

Alívio de Carga de Rajada 1-cosseno Utilizando Amortecedor Magnetoreológico

Pedro Henrique Foster Stangarlin, pedro.foster@outlook.com¹

Douglas Domingues Bueno, douglas.bueno@unesp.br²

¹Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Depart. da Engenharia Mecânica, Av. Brasil Sul, 56 - Centro, Ilha Solteira - SP.

²Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Depart. de Matemática, Av. Brasil Sul, 56 - Centro, Ilha Solteira - SP.

Resumo: Fenômenos aeroelásticos de natureza catastrófica possuem potencial para comprometer o conforto e a segurança em voo, bem como reduzir o tempo de vida operacional de veículos aéreos. Durante o desenvolvimento de aeronaves, engenheiros e analistas realizam análises de resposta à forças de rajadas, conforme exigido pelas agências de certificação. Neste contexto, este artigo aborda a utilização do amortecedor magnetoreológico para alívio de carga de rajada do tipo 1-cosseno. Em especial, explora-se a variação da tensão elétrica aplicada sobre o amortecedor e a variação dos parâmetros de rajada. Os resultados obtidos por simulações computacionais mostram a eficiência do amortecedor para dissipação da energia de rajada.

Palavras-chave: Amortecedor Magnetoreológico, Carga de Rajada, 1-cosseno

1. INTRODUÇÃO

Uma aeronave durante o voo está sujeita a turbulência atmosférica em vários graus de severidade. A turbulência pode ser definida como o movimento relativo do ar no qual a aeronave imersa. Em particular, as rajadas verticais causam mudanças repentinas nas forças de sustentação e, consequentemente, na resposta dinâmica da aeronave e, devido a isto, devem ser previstas nas definições do envelope de voo (Wright and Cooper, 2007). Análises da rajada 1-cosseno são requeridas para a certificação de aeronaves desde 1956 (Regan and Jutte, 2012). Do ponto de vista do projeto estrutural, a reposta do avião em voo a rajada atmosférica é um dos mais importantes problemas de resposta dinâmica (Bisplinghoff *et al.*, 1996). Devido a isto, este trabalho discute a utilização do o amortecedor magnetoreológico como uma possibilidade de alívio de cargas de rajada, visto a sua capacidade de dissipar energia.

2. METODOLOGIA UTILIZADA

Dentre os diversos modelos presentes na literatura, neste trabalho utiliza-se o modelo de amortecedor magnetoreológico (AMR) proposto por Bouc-Wen e modificado por Spencer Spencer Jr. *et al.* (1996). Das característica deste modelo destaca-se o efeito de histerese, proporcionando comportamento teórico próximo do obtido experimental (Spencer Jr. *et al.*, 1996; Wu *et al.*, 2008). Na Fig. (1) apresenta-se uma ilustração do modelo para obtenção da força de amortecimento do AMR para o modelo de Spencer, obtida com Eq. (1), considerando a variação de tensão elétrica aplicada.

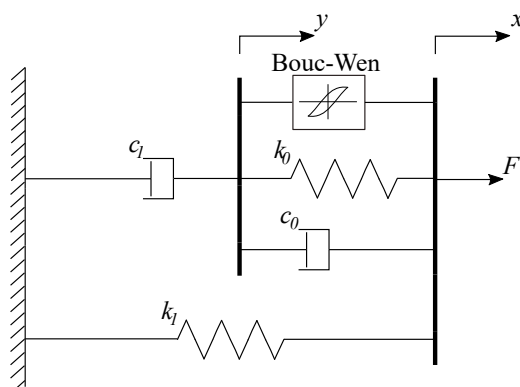


Figura 1: Ilustração do modelo de Bouc-Wen modificado proposto por Spencer Jr. *et al.* (1996).

$$f_{amr}(t) = c_1 \dot{y}(t) + k_1 [x(t) - x_0] \quad (1)$$

sendo $z(t)$ e $y(t)$ definidos como:

