

Investigação Experimental do uso de Fios de Nitinol para Controle de Vibrações em Rotores Flexíveis

Eduardo Preto* Camilo Rocha Araújo**
Diogo Cunha José Karmouche***
Gustavo Luiz C. M. de Abreu****

Universidade Estadual Paulista - UNESP, FEIS, Dep. de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira-SP, Brasil (*eduardo.preto@unesp.br, **camilo.rocha@unesp.br, ***diogo.karmouche@unesp.br, ****gustavo.abreu@unesp.br)

Abstract:

Rotating systems are subject to vibrations due to the presence of external or internal sources and this causes damage to the health of the equipment and tends to generate high maintenance costs. As an alternative to solve this type of problem, vibration attenuators can be used, allowing the equipment to work safely. Currently, several attenuation methods have been investigated for monitoring the functioning of mechanical structures, especially compact attenuating systems, such as, for example, those that use shape memory alloys. In this context, the present work presents the semiactive control of vibrations of a flexible rotor using nitinol wires heated by electric current. The displacements of the bearing in which the wires act are analyzed for different heating temperatures and compared to the rotor without the actuator. By analyzing the experimental results, we note the efficiency in reducing the amplitude, in addition to changing the natural frequency, making the safer system.

Resumo: Sistemas rotativos estão sujeitos a vibrações devido a presença de fontes externas ou internas e isso provoca danos à saúde do equipamento e tende a gerar gastos elevados de manutenção. Como alternativa para solução desse tipo de problema pode-se utilizar os atenuadores de vibrações, permitindo que os equipamento trabalhem de maneira segura. Atualmente, diversos métodos de atenuação têm sido investigados para o monitoramento do funcionamento de estruturas mecânicas, principalmente os sistemas atenuantes compactos, como, por exemplo, os que utilizam as ligas de memória de forma. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta o controle semiativo de vibrações de um rotor flexível utilizando fios de nitinol aquecidos por corrente elétrica. Os deslocamentos do mancal em que os fios atuam são analisados para diferentes temperaturas de aquecimento e comparados com o rotor sem o atuador. Pela análise dos resultados experimentais, nota-se a eficiência na redução da amplitude, além da alteração da frequência natural, tornando o sistema mais seguro.

Keywords: Shape Memory Alloys; flexible rotor; vibration control

Palavras-chaves: Liga com memória de forma; rotor flexível; controle de vibrações

1. INTRODUÇÃO

A presença de vibrações em sistemas rotativos contribui para o surgimento de danos em estruturas mecânicas, que podem ser desde a geração de ruídos até falhas de componentes, provocando a parada do sistema. Quando analisa-se um rotor flexível, os principais responsáveis por essa perturbação são o desbalanceamento e a velocidade crítica (Alves et al., 2015).

Os rotores flexíveis, devido a característica de trabalhar próximo a frequência natural, necessitam de um balanceamento mais eficiente, pois ele tende a flexionar na operação. Com objetivo de amenizar tais problemas, este trabalho visa aplicar o controle semiativo, visto que uma fonte de energia externa é aplicada para alterar a rigidez

e amortecimento dos fios de ligas com memória de forma (LMF)(Alves et al., 2015).

Essa classe de materiais metálicos conseguem alterar suas características por meio de estímulos termomecânicos. Dentre elas encontra-se a propriedade de memória de forma, que gera o retorno a uma ou mais formas por meio do aquecimento e tensionamento dela e, por isso, aplica-se a atuadores compactos por gerarem trabalho elevado, como pode ser visto nos projetos de Maestá et al. (2016), Singh et al. (2003) e Epps and Chopra (2001), em que são utilizados fios de LMF para atuar na área aeroespacial por meio de aquecimento. Já a propriedade de pseudoelasticidade está relacionada a formação de uma histerese que provoca a dissipação de energia do sistema. Tal efeito é apresentado por Alves et al. (2015), Enemark et al. (2015), Borges et al. (2013) e Ma et al. (2015)

em seus trabalhos envolvendo rotores, em que ocorre a redução das amplitudes, devido a histerese que dissipa a energia, e deslocamento das velocidade críticas devido a mudança das microestruturas, assim, conforme aumenta-se a quantidade de austenita em relação a martensita, a rigidez tende a aumentar e, com isso, elevar o valor da velocidade crítica, deslocando-a.

