

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo deste relatório será disponibilizado somente a partir de 10/08/2026.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Relatório de Pós-Doutorado

Desenvolvimento de Metamateriais Programáveis para
Isolamento de Vibração e Ruídos em Painéis Aeronáuticos

Autor: Dr. Fabio Mazzariol Santicioli
Supervisor: Prof. Dr. Paulo José Paupitz Gonçalves

Campus de Bauru
2024

Resumo

O controle de vibrações é um problema notável na engenharia, tendo o desenvolvimento de metamateriais como foco atual e promissor. Este estágio de pós-doutorado buscou colaborar com a área, propondo soluções para o controle de vibrações em metaestruturas por meio da aplicação de neutralizadores de vibração tipo arco, considerando-se o desvio de frequências naturais oriundo da manufatura. Inicialmente, foi feita uma revisão bibliográfica a respeito deste tipo de neutralizador e sobre estratégias de organização de metaestruturas em desordem. Na sequência foram propostos modelos matemáticos para o neutralizador tipo arco e foram manufaturadas amostras. O desempenho dos modelos foram comparados ao desempenho das amostradas, apontando boa correlação. A partir destes dados, metaestruturas foram modeladas e construídas (considerando estratégias de organização documentadas na literatura) também apresentado resultados correlacionáveis. Ao final, conclui-se sobre as vantagens e desvantagens de cada estratégia de organização dos neutralizadores empregada nos demonstradores concebidos. Este relatório científico se encerra documentando as orientações sob responsabilidade do estagiário de pós-doutorado, as disciplinas que ministrou parcialmente em conjunto com o supervisor, bem como os comentários do supervisor sobre a pesquisa.

Palavras-chave: metamateriais; modelagem; neutralizador; vibrações.

Sumário

1	Introdução	4
2	Objetivos	7
3	Materiais e Métodos	7
3.1	Modelo 1: Elementos de Arco e Viga	7
3.2	Modelo 2: Elementos Finitos	11
3.3	Modelo 3: Elementos Espectrais	11
3.4	Amostras Manufaturadas	11
3.5	Estratégia de Organização	12
4	Resultados	13
4.1	Análise dos Neutralizadores	13
4.1.1	Frequência Natural do Primeiro Modo Vertical	13
4.1.2	Resultados das Simulações e dos Experimentos	14
4.2	Análise da Metaestrutura	14
4.2.1	Simulações com a Metaestrutura	14
4.2.2	Experimentos com a Metaestrutura	15
5	Discussão	16
6	Orientações	17
7	Disciplinas Ministradas	17
8	Comentários do Supervisor	17
	Referências Bibliográficas	18
	Apêndice A	20

1 Introdução

A engenharia moderna tem propiciado a concepção de estruturas otimizadas, com grande êxito na minimização de massa, volume e, conseqüentemente, custos, representando um triunfo projetual e tecnológico. Por outro lado, estruturas com estas características comumente apresentam problemas de desempenho quando à atenuação de vibração e ruído. Nesse contexto, os metamateriais se apresentam como soluções promissoras. Os metamateriais são formados ao acrescentarem-se subestruturas celulares ínfimas às estruturas principais, interferindo o mínimo possível na massa e no volume da estrutura resultante que pode ser tratada como um novo material com propriedades dinâmicas a serem exploradas [1].

Um metamaterial acústico, na literatura, por vezes se refere a um material localmente ressonante, enquanto outras vezes inclui cristais fonônicos com espalhamento de Bragg [2]. O produto de um metamaterial acústico é a formação de bandas de atenuação. Um grande desafio acadêmico é propor metamateriais com bandas de atenuação mais largas, especificamente em baixas frequências [3].

