

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO CONTROLE PASSIVO DE VIBRAÇÕES EM UM PÓRTICO ESTRUTURAL UTILIZANDO LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA (LMF) / NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PASSIVE VIBRATION CONTROL IN A STRUCTURAL FRAME USING SHAPE MEMORY ALLOYS (SMA)

Raphael Lima Miranda Gonçalves Fagundes¹, Bruno Santiago dos Santos Mendes², Yuri José
Oliveira Moraes³

¹Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil —

raphael.fagundes@estudante.ufjf.br.

²Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil — bruno.mendes@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 apresenta a análise de um sistema para controle passivo de vibrações em um pórtico estrutural de dois graus de liberdade (2GDL), excitado por uma bancada pendular de impactos. A validação do protótipo foi realizada por meio de simulações numéricas e ensaios experimentais, os quais demonstraram concordância satisfatória na identificação dos modos de vibrar. O estudo investigou a aplicação de molas ortodônticas de NiTi (modelos M7 e M15) como elementos de dissipação de energia, instaladas com pré-tensionamento. Os resultados indicaram que a configuração utilizando a mola M7 com 300% de offset foi a mais eficiente, reduzindo em até 62% a amplitude do segundo modo de vibração, o que valida o modelo numérico e o potencial das Ligas com Memória de Forma na mitigação de vibrações mecânicas.

Palavras-chave: Vibrações Mecânicas, Ligas de Memória de Forma (LMF), Bancada Experimental, Método dos Elementos Finitos (MEF), Amortecimento Estrutural.

This paper presents the analysis of a passive vibration control system in a two-degree-of-freedom structural frame, excited by an impact pendulum bench. The prototype validation was performed through numerical simulations and experimental tests, which showed satisfactory agreement in identifying vibration modes. The study investigated the application of NiTi orthodontic springs (M7 and M15 models) as energy dissipation elements, installed with pre-tension. The results indicated that the configuration using the M7 spring with 300% offset was the most efficient, reducing the amplitude of the second vibration mode by up to 62%, validating the numerical model and the potential of Shape Memory Alloys in mitigating mechanical vibrations.

Keywords: Mechanical Vibrations; Shape Memory Alloys (SMA); Experimental Bench; Finite Element Method (FEM); Structural Damping.

1. Introdução / Introduction

As vibrações mecânicas podem induzir falhas por fadiga e danos estruturais severos, tornando a compreensão e o controle desses fenômenos essenciais para a segurança dos sistemas (RAO, 2008). Este estudo investiga o controle passivo de vibrações utilizando Ligas com Memória de Forma que, devido à propriedade de superelasticidade, conseguem recuperar grandes deformações e dissipar energia através de ciclos de histerese mecânica (SOONG; SPENCER JR., 2002). Foram utilizadas molas ortodônticas comerciais de NiTi aplicadas em um pórtico estrutural de dois graus de liberdade, excitado por uma bancada pendular desenvolvida para gerar impactos controlados. As molas foram instaladas diagonalmente com pré-tensionamento para maximizar a eficiência do amortecimento, sendo que os resultados validaram o modelo numérico e destacaram a configuração da mola M7 com 300% de offset, a qual reduziu a amplitude do segundo modo de vibração em 62%.

1.1 Ligas de Memória de Forma (LMF)/ Shape Memory Alloys (SMA)

As Ligas com Memória de Forma (LMF) são materiais metálicos que apresentam a capacidade singular de alternar reversivelmente entre diferentes fases cristalinas, denominadas martensita e austenita, em resposta a estímulos térmicos ou mecânicos (SUN e HUANG, 2009). A fase austenítica é estável em temperaturas elevadas e apresenta uma estrutura cúbica, enquanto a fase martensítica predomina em temperaturas mais baixas e possui uma estrutura cristalina menos simétrica. A transição entre essas fases é regida por temperaturas críticas de transformação e confere a esses materiais propriedades únicas, como o efeito de memória de forma e a superelasticidade.

