

## Controle ativo de vibrações aplicado a uma viga compósita

## Active vibration control applied to a composite beam

### RESUMO

As vibrações estão presentes na engenharia como resposta a ações dinâmicas, tanto em elementos de máquinas como estruturas. Estudá-las se tornou fundamental para o entendimento e processamento de mecanismos que possam atenuá-las. Com o avanço da tecnologia, vários materiais surgem a cada dia, estudar e analisar como se comportam é fundamental para enquadrá-los nas melhores funções que possam desenvolver. Assim sendo, o presente trabalho objetiva estudar o comportamento vibracional de uma estrutura de material compósito, e atenuar a vibração a partir do controle ativo. Para que este estudo pudesse ser feito, foi utilizado métodos matemáticos para descrever movimentos e assim aplicar métodos de controle de vibração. Com auxílio do software Matlab<sup>®</sup>, foi implementado toda modelagem da estrutura e projetado o controlador, utilizando o regulador linear quadrático (LQR - *linear quadratic regulator*), para calcular o esforço de controle necessário para alimentar o atuador eletromagnético que atua sobre a viga, gerando ainda gráficos que permitiram analisar a eficiência do controle de vibrações da viga de material compósito. Ao final, foi obtido resultados satisfatórios em relação a atenuação de vibração.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controle Ativo. LQR. Viga Compósita.

### ABSTRACT

The vibrations are present in engineering like response for dynamics actions, in machine elements and structures. Studies became essential for understanding and processing mechanism what can attenuate it. As advance the technology, many materials emerge each day, study and analyze how materials behavior is fundamental for insert it in yours best functions. Therefore, the present paper aim to study the vibrational behavior for composite structure and vibration attenuate with active control. In this study, it was used mathematic methods for describe movement and then to apply vibration control methods. With software Matlab<sup>®</sup>, it was implemented the modeling of structure and the Linear Quadratic Regulator controller was designed for calculate control effort required by the electromagnetic actuator that in the beam of composite material. Graphics were generated as result proved the validity of the proposed methodology. At last was obtained satisfactory results about vibration attenuation.

**KEYWORDS:** Active Control. LQR. Composite beam.

**Andrei Santos Oliveira**  
[andrei.oliveira.wk@gmail.com](mailto:andrei.oliveira.wk@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

**Edson Hideki Koroishi**  
[edsonh@utfpr.edu.br](mailto:edsonh@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

**Camila Albertin Xavier da Silva**  
[camilaalbertin@hotmail.com](mailto:camilaalbertin@hotmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO Página | 2

Em um ambiente industrial existem inúmeras fontes de vibrações como máquinas rotativa e alternativa, compressores, veículos de transporte, fluxo de fluidos, etc. O ônus da vibração pode ser visto em desgastes excessivos em mancais, falhas estruturais e mecânicas, manutenção frequente, afrouxamento de parafusos, trincas, fraturas em juntas soldadas, entre outros que são comuns, outros nem tanto, na indústria. Assim sendo, visa-se eliminar ou reduzir os níveis vibracionais (OGATA, 2003).

Segundo (BORGES, 2016), o controle ativo é o método mais avançado para atenuações de vibrações, é constituído, geralmente, por sensores, atuadores e uma unidade de controle. Os sensores possuem a função de fornecer informações sobre as variáveis a serem controladas. A unidade de controle processa as informações obtidas pelos sensores de forma a aplicar os algoritmos de controle correspondentes, produzindo os sinais de comando. Os atuadores, por fim, convertem os sinais de comando emitidos, pela unidade de controle, em ações efetivas sobre o sistema.

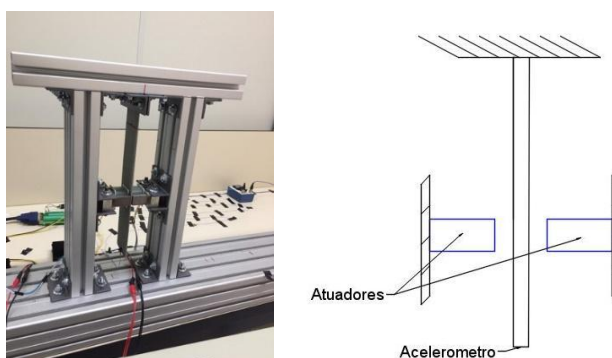
O controle ativo é uma técnica em que a força de vibração de uma estrutura é submetida a uma força contrária, fora de fase, mas com a mesma amplitude da força inicial. O resultado dessas duas forças opostas é a anulação das forças e assim a vibração da estrutura cessa (XINKE, 2007). Este tipo de controle vem apresentando aplicações bem-sucedidas em diversa áreas, entre elas, o estudo de material compósito, em função de possuir arranjo inovador, caracterizado por sua leveza, resistência mecânica e possibilidade de otimização de condições de funcionamento específico (REDDY, 1997).

