

ABSORVEDOR DE VIBRAÇÕES ADAPTATIVAMENTE SINTONIZADO: APLICAÇÃO COM LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA

Pedro Stringueto, pedro.stringueto@unesp.br¹

Fabio Mazzariol Santiciolli, fabio.santiciolli@unesp.br¹

Paulo José Paupitz Gonçalves, paulo.paupitz@unesp.br¹

¹Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB), Bauru, Av. Eng. Luís Edmundo Carrijo Coube, 14-01 - Vargem Limpa, Bauru - SP, 17033-360

Resumo. Absorvedores de vibrações sintonizados (Tuned Vibration Absorbers – TVAs) têm como objetivo atenuar vibrações em frequências pré-determinadas. No entanto, caso haja perda de sintonia ou divergência entre seu projeto e o ambiente real, estes perdem eficácia. Para contornar isso, foram propostos os absorvedores de vibrações adaptativamente sintonizados (Adaptative Tuned Vibration Absorbers – ATVAs), que utilizam elementos de rigidez controlável para ajustar a frequência natural do absorvedor. Para a concepção desses ATVAs, pode-se utilizar ligas de memória de forma (Shape Memory Alloys – SMAs), capazes de alterarem sua forma e rigidez originais, em resposta a variações de temperatura. Dessa forma, para os SMA ATVAs, é utilizado um controle adaptativo-passivo, que altera ativamente as características do sistema para uma melhor eficiência do sistema passivo. Portanto, este trabalho tem como objetivo, estudar o comportamento e desempenho dos SMA ATVAs controlados individualmente dispostos sob uma estrutura hospedeira. Além disso, a temperatura dos fios de SMA é observada por meio de termopar, sendo estes fios eletrificados por um MOSFET gerando aquecimento por efeito Joule.

Palavras-chave: Banda de atenuação. Controle de vibrações. Metamateriais.

Abstract. Tuned Vibration Absorbers (TVAs) are designed to attenuate vibrations at predetermined frequencies. However, if there is a loss of tuning or divergence between their design and the real environment, they lose their effectiveness. To avoid this, Adaptative Tuned Vibration Absorbers (ATVAs) have been proposed, which use controllable difficulty elements to adjust the absorber's natural frequency. For the design of these ATVAs, Shape Memory Alloys (SMAs) can be used, as they can change their original shape and stiffness, in response to temperature variations. Thus, for the SMA ATVAs, adaptive-passive control is used, which changes the system characteristics for better efficiency of the passive system. Therefore, this work aims to study the behavior and performance of SMA ATVAs controlled in isolation under any structure. In addition, the temperature of the SMA wires is observed by means of a thermocouple, these wires being electrified by a MOSFET generating heating by the Joule effect.

Keywords: Attenuation band. Vibration control. Metamaterials.

1. INTRODUÇÃO

Shape Memory Alloys (SMA) ou ligas de memória de forma, são ligas metálicas capazes de retornarem a seu estado original após sofrerem intensa deformação plástica. Por conta da capacidade das SMA de “memorizarem” seu formato em um estado de alta temperatura [1], o relaxamento da carga (*stress reduction*) e o aumento da temperatura da liga (*shape memory effect*), permitem a reversão da transformação de fase interna da estrutura do material (de martensita para austenita) e, conseqüentemente, retorno à sua forma original [2]. Um dos principais efeitos dessa propriedade é a alteração controlável da rigidez da liga.

Absorvedores são materiais ou sistemas que possuem ressonância, ou seja, vibram com uma amplitude maior em frequências específicas [3]. Essa vibração pode ser mecânica ou elétrica e pode ocorrer de maneira natural ou induzida. Por exemplo, pode-se variar a massa, tensão ou rigidez de um ressonador, de forma a alterar sua frequência de ressonância [4]. Devido a essa característica, sua principal aplicação envolve cancelamento de ruído e diminuição de vibração, como em silenciadores de automóveis e *turbofans* de aeronaves [5], uma vez que podem ser calibrados para gerar antirressonâncias nessas frequências de atuação.

