalente e a

rigidez estrutural, adotando-se o módulo de Young do aço inoxidável de 200 GPa, fornecendo subsídios para a otimização e o dimensionamento da bancada de testes.

2.3 Análise Numérica / Numerical Analysis

Foi desenvolvido um modelo estrutural numérico para identificar as frequências naturais e os modos de vibração da bancada, permitindo avaliar o comportamento dinâmico em diferentes pontos da estrutura. A modelagem CAD foi realizada no SolidWorks®, enquanto a análise modal foi conduzida no Ansys®. As simulações possibilitaram verificar a resposta da estrutura e antecipar possíveis falhas antes dos ensaios experimentais, utilizando malhas adequadas a componentes em chapa metálica e condições de contorno simplificadas. A Figura 2 mostra a estrutura da armação com suas respectivas dimensões.

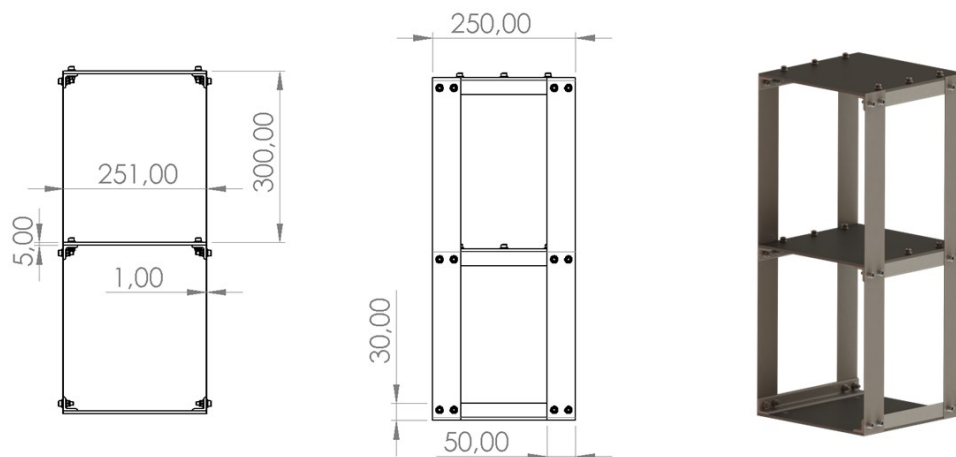


Figura 2 – Desenho técnico e vista isométrica do pórtico estrutural / Figure 2 – Technical drawing and isometric view of the structural frame.

Ênfase particular foi dada à análise modal da estrutura pendular, cujo objetivo central foi mapear seus modos de vibrar e assegurar que não coincidisse com os modos do pórtico de ensaio. Essa verificação é fundamental para evitar a entrada em ressonância entre a base de excitação e o corpo de prova, garantindo o desacoplamento dinâmico e a integridade dos resultados experimentais.

2.4 Manufatura das Estruturas / Structure Manufacturing

Após a etapa de dimensionamento do pórtico e da estrutura de excitação, iniciou-se a manufatura dos protótipos no Laboratório de Processos da UFJF. As peças cilíndricas foram usinadas em torno, enquanto os furos de fixação foram executados em fresadora, garantindo precisão dimensional. Para reduzir erros de montagem, utilizaram-se gabaritos em escala real, e o corte das chapas e perfis de aço foi realizado com esmerilhadeira e discos adequados, assegurando a correta conformação dos componentes estruturais, chegando ao resultado demonstrado na Figura 3.



Figura 3 – Pórtico estrutural fabricado / Figure 3 – Manufactured structural frame.

3. Resultados e Discussão / Results and Discussion

3.1 Análise Paramétrica / Parametric Analysis

Com base nos resultados obtidos na análise paramétrica, foi definido um critério de segurança estrutural visando preservar a integridade da estrutura de impacto ao longo dos ensaios. Observou-se que níveis de força superiores a 100 N podem induzir tensões acima do limite elástico do material, resultando em deformações plásticas permanentes e comprometendo tanto a repetibilidade dos testes quanto a confiabilidade dos resultados

experimentais. Dessa forma, adotou-se o valor de 100 N como limite máximo admissível de força de impacto, garantindo a operação do sistema exclusivamente no regime elástico.

A partir desse limite, procedeu-se à seleção de uma configuração experimental que atendesse simultaneamente aos requisitos de segurança e à representatividade física do fenômeno analisado, conforme a Figura 4. A combinação de uma massa de 1 kg com uma haste de 0,30 m de comprimento mostrou-se adequada, pois permite a geração de forças de impacto próximas ao limite estabelecido, sem ultrapassá-lo, assegurando assim condições controladas e seguras de ensaio.