Quanto ao padrão de organização, os ressonadores podem ser associados às estruturas hospedeiras em ordem ou em desordem. Especificamente, a distribuição espacial dos ressonadores pode ser periódica ou não periódica. Quanto à frequência natural, os ressonadores são classificados como homogêneos quando ajustados com as mesmas frequências naturais e heterogêneos quando sintonizados para frequências naturais diferentes. A desordem altera significativamente as bandas de atenuação, pode ser introduzida ocasionalmente devido variações oriundas dos processos de manufatura dos metamateriais, mas também pode ser provocada intencionalmente na fase projetual [4, 5].

Zhang et al. [6] demonstraram que a atenuação de vibrações em estruturas dotadas de conjuntos de atuadores piezoelétricos pode ser melhorada em heterogeneidade, especificamente sintonizando-se as frequências naturais destes atuadores para valores distintos e vizinhos. Para isso, foi concebido um demonstrador constituído por uma viga dotada de atuadores piezoelétricos, distribuídos não periodicamente de forma randômica, avaliado experimentalmente nos cenários de homogeneidade e heterogeneidade.

Celli et al. [7] estudaram experimentalmente os efeitos da heterogeneidade de ressonadores sobre a banda de atenuação de uma estrutura hospedeira no formato de placa. Comparando-se a estrutura em homogeneidade a dois casos de aplicação de ressonadores heterogêneos em gradientes de sintonia de frequência natural, obteve-se o alargamento da banda de atenuação, acompanhado de redução da transmissibilidade. Já, observando-se um caso com ressonadores sintonizados randomicamente, obteve-se um maior alargamento, mas com aumento da transmissibilidade.

Fabro et al. [5] estudaram os efeitos da variação suave de propriedades de material e de randomização espacial sobre o desempenho de metamateriais compostos por viga dotada de ressonadores. Considerando variações determinísticas e estocásticas das rigidezes dos ressonadores,

foram notados efeitos de diminuição de transmissibilidade acompanhada do alargamento da banda de atenuação.

Em outro trabalho, Fabro et al. [8] afirmam que um desvio do projeto periódico típico, por meio de abordagens quase-periódicas, é capaz de melhorar significativamente o desempenho dinâmico dos metamateriais, alargando a banda de atenuação. Os autores notam que uma combinação de um perfil de gradiente com algum nível de desordem tende a proporcionar uma melhor atenuação de vibração. Para estes estudos, foi modelado um metamaterial com vibrações flexurais e ressonadores periodicamente espaçados. A desordem correlacionada foi introduzida por meio das massas dos ressonadores (e suas resultantes sintonias), calculadas em função da expansão de Karhunen-Loève, que descreve campos randômicos. Observou-se, também, que esta estratégia de projeto de metamateriais reduz os efeitos dos modos nas bordas da banda de atenuação. Ao final, os autores sugerem que há um evidente vínculo com estruturas inteligentes, dotadas de atuadores piezoelétricos ou ressonadores SMA, uma vez que a sintonia randomizada de cada ressonador pode ser facilmente ajustada em tempo real.

Thomes, Mosquera-Sánchez e De Marqui [9] desenvolveram um processo de otimização, por meio de algoritmo genético, para governar a desordem em um metamaterial com ressonadores locais piezoelétricos a fim de alargar a banda de atenuação. Como objeto de estudo, adotou-se uma viga fina bimorfa livre-livre, sujeita a excitação harmônica e modelada por elementos finitos eletromecanicamente acoplados, com cada célula unitária conectada a um circuito ressonante. Foram estudados dois casos de otimização envolvendo periodicidade, não periodicidade, heterogeneidade e homogeneidade. No primeiro caso, o algoritmo tinha como objetivo maximizar a largura da banda de atenuação em um ponto específico da viga. Para isso, utilizou-se como função de objetivo uma única FRF definida pela razão entre o deslocamento transversal de uma extremidade da viga e a excitação aplicada à outra extremidade da viga. No segundo caso, foram abordadas várias FRFs ao longo de toda a viga como funções de objetivo. Desta maneira, foi possível evitar localização de energia de vibração simultaneamente à redução de transmissibilidade por meio da aplicação ótima de desordem.