Este trabalho apresenta uma proposta experimental para a atenuação de vibrações em rotores flexíveis utilizando fios de nitinol aquecidos por corrente elétrica com o objetivo de reduzir a amplitude do deslocamento do mancal durante a velocidade crítica, além de verificar o comportamento dessa velocidade. Assim, será possível aumentar a segurança desse sistema ao aproximar ou passar pela ressonância.

2. METODOLOGIA

Para a validação experimental, a bancada é dividida em duas etapas, na primeira monta-se o rotor flexível sem os fios de nitinol, já na segunda os fios são instalados e medidas realizadas.

A bancada experimental é formada por dois mancais suspensos por molas helicoidais inclinadas em 45° , um motor elétrico, um eixo com o disco fixado na região central entre os mancais e um acoplamento ligando o eixo ao motor. Tal bancada pode ser visualizada na Figura 1

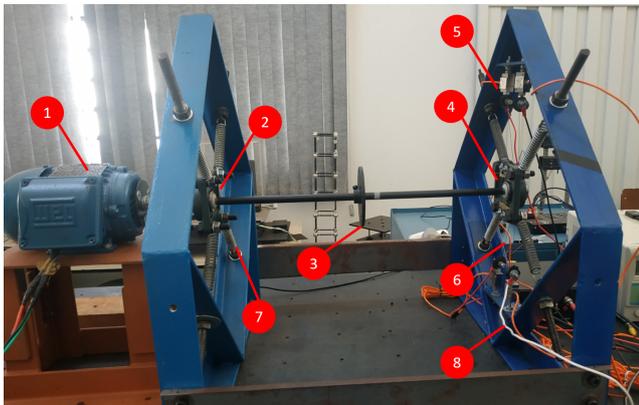


Figura 1. Bancada experimental indicando os componentes na duas etapas do ensaio. 1- motor elétrico; 2- primeiro mancal; 3- rotor; 4- segundo mancal; 5- células de carga; 6- fios de nitinol; 7- molas helicoidais de aço; 8- fios para aquecimento da liga.

O motor está ligado ao inversor de frequências que é programado para uma rampa de $100rpm/s$ e estabilizando em $2400rpm$, como o motor é limitado a $60Hz$, atinge-se apenas a primeira velocidade crítica, visto que as demais estão acima do limite do sistema. Para medição da rotação utiliza-se um sensor indutivo com a aquisição implementada no Arduino.

No segundo mancal mede-se as acelerações na vertical e horizontal utilizando acelerômetros de baixas impedâncias da PCB do tipo ICP. O sinal passa pelo condicionador e depois é aquisitado pela placa QUANSER e enviado para o Simulink.

Os dados dessa primeira etapa são utilizados como referência para verificar o comportamento da frequência natural e amplitude durante a atuação da liga.

Na segunda etapa, instala-se os fio de nitinol no segundo mancal de forma que fiquem inclinados a 10° em relação a vertical. Assim, tem-se uma força maior atuando na vertical e uma menor na horizontal, como mostra a Figura 2. Para a fixação utiliza-se pinos roscados presos às extremidades dos fios e, evitando assim, um possível escorregamento quando o rotor aplica força elevadas. Um pino é fixo ao mancal e outro à célula de carga, esta é de baixa massa e está fixada à estrutura de suspensão do mancal. Por meio da barra roscada fixa na célula de carga pode-se regular a força inicial aplicada em cada fio, permitindo aplicar uma pré tensão nos fios.

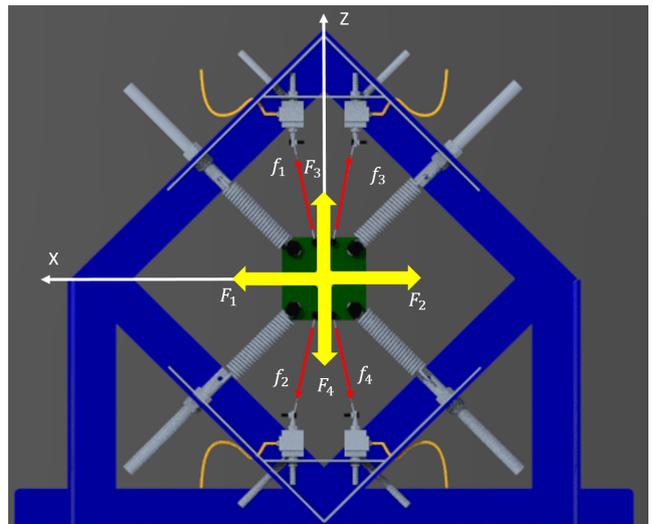


Figura 2. Esquema de forças atuando nos fios (f_1, f_2, f_3 e f_4) e suas resultantes (F_1, F_2, F_3 e F_4).