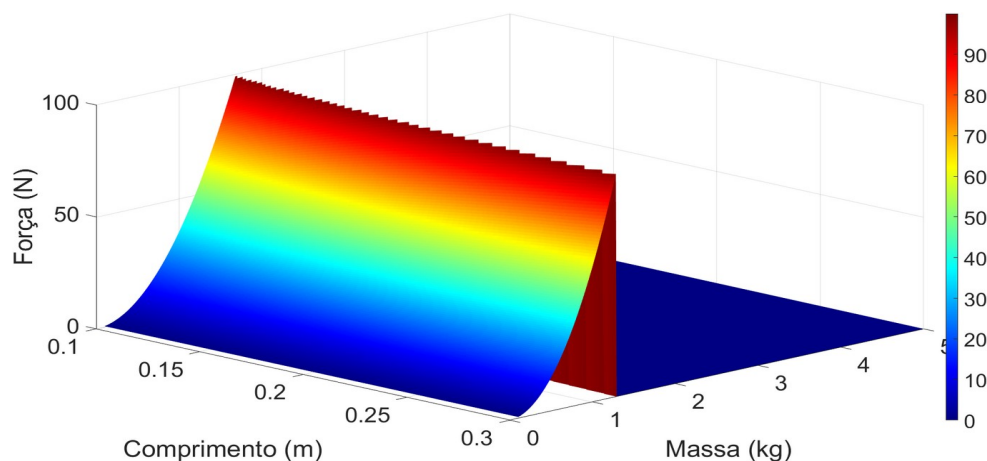


Figura 4 – Análise da força resultante do pêndulo com restrição / Figure 4 – Analysis of the pendulum resultant force under constraint.

3.2 Análise Numérica Modal do Pórtico / Modal Numerical Analysis of the Structural Frame

As análises modais mostraram que o maior deslocamento ocorre no segundo pavimento, conforme ilustrado na Figura 5, tanto no primeiro modo de vibrar quanto no segundo, neste último com movimentos opostos entre os pavimentos. A primeira frequência natural, igual a 2,29 Hz, apresentou excelente concordância com o modelo analítico simplificado, validando o modelo numérico. Esse valor reduzido foi determinante

para a configuração final da estrutura, por ser adequado à prevenção de fenômenos de ressonância nos ensaios subsequentes.

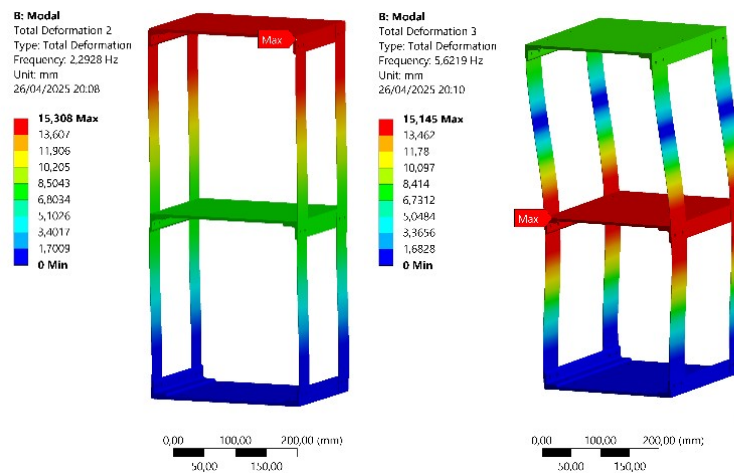


Figura 5 – Primeiro e segundo modo de vibrar do pórtico estrutural / Figure 5 – First and second vibration modes of the structural frame.

3.3 Análise Numérica da Estrutura Pendular / Numerical Analysis of the Pendulum Structure

A análise modal da bancada pendular, ilustrado na Figura 6, mostrou que, no primeiro modo, os deslocamentos concentram-se principalmente na massa do pêndulo, enquanto no segundo modo a deformação se distribui pela haste e pelo pórtico, com maiores amplitudes na região superior. A comparação das frequências naturais da estrutura pendular e do pórtico revelou diferenças elevadas entre os modos, indicando que o sistema opera em condições seguras, sem risco de ressonância. Esses resultados confirmam a confiabilidade do modelo numérico e asseguram maior controle nos ensaios experimentais.