Quando um ressonador local é composto por um elemento de rigidez e um elemento de massa e tem sua frequência natural sintonizada para controlar vibrações em uma frequência alvo em um sistema harmonicamente forçado, pode ser denominado “neutralizador” [10]. Li et al. [11] propuseram uma estratégia prática de organização para sintonizar metamateriais com desvios na frequência natural dos neutralizadores. Eles apontaram e demonstraram que, para melhor desempenho de atenuação, o neutralizador com menor desvio da frequência alvo deve ser colocado na célula unitária mais próxima da fonte de excitação. Para o critério de desempenho de atenuação, os autores propuseram a “resposta espacial máxima média na frequência”. Considerando uma população de metamateriais composta por permutações de neutralizadores com desvios, a distribuição de

desempenho da população ordenada aproximou-se do desempenho do metamaterial ordenado ideal.

Neste projeto de pesquisa de pós-doutorado, observaram-se os efeitos dos desvios de fabricação de neutralizadores no desempenho de atenuação de uma metaestrutura heterogênea resultante. Para isso, contribuiu-se sobre as estratégias de organização de Li et al. [11] e sobre o neutralizador com aplicações aeronáuticas proposto por Pires et al. [12].

Pires et al. [12] projetou um interessante neutralizador para atenuação de vibrações em painéis aeronáuticos. Sua estrutura é fina e simétrica; a partir da base ascendem de cada lado vigas curvas e retas, unindo-se a um anel central para fixação da massa de sintonia do neutralizador. Sua base pode ser anexada à estrutura hospedeira. A frequência natural do neutralizador resulta de sua forma, material e massa de sintonia, portanto pode ser parametrizada geometricamente (por $dim_{1,2,3,4}$) e adequadamente projetada para uma frequência alvo. Esse neutralizador pode ser fabricado por manufatura aditiva ou corte a laser, portanto é passível de customização.

Pires et al. [12] modelaram numericamente este neutralizador tipo arco aplicado a um painel aeronáutico e verificaram experimentalmente a ocorrência de bandas de atenuação em torno de uma frequência alvo. Tal solução é promissora e permanecem abertas oportunidades de pesquisa sobre modelagem mecânica e sobre desordem da metaestrutura. Neste estágio de pós-doutorado, propuseram-se modelos adicionais do neutralizador tipo arco (por meio de modelagem analítica simplificada, método dos elementos finitos e método dos elementos espectrais) e incluiu-se desordem considerando erros de fabricação que implicam em desvios nas frequências naturais das amostras de neutralizadores. Além disso, os neutralizadores foram aplicados em uma metaestrutura e derivou-se de Li et al. [11] uma estratégia de organização para selecionar e organizar os neutralizadores heterogêneos com foco na atenuação de vibrações. Por fim, foi possível concluir sobre o desempenho e o comportamento da metaestrutura resultante considerando a heterogeneidade.

O restante do presente documento segue os “Objetivos”. Na sequência, encontram-se seções sobre “Materiais e Métodos”, contendo os modelos matemáticos autorais propostos para o neutralizador, além da descrição da manufatura dos neutralizadores e das estratégias de organização dos neutralizadores na metaestrutura. Na seção “Resultados”, os modelos propostos são analisados perante experimentos conduzidos sobre as amostras, sendo as metaestruturas resultantes avaliadas experimentalmente e numericamente. Completando o documento, apresentam-se as “Discussões”, as “Orientações”, as “Disciplinas Ministradas”, os “Comentários do Supervisor” e o “Apêndice A”. Este documento é uma versão reduzida, com a supressão de figuras, para proteção de direitos autorais de publicações resultantes da pesquisa.

8 Comentários do Supervisor

Este estágio de pós-doutorado foi planejado para o período de 01 de abril de 2023 até 31 de dezembro de 2025. Entretanto, foi encerrado em 31 de julho de 2024, dada a contratação do então supervisionado como Professor Colaborador, no Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Bauru.