Dentro deste contexto o presente trabalho dedica-se a implementar técnicas de controle ativo de vibração em uma viga de material compósito livre-engastada, utilizando Regulador Linear Quadrático (LQR- *Linear Quadratic Regulator*) para o projeto do controlador. Neste projeto, foram utilizados atuadores eletromagnéticos para aplicação da força de controle sobre a estrutura.

## MATERIAL E MÉTODOS

A estrutura com material compósito, utilizada no presente trabalho, está representado na figura a seguir, seguida da representação esquemática da estrutura.

Figura 1– Estrutura da viga compósita e representação esquemática da estrutura.



Fonte: Autoria própria.

A viga compósita possui um comprimento de 310 [mm], 59,3 [mm] de largura e 2 [mm] de espessura, formada por epoxy, fibra de vidro e tela de aço 1045. Os atuadores foram posicionados 168 [mm] abaixo do engaste da viga.

De acordo com a segunda lei de Newton, pode-se descrever o movimento de uma estrutura pela equação (1).

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C_a]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

A matriz  $[M]$  representa a matriz de massa,  $[C_a]$  de amortecimento,  $[K]$  de rigidez,  $\{x\}$  o vetor deslocamento e  $\{F\}$  a força de excitação.

Em seguida, transforma-se essa equação para modelagem em espaço de estado e temos como resultado a equação (2).

$$\begin{aligned} \{\dot{x}(t)\} &= [A]\{x(t)\} + [B_u]\{u(t)\} + [B_w]\{w(t)\} \\ \{y(t)\} &= [C]\{x(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

$\{\dot{x}(t)\}$  corresponde ao vetor de estado,  $[A]$  a matriz dinâmica  $n \times n$ ,  $[B_w]$  a matriz de entrada de excitação  $n \times m$ ,  $[B_u]$  corresponde a matriz de controle  $n \times 1$ ,  $[C]$  a matriz de saída  $s \times n$ ,  $\{u(t)\}$  a força de entrada e  $\{y(t)\}$  o vetor de saída, em que  $n$  é a ordem do sistema,  $m$  o número de entrada e  $s$  o número de saídas.

Foi aplicado a metodologia de controle modal, que apresenta a vantagem de projetar controladores com base de poucos modos de vibrar do sistema (KOROISH, 2013). As matrizes modais, que representam o sistema, foram obtidas a partir do algoritmo de identificação ERA/OKID.

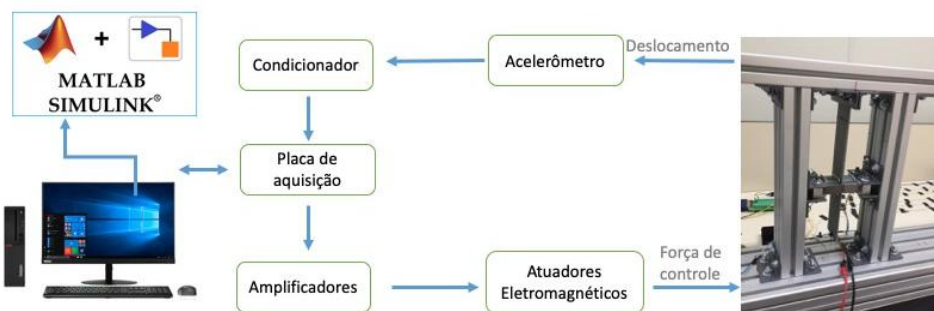
Definido o modelo matemático que descreve o comportamento da estrutura, foi projetado o regulador linear quadrático (LQR - do inglês, *Linear Quadratic Regulator*) a partir do software MATLAB®.

O LQR é uma estratégia de controle ótimo e amplamente utilizado em controle ativo de vibrações, baseado em retroalimentação no sistema (LIANG, 2018).

Para a realização do teste de vibração, foi emitido uma força de entrada, gerada pelo próprio atuador para a viga, que gerou um sinal de deslocamento, captado e mensurado pelo acelerômetro, que por sua vez emite sinal condicionado, captado e mensurado pelo condicionador que em seguida emite os valores para a placa de aquisição. A placa de aquisição tem a função de transmitir todos os dados coletados para um computador que, através do software Matlab®, analisa os esforços necessários para atenuar a vibração e envia novamente para a placa de aquisição os esforços que devem ser aplicados. A função dos amplificadores é converter a voltagem de saída da placa em corrente elétrica que irá alimentar os atuadores. Esse processo se repete até que a

vibração cesse. A Figura 2 ilustra este ciclo. Ressalta-se que no presente trabalho, foi realizada apenas simulação numérica.

Figura 2 – Representação esquemática do sistema de controle.