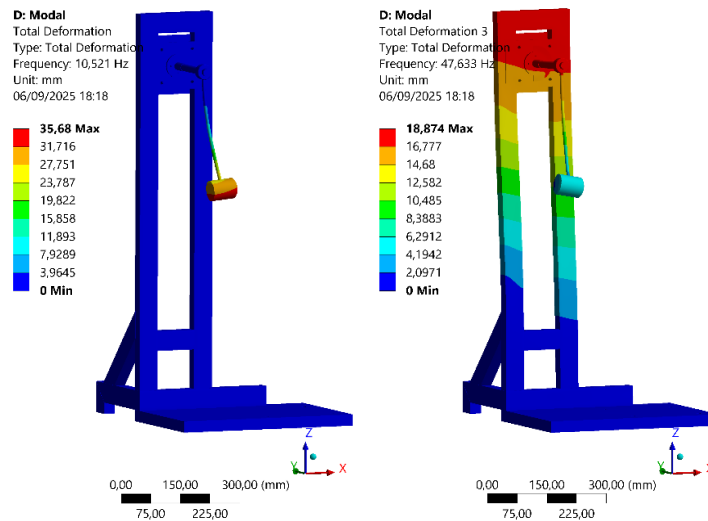


Figura 6 – Primeiro e segundo modo de vibrar da bancada pendular / Figure 6 – First and second vibration modes of the pendulum bench.

3.4 Ensaio Experimental / Experimental Test

A validação da bancada experimental foi realizada por meio de ensaios de vibração livre no pórtico estrutural, considerando impactos aplicados no segundo pavimento e excitação pendular com inclinação de 40° , sem a utilização de molas. Essa configuração foi adotada como condição de referência, pois permite avaliar exclusivamente o comportamento dinâmico intrínseco da bancada, sem a influência de elementos adicionais de rigidez ou dissipação de energia.

No gráfico de aceleração em função do tempo demonstrado na Figura 7, observa-se a resposta típica de vibração livre da estrutura após o impacto a 40° , sem a presença de molas. O sinal apresenta amplitudes iniciais bem definidas, seguidas por um decaimento gradual, associado ao amortecimento estrutural intrínseco do sistema. Esse comportamento indica que a bancada responde de forma estável e repetível, sem excitações parasitas ou irregularidades no sinal, evidenciando a adequação do sistema de excitação, da instrumentação e das condições de contorno adotadas.

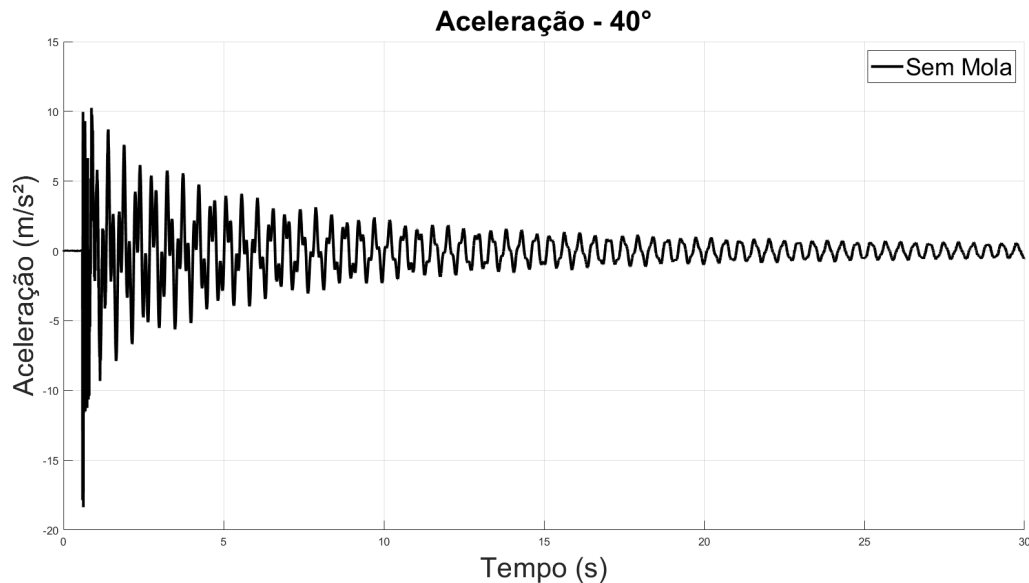


Figura 7 – Aceleração em função do tempo para inclinação de 40° / Figure 7 –
Acceleration versus time for a 40° inclination.