Mesmo com a interrupção antecipada, as atividades propostas para o período integralizado foram realizadas com sucesso. O estagiário propôs modelos para o neutralizador tipo arco, viabilizou a construção de amostradas, as analisou experimentalmente e detectou correlações com os modelos. Também identificou na literatura estratégias de organização de neutralizadores com frequências

naturais heterogêneas (consequentes do processo de manufatura) e as implementou por meio de modelos e experimentos. Novamente, o supervisionado foi capaz de traçar correlações entre modelos e experimentos. Por fim, identificou as vantagens e desvantagens de cada estratégia de organização.

Desta maneira, pode-se afirmar que, para o prazo transcorrido, todos os objetivos foram alcançados e que a interrupção antecipada foi devidamente justificada pela oportunidade de crescimento profissional do supervisionado.

Referências Bibliográficas

- [1] P. S. B. Srajan Dalela, D. P. Jena, A review on application of mechanical metamaterials for vibration control, *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 29 (2022) 3237–3262. doi:10.1080/15376494.2021.1892244.
- [2] P. Schürch, L. Philippe, Composite metamaterials: Types and synthesis, in: D. Brabazon (Ed.), *Encyclopedia of Materials: Composites*, Elsevier, Oxford, 2021, pp. 390–401. doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.11750-3.
- [3] A. Valipour, M. H. Kargozarfard, M. Rakhshi, A. Yaghootian, H. M. Sedighi, Metamaterials and their applications: An overview, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 236 (2022) 2171–2210. doi:10.1177/1464420721995858.
- [4] X. An, H. Fan, C. Zhang, Elastic wave and vibration bandgaps in two-dimensional acoustic metamaterials with resonators and disorders, *Wave Motion* 80 (2018) 69–81. doi:10.1016/j.wavemoti.2018.04.002.
- [5] A. T. Fabro, D. Beli, N. S. Ferguson, J. R. F. Arruda, B. R. Mace, Wave and vibration analysis of elastic metamaterial and phononic crystal beams with slowly varying properties, *Wave Motion* 103 (2021) 102728. doi:10.1016/j.wavemoti.2021.102728.
- [6] W. Zhang, P. Celli, D. Cardella, S. Gonella, A disorder-based strategy for tunable, broadband wave attenuation, in: T. Kundu (Ed.), *Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2017*, volume 10170, International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2017, p. 101700F. doi:10.1117/12.2258605.
- [7] P. Celli, B. Yousefzadeh, C. Daraio, S. Gonella, Bandgap widening by disorder in rainbow metamaterials, *Applied Physics Letters* 114 (2019) 091903. doi:10.1063/1.5081916.