Para aplicações de controle passivo de vibrações, o fenômeno de maior relevância é a superelasticidade. Este efeito manifesta-se quando o material é submetido a esforços mecânicos estando em uma temperatura superior à temperatura final de austenitização (A_f). Nessa condição, a aplicação de tensão induz uma transformação de fase da austenita para a martensita, processo que é revertido espontaneamente após o alívio da carga (Lagoudas, 2008). O comportamento mecânico resultante descreve um ciclo de histerese fechado no diagrama tensão-deformação, conforme pode ser observado na Figura 1.

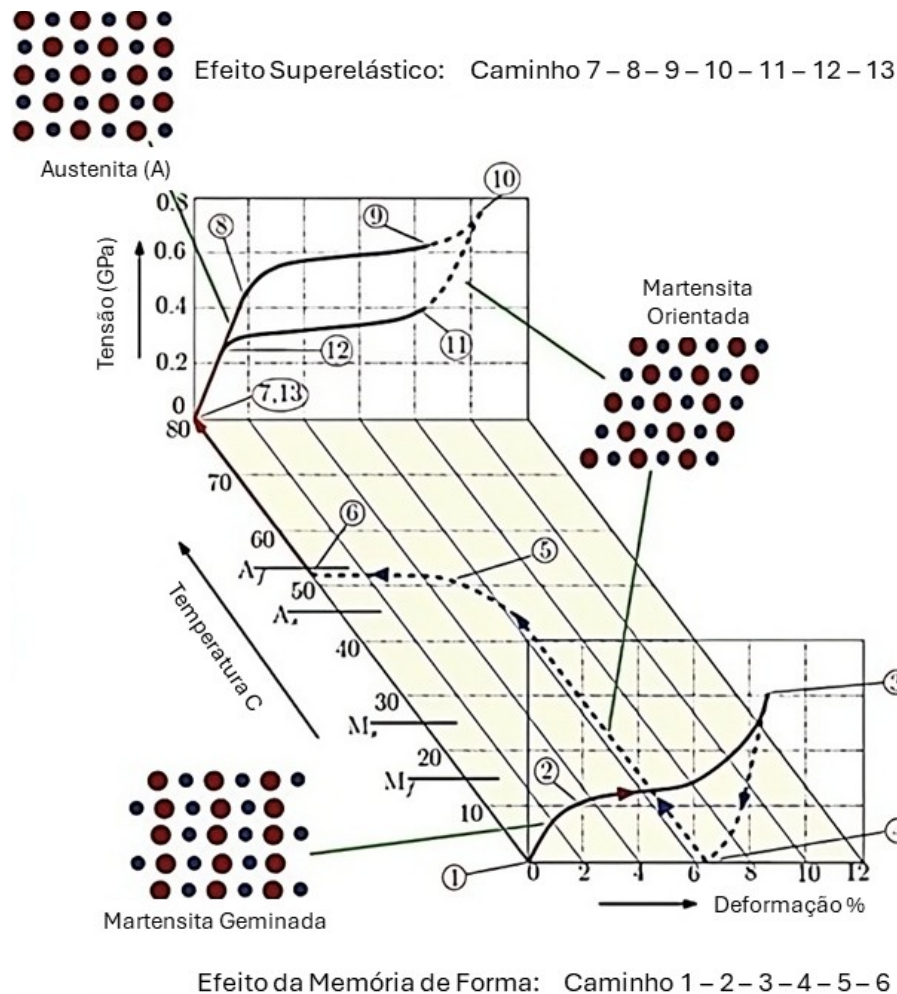


Figura 1 - Gráfico tridimensional de tensão-deformação-temperatura que descreve o comportamento termomecânico da LMF. Fonte: Adaptado de Oliveira, A.G. (2022). / Figure 1 - Three-dimensional stress-strain-temperature graph describing the thermomechanical behavior of SMA. Source: Adapted from Oliveira, A.G. (2022).