A principal aplicação de SMAs como absorvedores consiste em atenuar vibrações em estruturas flexíveis através da implementação de atuadores de SMA em formato de cabos, molas ou chapas no interior ou exterior da estrutura, de acordo com a necessidade [1]. Além disso, existem diversos métodos de controle desses atenuadores, por exemplo, o método de

controle passivo desenvolvido por Wierschem e Andrawes, 2010, onde utilizam-se SMAs super elásticas no formato de cabos (juntamente com fibras poliméricas reforçadas) para aumentar a resistência a tração de estruturas de concreto [6].

Fabro et al. [7] estudaram os efeitos da variação suave de propriedades de material e de randomização espacial sobre o desempenho de metamateriais. Especificamente, abordou-se uma viga dotada de absorvedores. Considerando variações determinísticas e estocásticas das rigidezes dos absorvedores, foram notados efeitos de diminuição do nível de supressão de vibração acompanhado do alargamento da banda de atenuação.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo a construção e estudo do desempenho de um ATVA de SMA.

2. PROTÓTIPO

Para a concepção do protótipo do absorvedor, foi utilizado o software de modelagem 3D SolidWorks, como ferramenta.

O modelo desenvolvido, mostrado na Fig. 1, considerou a utilização de fios de Nitinol de 1 mm de diâmetro com aquecimento da liga por fios de cobre de 2 mm de diâmetro e espaço suficiente para fixação de um termopar tipo K TP-01A.

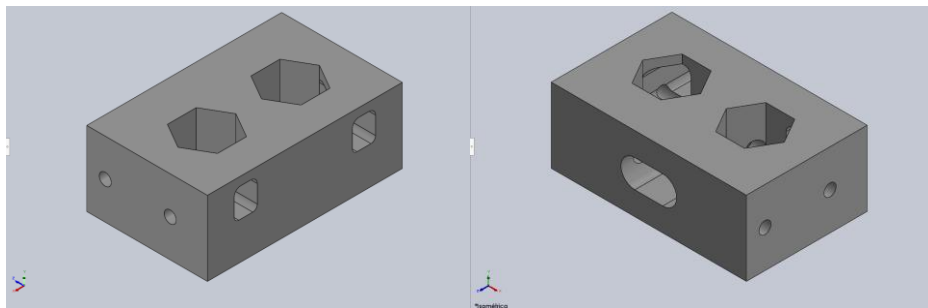


Figura 1. Modelo 3D da carcaça do absorvedor

Para fabricação do suporte, foi utilizado uma impressora 3D, do modelo UltiMaker 2+ Connect, carregada com PLA. Além disso, foram modelados e impressos, no mesmo material e impressora, espaçadores e alinhamentos para os fios de SMA, de modo a tentar garantir a estabilidade e simetria do absorvedor e suas massas suspensas, conforme apresentados na Fig. 2.