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= \frac{1}{(c_0 + c_1)} [\alpha z(t) + c_0 \dot{x}(t) + c_0 (x(t) - y(t))] \\ \dot{z} &= -\gamma [\dot{x}(t) - \dot{y}(t)] |z|^{n-1} - \beta [\dot{x}(t) - \dot{y}(t)] |z|^n + A [\dot{x}(t) - \dot{y}(t)] \\ \alpha &= \alpha_a + \alpha_b u_{BW} \\ c_1 &= c_{1a} + c_{1b} u_{BW} \\ c_0 &= c_{0a} + c_{0b} u_{BW} \\ \dot{u}_{BW} &= -\eta (u_{BW} - E) \end{aligned}$$

sendo z a variável evolucionária relacionada a histerese, k_1 e k_0 os coeficientes de rigidez, c_0 e c_1 os coeficientes de amortecimento viscoso para altas e baixas amplitudes de velocidade, respectivamente, x_0 o deslocamento inicial na extremidade do amortecedor. Por fim o parâmetro u_{BW} [V] depende da intensidade da tensão aplicada E [V]. O presente trabalho propõe uma redução dos valores referentes aos parâmetros do AMR presente na referência Spencer Jr. *et al.* (1996), com intuito de convergir o amortecedor para o tema proposto, estes valores se encontram na Tab. (1).

Tabela 1: Parâmetros para o modelo de Spencer.

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
c_{0a}	210 [Ns/m]	α_a	1400 [N/m]
c_{0b}	35 [Ns/mV]	α_b	6950 [N/mV]
k_0	469 [Ns/m]	γ	363 [m ⁻²]
c_{1a}	2830 [Ns/m]	β	363 [m ⁻²]
c_{1b}	29,5 [Ns/mV]	A	301
k_1	50,0 [N/m]	n	2
h_0	0 [m]	η	190 [s ⁻¹]

Neste trabalho utiliza-se o modelamento de rajada da forma 1–cosseno, que é uma idealização do efeito lombada sobre a dinâmica de voo de um sistema introduzido pela turbulência atmosférica, uma ilustração desse fenômeno é apresentado na Fig. (2). A velocidade da rajada V_g é obtida pela Eq. (2).

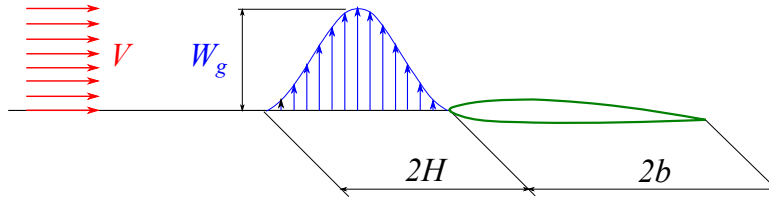


Figura 2: Ilustração do efeito da rajada no sistema aeroelástico.

$$V_g(s_g) = \begin{cases} \frac{W_g}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi s_g}{2H} \right) \right] & 0 \leq s_g \leq 2H \\ 0 & s_g > 2H \end{cases} \quad (2)$$

onde V_g é a velocidade da rajada, V a velocidade do escoamento, s_g penetração da rajada sobre o aerofólio, H o gradiente de rajada, i.e., a distância do início até o seu valor máximo e W_g é o valor percentual de 0 a 1 que define a amplitude máxima da velocidade de rajada. A variável $s_g = Vt$ representa a distância de penetração, para um sistema com semicorda aerodinâmica b em velocidade de cruzeiro V (Wright and Cooper, 2007). A força L_g gerada pela rajada 1-cosseno, para uma seção típica, pode ser calculada pela Eq. (3).

$$L_g = 2\pi b (\rho V) V_g(s_g) \quad (3)$$

A representação da seção típica de dois graus de liberdade (*pitch* e *plunge*) acoplada ao AMR encontra-se ilustrada na Figura 2. As equações do movimento da seção típica (Theodorsen, 1935), considerando-se também o amortecimento estrutural, o amortecedor magnetoreológico, as forças aerodinâmicas e a força devido a carga de rajada podem ser definidas na forma matricial como:

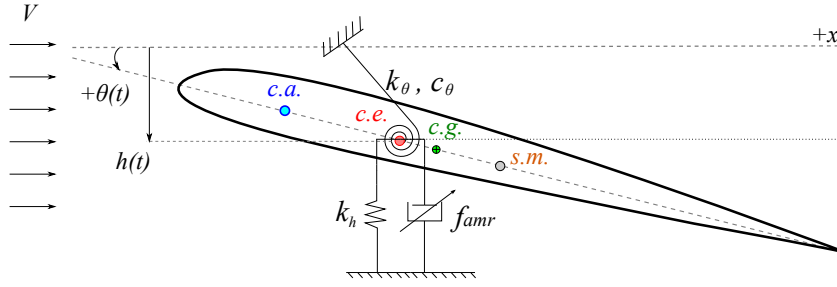


Figura 3: Ilustração da seção típica fixada.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + (\mathbf{K} - q\mathbf{Q}_a)\mathbf{u}(t) + \mathbf{F}_{amr}(t) = \mathbf{L}_g(t) \quad (4)$$

sendo,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & S_\theta \\ S_\theta & I_\theta \end{bmatrix} \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_h & 0 \\ 0 & k_\theta \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = [\alpha_e \mathbf{M} + \beta_e \mathbf{K}] \quad q\mathbf{Q}_a = \begin{bmatrix} 0 & -2\pi b \rho V^2 \\ 0 & 2\pi b^2 \rho V^2 \left(a + \frac{1}{2}\right) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{Bmatrix} h(t) \\ \theta(t) \end{Bmatrix} \quad \dot{\mathbf{u}}(t) = \begin{Bmatrix} \dot{h}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{Bmatrix} \quad \ddot{\mathbf{u}}(t) = \begin{Bmatrix} \ddot{h}(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{Bmatrix} \quad \mathbf{F}_{amr}(t) = \begin{Bmatrix} f_{amr}(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \mathbf{L}_g(t) = \begin{Bmatrix} L_g(t) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

onde $\mathbf{M}$ é a matriz de inércia, $\mathbf{K}$ a matriz de rigidez estrutural, $\mathbf{C}$ a matriz de amortecimento estrutural definida por Bueno (2007), $q\mathbf{Q}_a$ a matriz referente aos esforços aerodinâmicos, $\mathbf{F}_{amr}$ o vetor referente a força do amortecedor magnetoreológico, L_g vetor de força de rajada e $\mathbf{u}(t) = \{h(t) \quad \theta(t)\}^T$ o vetor de deslocamento. Os parâmetros fixados para a seção típica apresentam-se na Tab. (2).

Tabela 2: Parâmetros para a seção típica de dois graus de liberdade.

Parâmetros da seção típica
$m = 10$ [kg/m]
$c = 0,3$ [m]
$x_\theta = 0,01$
$f_\theta = 10$ [Hz]
$f_h = 6$ [Hz]
$r = 0,8$
$a = -0,05$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando-se algoritmos originais em ambiente *Matlab*, obteve-se a resposta da seção típica para carga de rajada definida com os parâmetro $V = 20$ m/s, $\rho = 1,125$ kg/m³, $H = 10$ e $W_g = 0,2$ s. Comparou-se então os resultados para a seção típica sem amortecimento, com amortecimento estrutural e com o amortecedor magnetoreológico, mostrado na Fig. (4). A presença do amortecedor magnetoreológico altera a amplitude máxima do sistema, em contraponto, devido ao amortecimento estrutural ser relativamente pequeno, o comportamento com amortecimento estrutural e sem amortecimento apresentam resultados próximos. Nota-se ainda que a presença do amortecedor proporciona maior conforto, visto que o sistema atinge sua amplitude máxima e retorna a sua posição de equilíbrio em um maior tempo.