A área interna desse laço histerético corresponde à quantidade de energia mecânica dissipada pelo material durante o ciclo de carga e descarga, o que justifica o alto potencial de amortecimento dessas ligas em sistemas estruturais (LECCE e CONCILIO, 2014). É fundamental ressaltar que a eficácia desse mecanismo de dissipação depende diretamente da magnitude da deformação imposta ao material. Para que a superelasticidade seja ativada e a energia seja dissipada, o sistema estrutural precisa sofrer deslocamentos

suficientes para induzir a transformação de fase e percorrer o ciclo histerético do material.

2. Metodologia / Methodology

A metodologia adotada seguiu um fluxo de projeto integrado, abrangendo desde a revisão do estado da arte até a modelagem tridimensional no software SolidWorks® 2023 e a realização de análises numéricas. A simulação modal foi conduzida no software Ansys® 21.0 via Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando uma malha mista de aproximadamente 57 mil elementos para a identificação precisa das frequências naturais da estrutura.

A etapa de validação experimental consistiu em ensaios de vibração livre no pórtico estrutural, excitado por um impacto pendular liberado a 50 graus no segundo pavimento. A aquisição dos dados de aceleração foi realizada por meio de sensores inerciais MEMS (modelo MPU-6050), interfaciados via protocolo I2C com um microcontrolador ESP32 (módulo ESP-WROOM-32). A transmissão dos dados para a estação de trabalho ocorreu em tempo real via comunicação serial por interface USB. Essa abordagem foi priorizada em detrimento do armazenamento local em cartão de memória, visto que a latência de escrita deste dispositivo limitava a taxa de atualização dos dados, introduzindo ruídos de discretização e comprometendo a fidelidade do sinal. Dessa forma, a conexão direta assegurou a integridade dos dados e a alta resolução temporal necessária para as análises.

Posteriormente, o processamento dos sinais foi executado no ambiente Matlab®, aplicando-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para analisar o comportamento dinâmico da estrutura em duas condições: sem elementos de controle e equipada com molas de NiTi (modelos M7 e M15). Esses dispositivos foram instalados em configuração de contraventamento diagonal, região sujeita aos maiores deslocamentos relativos, a fim de garantir a ativação do efeito superelástico do material. Adicionalmente, foram aplicados

pré-tensionamentos de 100% e 300% em relação ao comprimento útil das molas, visando maximizar a dissipação de energia por histerese. A utilização das Ligas com Memória de Forma (LMF) destaca-se por constituir uma estratégia de controle passivo, dispensando o uso de fontes externas de energia para realizar a dissipação da energia cinética do sistema.

Ensaio Experimental / Experimental Test

A Análise Experimental foi conduzida por meio de ensaios de vibração livre no pórtico estrutural com o objetivo de comparar o comportamento dinâmico da estrutura nas condições sem e com a atuação de molas superelásticas de NiTi. O sistema foi excitado no segundo pavimento pelo impacto de um pêndulo liberado a um ângulo padronizado de 50° graus, sendo a aceleração no tempo registrada por acelerômetros MPU-6050 instalados nos andares como apresentados na Figura 2.