Para obter a curva de cada célula de carga, realiza-se a calibração, permitindo a conversão de tensão em mV para força em *Newton*. Devido a alta impedância e a necessidade de alimentação, a célula de carga é acoplada a um condicionador que também à alimenta com tensão conhecida e realiza a leitura do retorno, em seguida, envia para a placa de aquisição da Quanser e, posteriormente, para ao Simulink, vide Figura 3

Para realizar as medidas com os fios de nitinol aplica-se uma corrente elétrica conhecida e depois de 30 segundos é ligado o rotor, visto que ao iniciar o ensaio a liga estará estabilizada na temperatura desejada. São utilizadas quatro temperaturas nos fios: 30° , 40° , 50° e 60° , obtendo as medidas em cada temperatura. Por fim, integra-se o sinal de aceleração para obter o deslocamento do mancal nas duas direções de análise. Com as medidas de deslocamento em cada situação verifica-se o comportamento da amplitude e frequência natural com a atuação da LMF.

3. RESULTADO EXPERIMENTAL

O fio utilizado para o experimento apresenta as propriedades descritas na Tabela 1.

O fio de nitinol foi submetido ao ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC - sigla em inglês), o qual

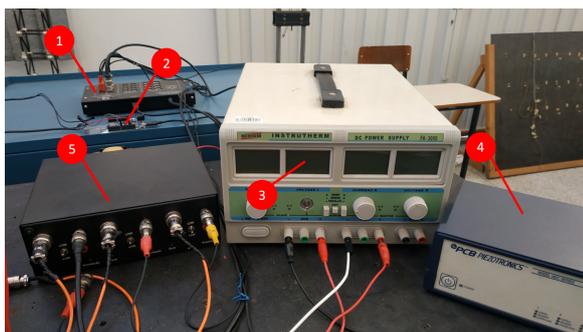


Figura 3. Equipamentos de aquisição e aquecimento da liga. 1-Placa de aquisição QUANSER Q8-USB; 2-Placa arduino para aquisição da velocidade; 3-Fonte de corrente contínua; 4-Condicionador de sinal PCB para acelerômetros ICP; 5- Alimentador e condicionador para células de carga.

Tabela 1. Parâmetros do fio de nitinol.

Parâmetro	Unidade	Valor
L	mm	100
T_{amb}	$^{\circ}C$	27
ρ	kg/m^3	4120
d	mm	0.635
C_p	$J/(kg \cdot ^{\circ}C)$	100
h	$W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$	7.5
A_f	$^{\circ}C$	90

possibilita obter as temperaturas de transição do material. O equipamento realiza o aquecimento e resfriamento da amostra de material de $-30^{\circ}C$ a $130^{\circ}C$ a uma taxa de $10^{\circ}C/min$.

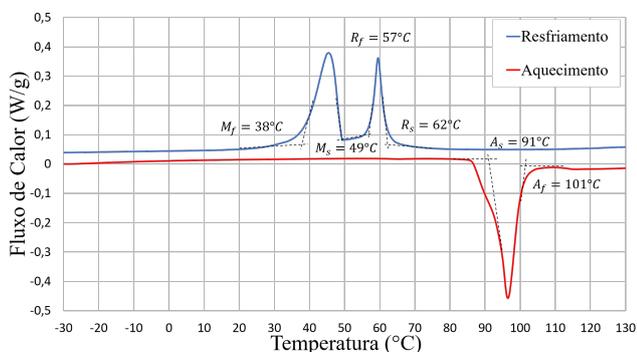


Figura 4. Ensaio DSC para obter as temperaturas de transição da martensita e austenita.

Na Figura 4 verifica-se as temperaturas de início e fim de formação de martensita (M_s , M_f), Austenita (A_s , A_f) e da fase R (R_s , R_f). A transformação ocorre de maneira assimétrica devido a baixa barreira energética da fase R durante o resfriamento, conforme Duerig and Bhattacharya (2015) apresenta em seu estudo. Essa fase é uma estrutura romboédrica, característica da martensita encontrada na forma natural, apresentando baixo efeito de memória de forma e pseudoelasticidade. Uma maneira de eliminar tal fase é apresentada por Gonzalez et al. (2010), usando o aquecimento prolongado do material a altas temperaturas.