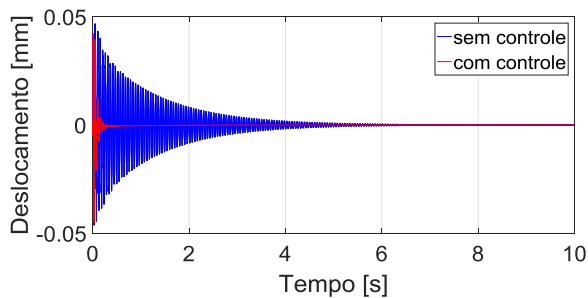


Fonte: Autoria própria.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

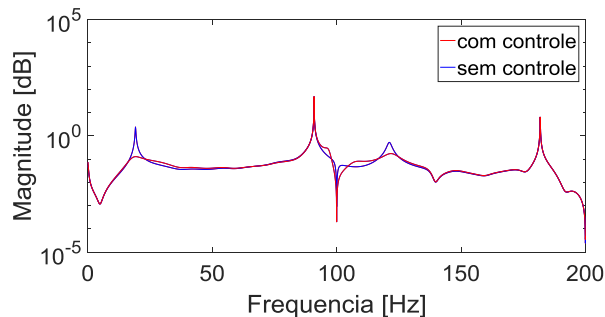
Os resultados foram obtidos através de simulação numérica realizada no software MATLAB®, a Figura 3 representa a resposta do deslocamento em função do tempo e a Figura 4 representa a Função Resposta em Frequência (FRF).

Figura 3 – Resposta determinística do deslocamento.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4 – Função Resposta em Frequência.



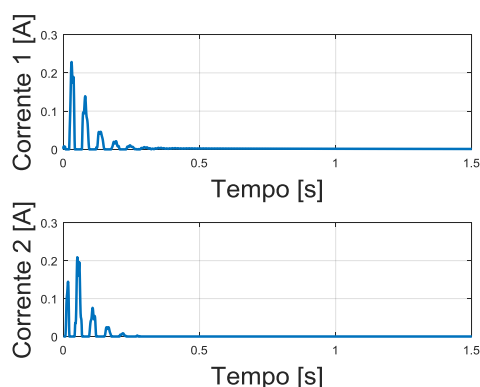
Fonte: Autoria própria.

A partir deste resultado, nota-se que houve uma atenuação da vibração no

material compósito, em que, em menos de 1 [s] atinge a estabilidade, ao passo que a resposta sem controle leva aproximadamente 6 [s]. Pela FRF nota-se a atenuação também nos picos de frequência dos dois modos de vibrar da viga compósita, o primeiro localizado aproximadamente em 19 [Hz] e o segundo em 121 [Hz].

Por fim, foi analisado o comportamento da corrente elétrica utilizada pelos dois atuadores eletromagnéticos, representando o esforço de controle utilizado para atenuar a vibração. O gráfico está dividido em dois por representar cada atuador, como mostra a Figura 5, que representa todo sistema vibratório.

Figura 5 – Corrente elétrica em função do tempo.



Fonte: Autoria própria.

Conforme a figura acima, nota-se uma maior utilização de corrente no início, uma vez que as forças para diminuir a vibração devem ser maiores pela vibração ter amplitudes maiores, resultando assim na diminuição das oscilações da viga com maior rapidez.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível notar com os resultados de simulação computacional a notável relevância de um sistema de controle para atenuações de vibrações em vigas compósitas. Em próximos trabalhos serão utilizados outros tipos de controle, envolvendo outras variáveis para um melhor estudo sobre atenuações de vibrações.

## REFERÊNCIAS

- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**, Prentice-Hall do Brasil, São Paulo, Brazil, p. 788, 2003.
- BORGES, A.S. **Controle Modal de Rotores com Mancais Magnéticos – Projeto Robusto**. 197 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- XINKE, G. and HAIMIN, T. **Active vibration control of a cantilever beam using bonded piezoelectric sensors and actuators**. In: Electronic Measurement and Instruments, 2007. ICEMI'07. 8th International Conference on. IEEE, p. 4-85-4-88,

2007.

Página | 6

REDDY, J.N., **Mechanics of Laminated Composite Plates: Theory and Analysis, Second Edition**, CRC Press, London, UK, 1997.

KOROISHI, E. H. **Controle de Vibrações em Máquinas Rotativas utilizando Atuadores Eletromagnéticos**. 2013. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG

L. LIANG; J. YUAN; S. ZHANG; P. ZHAO. **Design a software real-time operation platform for wave piercing catamarans motion control using linear quadratic regulator based genetic algorithm**. Public Library of Science, v. 13(4), 2018

### AGRADECIMENTOS

Agradecemos a UTFPR e a CNPq (Processo 402581/2016-4) por apoiar este trabalho.