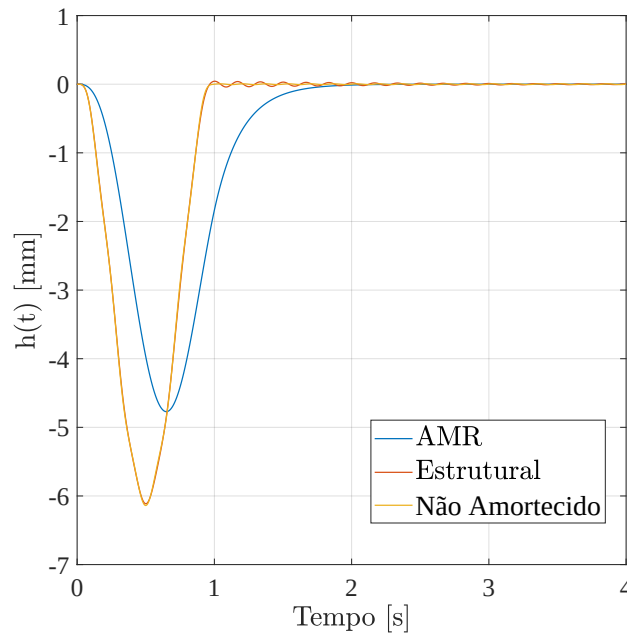


Figura 4: **Resposta vertical do aerofólio a rajada em função do tempo para o casos de sem amortecimento, com amortecimento estrutural e com o AMR.**

A resposta da seção típica para carga de rajada definida com os parâmetro $V = 30$ m/s, $\rho = 1,050$ kg/m³, $H = 8$ e $W_g = 1,2$. Nota-se na Fig. (5) que o aumento da tensão aplicada sobre o amortecedor diminui a amplitude máxima do movimento, acarreta em uma pequena defasagem entre as respostas e também ocasiona um retorno a posição de equilíbrio inicial de forma mais suave. Aumentando-se o valor da tensão aplicada de 1,0 V para 3,0 V percebe-se que o efeito não é tão marcante quanto o aumento de 0,0 V para 1,0 V, evidenciando um processo de saturação de energia dissipada pelo amortecedor, em outras palavras o ganho que amortecimento para o aumentando da tensão aplicada em valores mais elevados pouco se traduz em efeitos consideráveis no sistema. Por fim, na Fig. (6) apresenta-se o comportamento da resposta vertical do sistema no domínio da frequência em dB, destacando-se as frequências naturais e aeroelásticas do sistema, nota-se que a alteração da tensão praticamente não altera as frequências dominantes do sistema, apesar de reduzir o valor de suas respectivas amplitudes, sendo que o comportamento do amortecedor com 1,0 V e 3,0 apresentam características equivalentes.

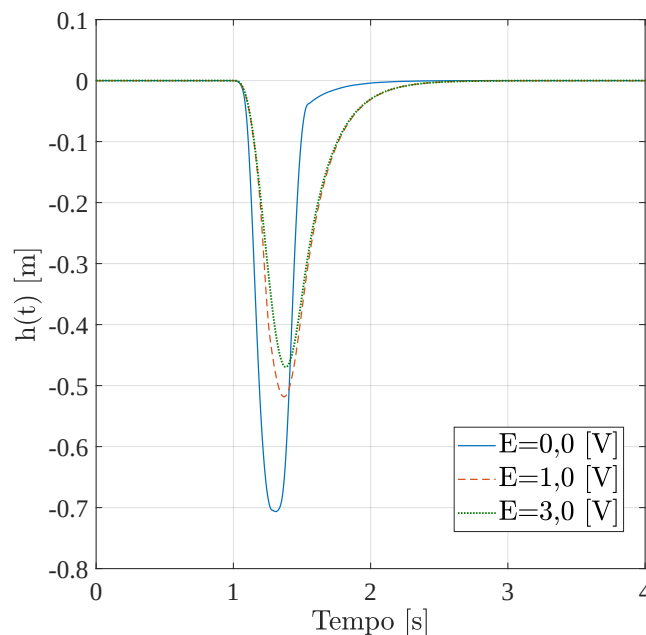


Figura 5: **Resposta vertical do aerofólio a rajada em função do tempo para diferentes valores de tensão elétrica aplicada sobre o AMR.**