Pela análise da Figura 4, a atuação dos fios inicia-se em uma região martensítica e conforme a temperatura

aumenta, ocorre a passagem pela fase R e se aproxima da formação de austenita.

Após obter os dados do rotor sem atuação dos fios de nitinol, são instalados os fios e efetuada a medida do deslocamento do mancal na vertical e horizontal com a atuação da liga. Para definir a tensão aplicada é utilizada a Equação (1). Ela apresenta uma relação entre temperatura da liga (T) e tensão aplicada (V), sendo obtida via análise experimental.

$$T = 92,005V + 16,306 \quad (1)$$

Com isso, realiza-se as medidas nas temperaturas de $30^{\circ}C$ ($0,15V$), $40^{\circ}C$ ($0,3V$), $50^{\circ}C$ ($0,4V$) e $60^{\circ}C$ ($0,5V$), obtendo os dados da Figura 5 para o deslocamento horizontal.

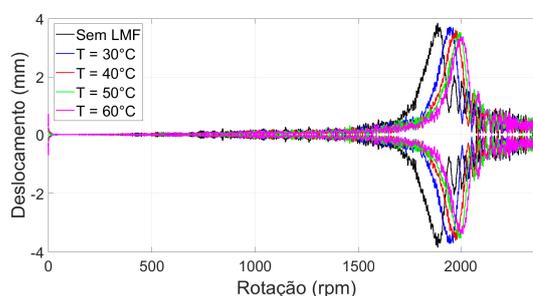


Figura 5. Deslocamento horizontal do mancal na ausência da liga e na atuação para as temperaturas de $30^{\circ}C$ ($0,15V$), $40^{\circ}C$ ($0,3V$), $50^{\circ}C$ ($0,4V$) e $60^{\circ}C$ ($0,5V$).

Observa-se a ocorrência de uma pequena redução na amplitude do deslocamento horizontal conforme a temperatura aumenta e, também, uma leve movimentação na velocidade crítica.

Para o deslocamento vertical, Figura 6, verifica-se que ocorre elevada redução de amplitude, visto que para qualquer temperatura a amplitude não consegue ser visualizada no gráfico de forma nítida. Assim, usando o domínio da frequência, verifica-se que a frequência crítica sofre leve deslocamento, mas principalmente redução de amplitude, conforme apresentado na Figura 7.

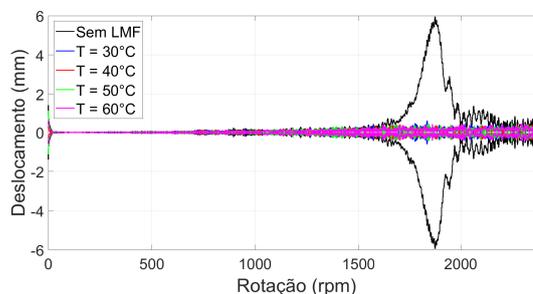


Figura 6. Deslocamento vertical do mancal na ausência da liga e na atuação para as temperaturas de $30^{\circ}C$, $40^{\circ}C$, $50^{\circ}C$ e $60^{\circ}C$.

Analisando ambos os deslocamentos, a Tabela 2 mostra a redução pequena da amplitude em relação a referência na direção horizontal e, aproximadamente, 90% de redução

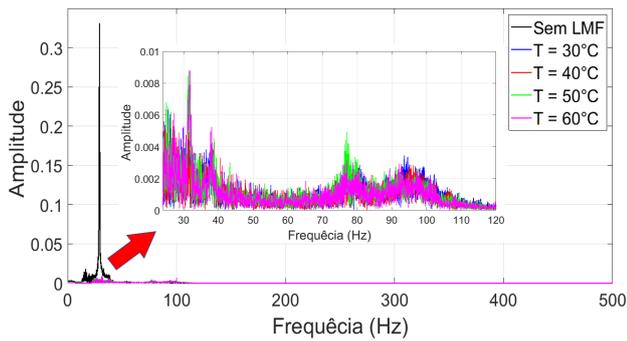


Figura 7. Deslocamento vertical do mancal na ausência da liga e na atuação para as temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C e 60°C mostrado de forma ampliada.

para a vertical, isso deve-se a disposição dos fios, aplicando a maior componente da força na vertical.