- [8] A. Fabro, H. Meng, D. Chronopoulos, Correlated disorder in rainbow metamaterials for vibration attenuation, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 235 (2021) 2610–2621. doi:10.1177/0954406220986596.
- [9] R. L. Thomes, J. A. Mosquera-Sánchez, C. De Marqui, Bandgap widening by optimized disorder in one-dimensional locally resonant piezoelectric metamaterials, *Journal of Sound and Vibration* 512 (2021) 116369. doi:10.1016/j.jsv.2021.116369.
- [10] G. F. Nehemy, E. Rustighi, P. J. P. Gonçalves, M. J. Brennan, A passive self-tuning vibration neutraliser using nonlinear coupling between the degrees of freedom, *Mechanical Systems and Signal Processing* 185 (2023) 109786. doi:10.1016/j.ymssp.2022.109786.
- [11] A. Li, Y. Fan, Y. Wu, L. Li, K. Yi, Retuning the disordered periodic structures by sorting unit cells: Numerical analyses and experimental studies, *Journal of Sound and Vibration* 566 (2023) 117925. doi:10.1016/j.jsv.2023.117925.
- [12] F. A. Pires, M. Wandel, C. Thomas, E. Deckers, W. Desmet, C. Claeys, Improving the sound transmission loss of an aircraft ceiling panel by locally resonant metamaterials, in: *12th International Styrian Noise, Vibration & Harshness Congress: The European Automotive Noise Conference*, SAE International, 2022. doi:10.4271/2022-01-0960.
- [13] R. Palaninathan, P. Chandrasekharan, Curved beam element stiffness matrix formulation, *Computers & Structures* 21 (1985) 663–669. doi:10.1016/0045-7949(85)90143-9.
- [14] B. Bozyigit, Y. Yesilce, S. Acikgoz, Free vibration analysis of arch-frames using the dynamic stiffness approach, *Vibroengineering Procedia* 30 (2020) 72–78. doi:10.21595/vp.2020.21291.
- [15] U. Lee, Dynamic characterization of the joints in a beam structure by using spectral element method, *Shock and Vibration* 8 (2001) 357–366. doi:10.1155/2001/254020.
- [16] U. Lee, Vibration analysis of one-dimensional structures using the spectral transfer matrix method, *Engineering Structures* 22 (2000) 681–690. doi:10.1016/S0141-0296(99)00002-4.
- [17] Y. Liao, V. Wells, Estimation of complex young’s modulus of non-stiff materials using a modified oberst beam technique, *Journal of Sound and Vibration* 316 (2008) 87–100. doi:10.1016/j.jsv.2008.02.028.

Apêndice A

Tabela 1: Dimensões controladas do neutralizador A

Número da amostra	dim_1 [mm]	dim_2 [mm]	dim_3 [mm]	dim_4 [mm]
1	59.45	49.80	1.70	5.25
2	60.25	49.45	1.70	5.00
3	59.65	50.00	1.80	5.15
4	59.60	49.95	1.80	5.20
5	59.65	49.70	1.75	5.30
6	59.45	49.60	1.80	5.30
7	59.55	49.85	1.80	5.20
8	59.65	49.75	1.80	5.10
9	59.50	49.50	1.70	5.30
10	60.10	49.75	1.70	5.05

Tabela 2: Dimensões controladas do neutralizador B

Número da amostra	dim_1 [mm]	dim_2 [mm]	dim_3 [mm]	dim_4 [mm]
1	60.45	45.75	1.70	5.00
2	60.10	45.85	1.80	5.00
3	60.05	44.70	1.75	5.05
4	60.50	45.35	1.70	5.05
5	59.65	45.75	1.75	5.10
6	60.40	45.65	1.75	5.00
7	60.35	45.50	1.75	5.00
8	60.20	46.00	1.70	5.00
9	59.40	46.70	1.70	5.10
10	59.80	45.60	1.80	5.10

Tabela 3: Dimensões controladas do neutralizador C

Número da amostra	dim_1 [mm]	dim_2 [mm]	dim_3 [mm]	dim_4 [mm]
1	59.40	27.15	1.75	5.50
2	59.55	27.20	1.70	5.40
3	59.50	27.00	1.80	5.40
4	59.50	27.00	1.80	5.40
5	59.90	26.80	1.80	5.45
6	59.50	26.70	1.75	5.60
7	59.50	26.80	1.80	5.45
8	59.30	27.10	1.75	5.40
9	59.60	27.00	1.75	5.40
10	59.50	27.00	1.75	5.50

Tabela 4: Dimensões controladas do neutralizador D

Número da amostra	dim_1 [mm]	dim_2 [mm]	dim_3 [mm]	dim_4 [mm]
1	59.30	9.45	1.80	5.20
2	60.20	9.70	1.75	5.00
3	59.40	9.50	1.70	5.20
4	60.20	9.70	1.80	5.05
5	60.00	9.65	1.70	5.00
6	60.30	9.70	1.80	5.00
7	60.25	9.65	1.80	5.05
8	60.30	9.75	1.80	5.00
9	60.25	9.70	1.75	5.00
10	60.20	9.70	1.80	5.00