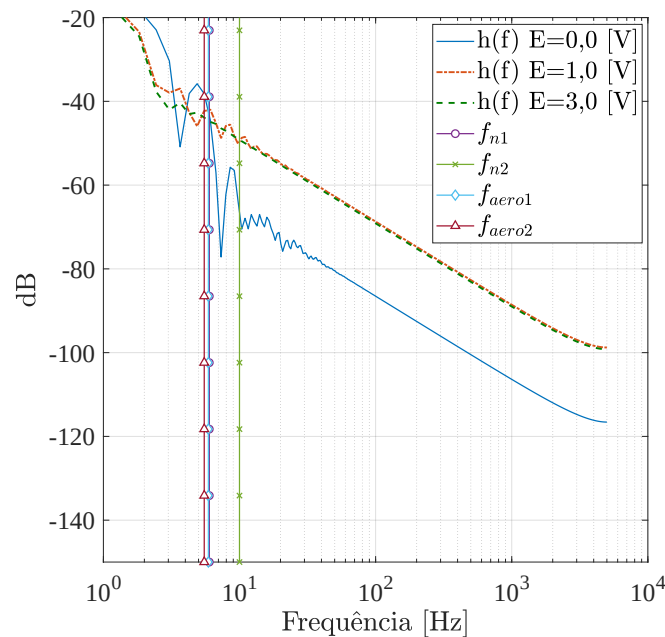


Figura 6: Resposta vertical do aerofólio a rajada no domínio da frequência para diferentes valores de tensão elétrica aplicada sobre o AMR.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados computacionais obtidos pode-se comprovar que o amortecedor magnetoreológico é um transdutor adequado para o alívio de carga de rajada 1-cosseno. Em particular, considerando a variação da tensão elétrica aplicada sobre o amortecedor é possível aumentar de forma importante o nível de dissipação de energia. No entanto, em geral, estes transdutores suportam níveis de corrente elétrica por tempo determinado, visto que elevadas durações podem danificá-los, especialmente devido ao aumento da temperatura.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP (Processo 2016/20617-0) pelo financiamento desta pesquisa e a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

6. REFERÊNCIAS

- Bisplinghoff, H.A., Raymond, L. and Halfman, R.L., 1996. *Aeroelasticity*. Dover Publications, INC.
- Bueno, D.D., 2007. *Controle ativo de vibrações e localização ótima de sensores e atuadores piezelétricos*. Master's thesis, Depto. Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), Unesp.
- Regan, C.D. and Jutte, C.V., 2012. "Survey of applications of active control technology for gust alleviation and new challenges for lighter-weight aircraft". TM 2012-216008, National Aeronautics and Space Administration (NASA). Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20120013450>.
- Spencer Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D., 1996. "Phenomenological model of a magnetorheological damper". *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 1-23, pp. 230–238. doi:10.1061/(asce)0733-9399(1997)123:3(230). Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:3\(230\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:3(230)).
- Theodorsen, T., 1935. "General theory of aerodynamic instability and the mechanism of flutter". *NACA Rept. 496*, Vol. 13, pp. 374–387. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930090935>.
- Wright, J. and Cooper, J., 2007. *Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads*. AIAA education series. John Wiley & Sons. ISBN 9781563477225.
- Wu, C., Lin, Y.C. and Hsu, D.S., 2008. "Performance test and mathematical model simulation of MR damper". In *14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

1-cosine Gust Alleviation Using Magnetorheological Damper

Pedro Henrique Foster Stangarlin, pedro.foster@outlook.com¹

Douglas Domingues Bueno, douglas.bueno@unesp.br²

¹Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Depart. da Engenharia Mecânica, Av. Brasil Sul, 56 - Centro, Ilha Solteira - SP.

²Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Depart. de Matemática, Av. Brasil Sul, 56 - Centro, Ilha Solteira - SP.

Abstract: *Aeroelastic phenomena of catastrophic nature have the potential to reduce comfort and safety in flight, as well as to reduce the operational lifetime of air vehicles. During the development of aircraft, engineers and analysts perform analysis of response to gust forces, as required by certification agencies. In particular, this article explores the use of the magnetoreological damper for 1-cosine type gust alleviation. The work investigates, the variation of the electric voltage applied on the damper and the variation of the gust parameters. The results obtained by computational simulations show the efficiency of this device to dissipate the gust energy.*

Keywords: *Magnetoreological damper, Gust, 1-cosine*