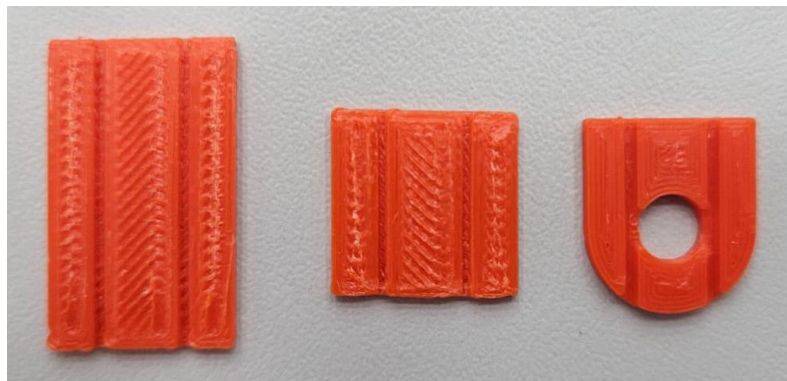


Figura 2. Espaçadores e alinhamentos para fixação da massa nas SMAs

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi desenvolvido um procedimento experimental em laboratório, no qual foi utilizado um excitador eletromecânico (*shaker*). As acelerações geradas nas extremidades das massas do absorvedor, A_e (extremidade esquerda) e A_d (extremidade direita), foram medidas por dois acelerômetros do fabricante PCB, com sensibilidade aproximada de 10 mV/g. Além disso, foram também medidas a aceleração (A_b) e força (F_b) na base do SMA ATVA por meio de uma cabeça de impedância. A Figura 4 demonstra o absorvedor montado e as posições das acelerações medidas.

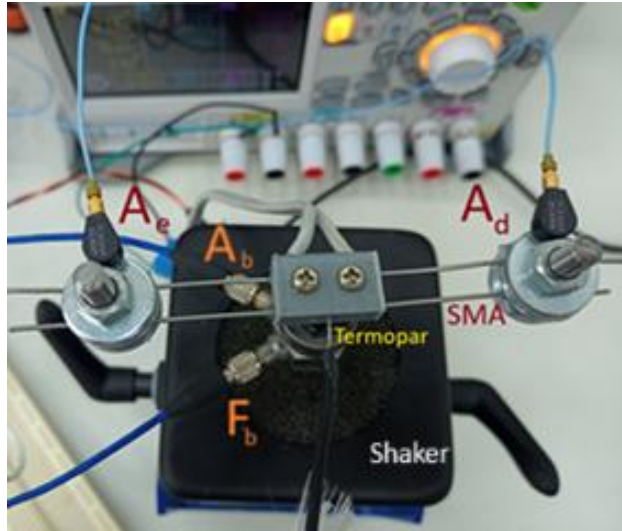


Figura 4. Ilustração do absorvedor e das posições de medição

Para o controle da temperatura, foi utilizado um microcontrolador ESP-32 C3 Super Mini, ligado a um conjunto termopar KTP-01A e condicionador Max6675, para aquisição da temperatura na liga. O microcontrolador também foi ligado a um MOSFET D1484, com controle PWM que, por sua vez, foi conectado a uma fonte de tensão, Rigol DP932E, configurada para uma tensão de 7 V, com corrente máxima de 3 A, responsável pelo aquecimento via efeito Joule. Os componentes citados estão demonstrados nas Fig. 5 e 6.



Figura 5. Aparato experimental, (a) ESP-32 C3 Super Mini, (b) MAX6675 e K TP-01A.



Figura 6. Aparato experimental, (a) MOSFET D1484, (b) Rigol DP932E

Após a montagem, o absorvedor foi inicialmente excitado a temperatura ambiente. O procedimento de excitação e aquisição foi repetido em intervalos de aquecimentos de 5 °C, até uma temperatura máxima de 75 °C.

4. RESULTADOS

Os dados obtidos foram processados e exportados através do software DewesoftX do equipamento de aquisição de dados da Dewesoft e posteriormente pós-processados em MATLAB. A Figura 7 demonstra alguns dos resultados obtidos através dos gráficos de aceleração e de transmissibilidade, com as respectivas fases, em função da frequência, para diferentes temperaturas de operação.