Tabela 2. Análise da amplitude na direção vertical e horizontal com a atuação da LMF.

T (°C)	D. horizontal (mm)	Redução -	D. vertical (mm)	Redução -
-	3,84	-	5,81	-
30	3,66	5%	0,591	90%
40	3,51	9%	0,59	90%
50	3,52	8%	0,59	90%
60	3,37	12%	0,50	91%

Pelos dados da tabela 3 verifica-se que ocorre o aumento da velocidade crítica nas duas direções e ele é intensificado com o aumento da temperatura, sendo que para a temperatura de 60°C o aumento é de 6, 7% na horizontal e 8, 7% na vertical.

Tabela 3. Análise da frequência crítica (F_c) na direção vertical e horizontal com a atuação da LMF.

T (°C)	F_c horizontal (Hz)	Redução -	F_c vertical (Hz)	Redução -
-	29,71	-	29,21	-
30	31,59	6,3%	31,25	7%
40	31,59	6,3%	31,40	7,5%
50	31,63	6,5%	31,63	7,6%
60	31,71	6,7%	31,75	8,7%

4. CONCLUSÕES

Por meio dos resultados apresentados, verifica-se que o aquecimento dos fios de LMF provocou a redução da amplitude do deslocamento na direção vertical, já na horizontal a influência da atuação dos fios foram menores devido a baixa intensidade da componente de força gerada pela disposição dos fios quando comparada com a vertical. Essa redução foi causada devido a propriedade pseudoelastica da liga, sendo responsável pela dissipação de energia do sistema. Além disso, a velocidade crítica nas duas situações se deslocam para a direita devido o aumento da rigidez do sistema, visto que ao aquecer o nitinol a quantidade de austenita tende a aumentar o módulo de elasticidade do material, gerando o aumento da rigidez.

Portanto, a utilização dos fios de LMF possibilitou o controle semiativo da vibração do rotor flexível, garantindo a passagem pela ressonância com menor severidade e possibilitando que a operação em regiões críticas próximas não provoquem danos ao rotor, evitando gastos elevados de manutenção, além do controle ser compacto e de massa reduzida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES (Processo: 88887.498695/2020-00) pelo auxílio financeiro concedido e a Fort Wayne Metals pela doação dos fios de Nitinol.

REFERÊNCIAS

- Alves, M.T.S. et al. (2015). Controle de vibrações em máquinas rotativas usando ligas com memória de forma.
- Borges, J., Silva, A., Araújo, C., Fernandes, E., Pimentel, R., and Santiago, A. (2013). Rotor-bearing vibration control system based on fuzzy controller and smart actuators. *The International Journal of Multiphysics*, 7(3).
- Duerig, T. and Bhattacharya, K. (2015). The influence of the r-phase on the superelastic behavior of niti. *Shape Memory and Superelasticity*, 1(2), 153–161.
- Enemark, S., Santos, I., and Savi, M.A. (2015). Shape memory alloys applied to improve rotor-bearing system dynamics - an experimental investigation. In *Anais... Proceedings of the 17th International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, ABCM*. URL <http://abcm.org.br/anais/diname/2015/PDFS/DIN-2015-0009.PDF>.
- Epps, J.J. and Chopra, I. (2001). In-flight tracking of helicopter rotor blades using shape memory alloy actuators. *Smart Materials and Structures*, 10(1), 104.
- Gonzalez, C.H., Oliveira, C.A.d.N., Pina, E.A.C.d., Urgita Filho, S.L., Araújo Filho, O.O.d., and Araújo, C.J.d. (2010). Heat treatments and thermomechanical cycling influences on the r-phase in ti-ni shape memory alloys. *Materials Research*, 13(3), 325–331.
- Ma, Y., Zhang, Q., Zhang, D., Scarpa, F., Liu, B., and Hong, J. (2015). Tuning the vibration of a rotor with shape memory alloy metal rubber supports. *Journal of Sound and Vibration*, 351, 1–16.
- Maestá, M.F. et al. (2016). Controle angular ativo de um aerofólio adaptativo utilizando fios de liga de memória de forma.
- Singh, K., Sirohi, J., and Chopra, I. (2003). An improved shape memory alloy actuator for rotor blade tracking. *Journal of intelligent material systems and structures*, 14(12), 767–786.