Já a análise no domínio da frequência na Figura 8, obtida por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), permite identificar claramente os picos correspondentes às frequências naturais dominantes da estrutura. As frequências experimentais extraídas do espectro foram de 2,20 Hz e 6,06 Hz, apresentando boa concordância com os valores previstos numericamente, com diferenças de 3,93% e 7,26%, respectivamente, confirmando a coerência entre modelo e experimento. A presença de picos bem definidos e a ausência de componentes espúrias relevantes reforçam que a resposta medida reflete o comportamento dinâmico real da bancada, validando seu uso como base para estudos posteriores com dispositivos passivos de controle de vibrações.

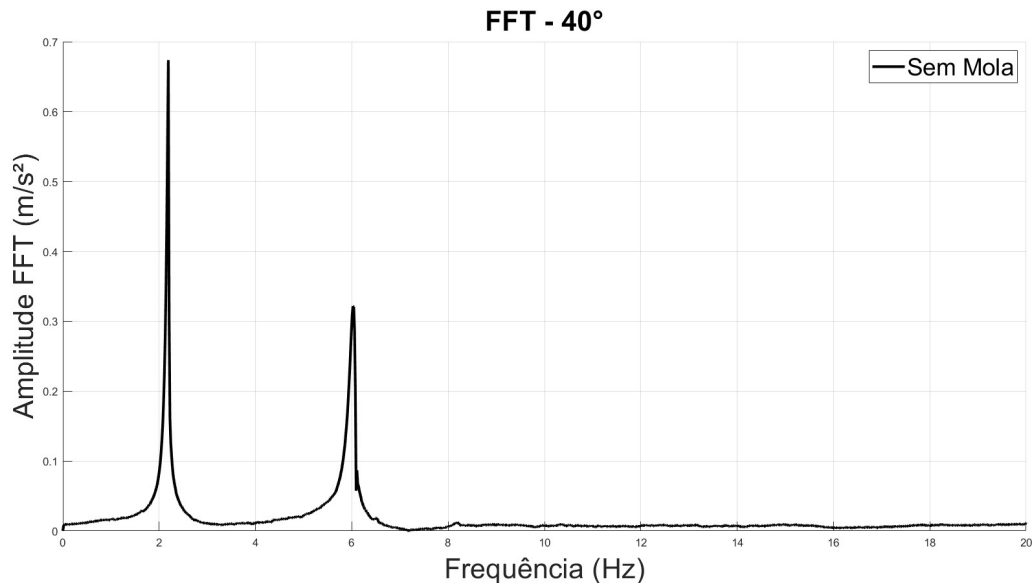


Figura 8 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para inclinação de 40° / Figure 8 – Fast Fourier Transform (FFT) for a 40° inclination.

4. Conclusão / Conclusion

Este trabalho desenvolveu e validou uma bancada experimental para estudos de vibrações mecânicas, abrangendo o projeto, dimensionamento e fabricação da estrutura. O sistema de excitação pendular foi configurado com uma massa de 1 kg e uma haste de 0,30 m, baseando-se em modelos analíticos e critérios de decisão para equilibrar desempenho e segurança.

As análises modais confirmaram a precisão do dimensionamento ao identificarem frequências naturais de 2,29 Hz e 5,62 Hz para o pórtico estrutural. Esses valores apresentaram uma divergência de 3,93% e 7,26% em relação aos dados experimentais, o que valida a confiabilidade do modelo numérico. Além disso, constatou-se que o primeiro modo de vibrar da bancada pendular de 10,52 Hz está suficientemente afastado das frequências do pórtico, garantindo o desacoplamento dinâmico necessário para evitar a ressonância durante os ensaios. Por fim, a operação mostrou-se segura para impactos com

ângulos de até 40 graus, mantendo a força resultante abaixo do limite de projeto de 100 N, prevenindo deformações plásticas e assegurando a integridade do equipamento.

Referências / References

FRANÇA, L. N. F.; SOTELO JÚNIOR, J. Introdução às vibrações mecânicas. São Paulo: Blucher, 2006.

INMAN, D. J. Engineering Vibration. 4. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2013.

LIMA, A. S. et al. Bancada didática de baixo custo para estudo de técnicas de controle de vibrações em máquinas e estruturas. Marabá: IFPA, 2023.

RAO, S. S. Vibrações Mecânicas. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SOONG, T. T.; SPENCER JR., B. F. Supplemental energy dissipation: state-of-the-art and state-of-the-practice. Engineering Structures, v. 24, n. 3, p. 243–259, 2002.

ZHANG, J.; WU, Z.; NOORI, M.; LI, Y. Experimental Vibration Analysis for Civil Structures: Testing, Sensing, Monitoring, and Control. London: CRC Press, 2020.