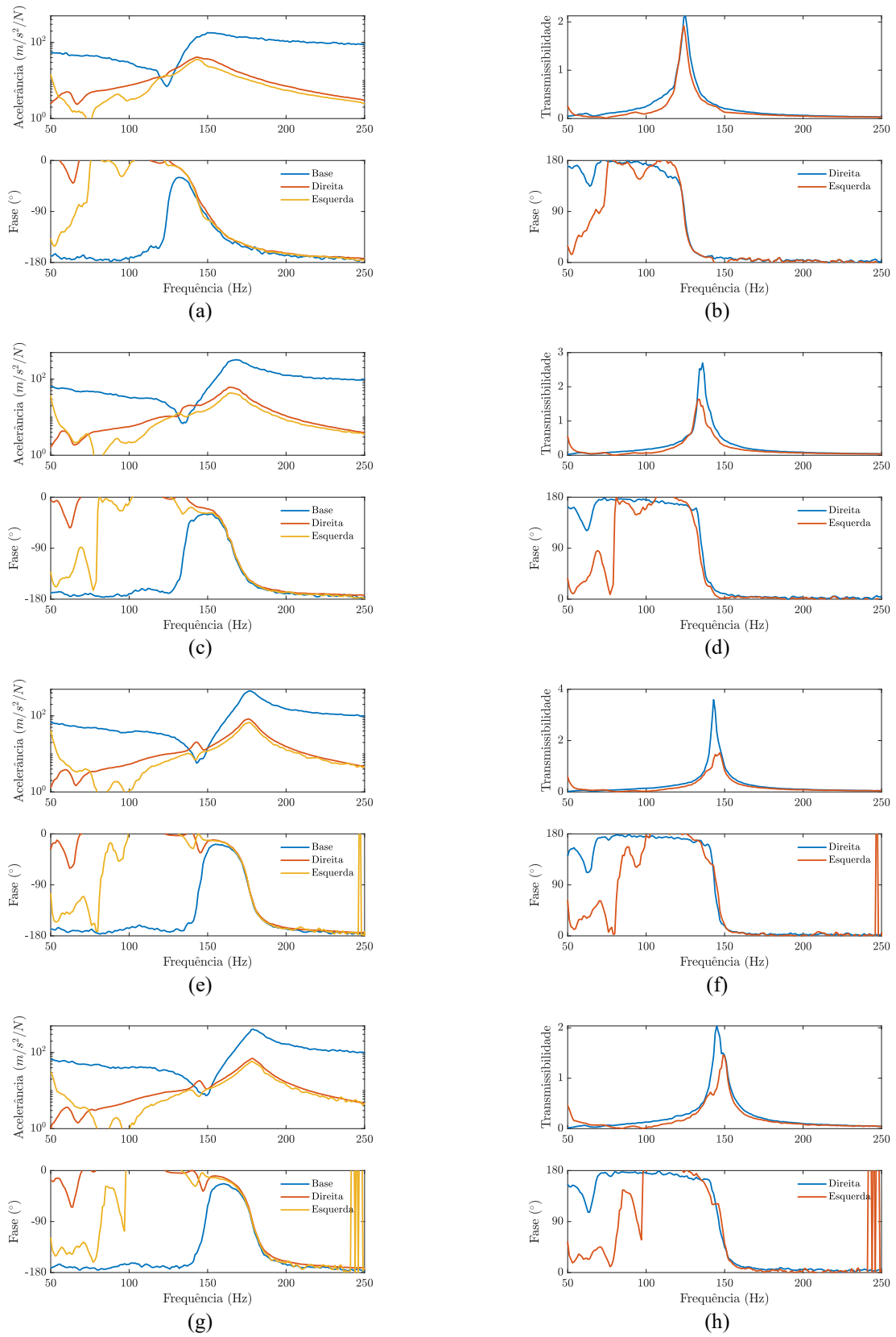


Figura 7. Gráficos de fase e aceleração em função da frequência para diferentes temperaturas de operação, (a) 27 °C, (b) 40 °C, (c) 50 °C, (d) 60 °C

Com isso, é possível observar uma mudança na frequência de antirressonância da base do absorvedor, que era esperado, devido a propriedade da SMA de alterar sua rigidez conforme aumento da temperatura, alterando também a frequência de sintonia do absorvedor de vibrações adaptativamente. A antirressonância da base é demarcada por picos da transmissibilidade de vibração para os absorvedores. Essa mudança pode ser observada também pela variação da posição do “vale” de aceleração da base ao longo da frequência ou, mais precisamente, pela sua mudança da fase, em 90°. Para observar melhor o comportamento dessa variação, a Fig. 8 ilustra a relação entre a temperatura de atuação do absorvedor e a frequência de antirressonância.