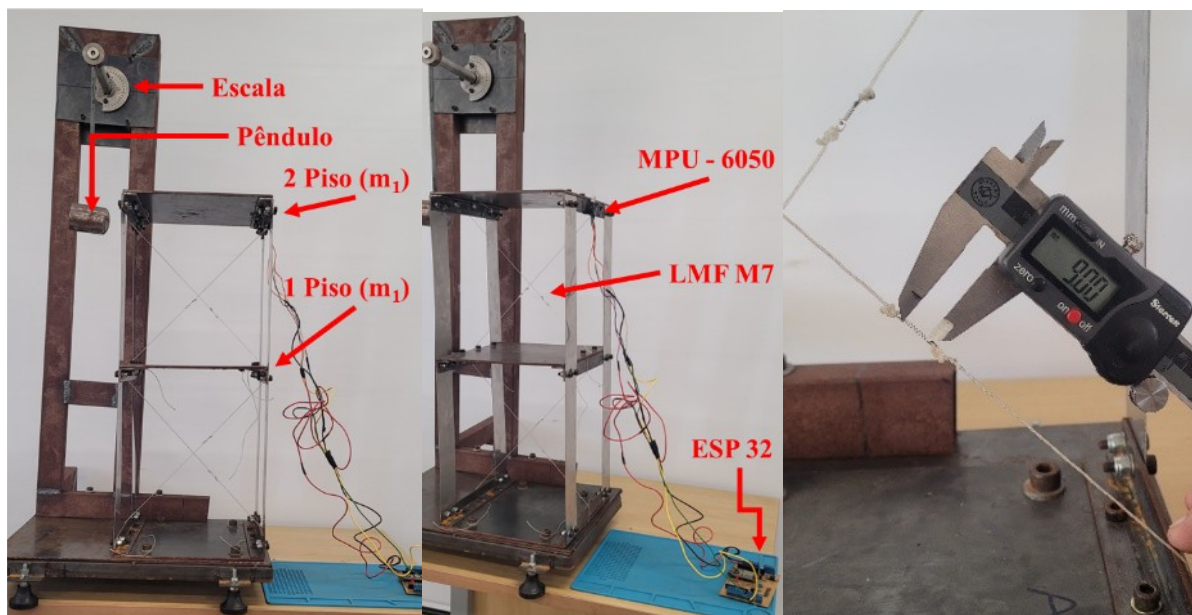


Figura 2 - Preparação para realização do ensaio de vibração livre. / Figure 2 - Preparation for free vibration testing.

Após o impacto, a estrutura oscilou livremente por aproximadamente 50 segundos e os dados adquiridos foram processados no ambiente Matlab® utilizando a Transformada Rápida de Fourier para a análise de frequência. Foram testadas as molas modelos M7 e M15 em configuração de contraventamento diagonal com níveis de pré-tensionamento de 100% e 300% do comprimento útil, sendo este último essencial para otimizar a dissipação de energia através do equilíbrio no ciclo de histerese.

3. Resultados e Discussão / Results and Discussion

Os ensaios experimentais iniciaram-se pela validação do modelo numérico através da comparação das frequências naturais da estrutura sem os dispositivos de controle. Os resultados demonstraram boa concordância entre as simulações no Ansys® e os testes físicos, apresentando erros de 6,48% para o primeiro modo de vibrar e 5,21% para o segundo.

Após a validação, avaliou-se a eficácia das molas superelásticas. A Figura 3 revela a análise no domínio do tempo evidenciou que a configuração da mola M7 com 300% de offset foi a mais eficiente, reduzindo a amplitude média dos picos para $0,08 \text{ m/s}^2$ e o tempo de estabilização para 9,1 segundos. Já a mola M15, devido ao seu maior comprimento, resultou em um tempo de acomodação superior, de 19,3 segundos.

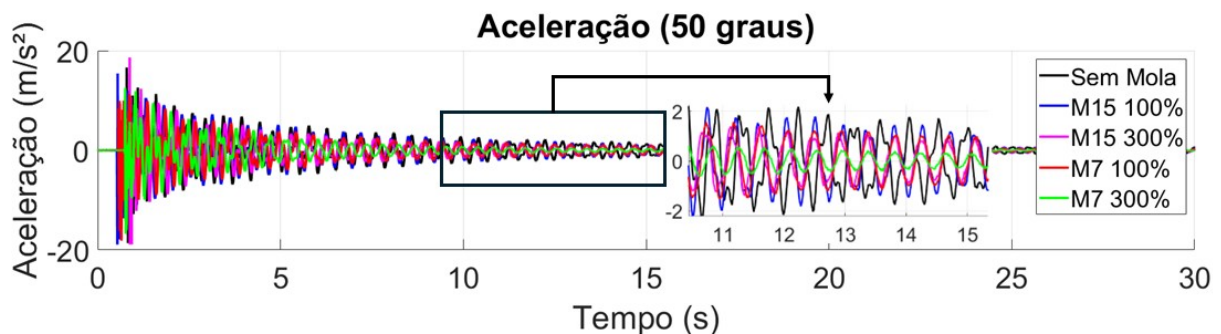


Figura 3 - Aceleração x Tempo 50° Graus. / Figure 3 - Acceleration x Time at 50° Angle.