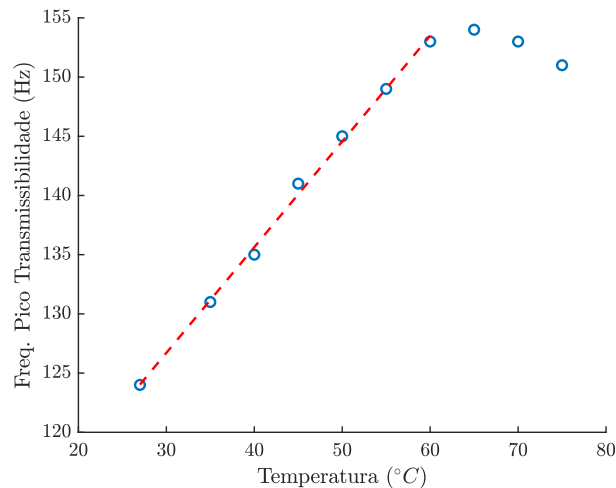


Figura 8. Relação entre a temperatura de atuação e a frequência de antirressonância

Observa-se uma boa linearidade entre a temperatura e a frequência de pico da transmissibilidade (e, assim, a frequência de antirressonância da base) entre 27 e 60 °C. A perda de linearidade a partir temperatura de 60 °C pode ser explicada pela perda de rigidez da base de PLA, uma vez que próxima a sua temperatura de início de mudança de fase. No entanto, pode-se notar que o comportamento do absorvedor foi satisfatório.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho ilustrou o uso de ligas de memória de forma como absorvedor para o controle adaptativo-passivo de vibração em estruturas, por meio da atuação sobre a rigidez do absorvedor e da consequente alteração da frequência de antirressonância desejada. Nota-se que o comportamento de variação de antirressonância é linear em relação a variação da temperatura, da forma como era esperado. Como trabalho futuro, planeja-se a substituição do filamento de PLA por ABS, para trabalho em temperaturas mais altas e a disposição de diversos absorvedores em uma viga metálica para estudo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – (Processos 118253/2024-7, 407152/2022-9 e 381671/2023-2) e à Fapesp – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – (Processo 18/15894-0) pelo apoio financeiro. Os autores também gostariam de agradecer o apoio do INCT-EIE (Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - Estruturas Inteligentes em Engenharia), financiado pelas agências brasileiras CNPq (sob o número de processo 406148/2022-8), bem como pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e pela FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais).

7. REFERÊNCIAS

- A. T. Fabro, D. Beli, N. S. Ferguson, J. R. F. Arruda, and B. R. Mace, “Wave and vibration analysis of elastic metamaterial and phononic crystal beams with slowly varying properties,” *Wave Motion*, vol. 103, p. 102728, 2021. [7]
- Hsu, W.-T., Hashmi, K., 2016. *Resonators, Oscillators, and Frequency References*. Elsevier. [3]
- Langdon, R. M., 1985. *Resonator sensors-a review*. Journal of Physics E: Scientific Instruments. [4]
- Serrano, P., 2018. *Material acústico projetável – Ressonador de Helmholtz – Portal Acústica*. Portal Acústica. [5]

- Sohn, J. W., Ruth, D. J. S., Yuk, D. G., & Choi, S., 2023. *Application of Shape Memory Alloy Actuators to Vibration and Motion Control of Structural Systems: A review*. Applied Sciences. [1]
- Tabrizikahou, A., Kuczma, M., Lasecka-Plura, M., Farsangi, E. N., Noori, M., Gardoni, P., & Li, S., 2022. *Application and modelling of Shape-Memory Alloys for structural vibration control: State-of-the-art review*. Construction and Building Materials. [2]
- Wierschem, N., Andrawes, B., 2010. *Superelastic SMA-FRP Composite Reinforcement for Concrete Structures*. Smart Materials and Structures. [6]

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.