Na Figura 4, no domínio da frequência, a Transformada Rápida de Fourier confirmou a superioridade da mola M7 com 300% de offset, que atingiu reduções de amplitude de 52,26% no primeiro modo e 48,24% no segundo modo em comparação à estrutura sem mola. As demais configurações apresentaram desempenhos inferiores na dissipação de energia, conforme detalhado no comparativo final presente na Tabela 1.

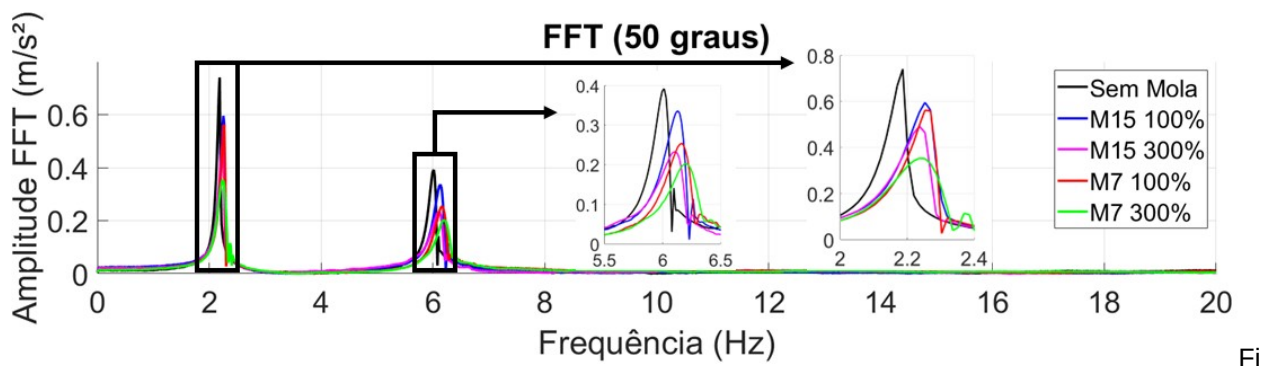


Figura 4 - Transformada Rápida de Fourier (FFT) 50° Graus. / Figure 4 - Fast Fourier Transform (FFT) at 50° Angle.

Tabela 1 -- Parâmetros de impressão / Table 1 -- Printing parameters

Sinal	Offset	Amplitude	Redução	Amplitude	Redução
		Primeiro Modo (m/s ²)	Primeiro Modo (%)	Segundo Modo (m/s ²)	Segundo Modo (%)
Sem Mola	---	0,74	---	0,39	---
M15	100%	0,60	19,55	0,34	14,20
	300%	0,49	33,53	0,23	40,56
M7	100%	0,56	24,06	0,25	35,08
	300%	0,35	52,26	0,20	48,24

4. Conclusão / Conclusion

Os ensaios experimentais confirmaram a eficiência do controle passivo de vibrações utilizando molas de NiTi em configuração de contraventamento cruzado. A mola M7 com 300% de pré-tensionamento destacou-se pelo melhor desempenho, reduzindo as amplitudes espectrais em até 65% e o tempo de acomodação da estrutura em aproximadamente 67%. Conclui-se que a utilização de Ligas com Memória de Forma constitui uma estratégia robusta, simples e econômica para a mitigação de vibrações, validando seu potencial para aplicações reais sem a necessidade de fontes externas de energia.

Referências / References

- LAGOUDAS, D. C.** *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. New York: Springer, 2008.
- LECCE, L.; CONCILIO, A.** *Shape Memory Alloy Engineering: For Aerospace, Structural and Biomedical Applications*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
- OLIVEIRA, A. G.** *Controle de vibração em pás de rotor de helicóptero com pitch link superelástico de LMF-NiTi*. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022.
- 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.



SUN, L.; HUANG, W. M. Nature of the reversible shape memory effect. *International Journal of Plasticity*, v. 25, n. 11, p. 2224-2244, 2009.