

Utilização de Estruturas Periódicas de Metaconcreto para Controle Passivo de Vibrações Mecânicas

Bolsista: Igor Farias Chagas¹
Orientador: Dr. Edson Jansen Pedrosa de Miranda Junior²
Co-orientador: Dr. Antonio Ernandes Macedo Paiva³
Co-orientador: Dr. Andre Pereira Santana⁴
Colaborador: Marvin Barros de Miranda Sales⁵
Colaborador: Bruno César Cunha Araújo⁶
Colaborador: Maykon Lindoso Brito⁷
Colaborador: Mateus De Jesus Rabelo Vieira⁸

¹Instituto Federal do Maranhão (IFMA) e-mail: igor.f@acad.ifma.edu.br

²Instituto Federal do Maranhão (IFMA) e-mail: edson.jansen@ifma.edu.br

³Instituto Federal do Maranhão (IFMA) e-mail: prof.ernandes@acad.ifma.edu.br

⁴Instituto Federal do Maranhão (IFMA) e-mail: andre@ifma.edu.br

⁵Instituto Federal do Maranhão (IFMA) e-mail: engmarvinbmsales@gmail.com

⁶Instituto Federal do Maranhão (IFMA) e-mail:

⁷Instituto Federal do Maranhão (IFMA) e-mail:

⁸Instituto Federal do Maranhão (IFMA) e-mail: m.rabelo@acad.ifma.edu.br

Resumo

Este trabalho analisa a atenuação de vibrações em um metamaterial 2D, utilizando dois métodos: o Método de Expansão em Ondas Planas Melhorado (*IPWE*) e o Método dos Elementos Finitos (*MEF*) via COMSOL Multiphysics. A pesquisa compara os resultados de dispersão e *bandgaps* entre os métodos, bem como entre o concreto tradicional e o metaconcreto, avaliando a influência das propriedades mecânicas na formação de *bandgaps* e modos de onda. O estudo apresenta baixo custo computacional, evidencia o potencial do metaconcreto e sugere futuras investigações para otimização da atenuação de vibração.

Palavras-chave: *IPWE*, *MEF*, dispersão, *bandgaps*, Metaconcreto

Financia

Este trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC).

Introdução

Ressalta-se que este projeto se trata de renovação. O estudo de vibrações na engenharia tem crescido ao redor do mundo devido à necessidade de melhorar o desempenho estrutural, de modo a reduzir os níveis de vibração para limites aceitáveis para o concreto em dadas situações, recorrendo-se a técnicas de controle de vibrações de carácter passivo ou ativo. No estudo de vibrações, as ondas de flexão são notórias devido à grande de energia vibratória, assim, o seu controle se torna um fator importante para as estruturas,

tais como as placas, amplamente utilizadas em lajes de pisos e pontes ou muros de contenção. O metaconcreto é um novo tipo de concreto formado de agregados ressonantes, composto por um núcleo sólido revestido por um material macio, configuração esta que permite a redução da vibração sob carregamentos. Neste contexto, este trabalho visa estudar a estrutura de bandas de ondas de flexão de um metaconcreto, aplicando a teoria de placas finas associada ao método de ondas planas melhorado (IPWE), considerando núcleos cilíndricos metálicos revestidos por material polimérico, dispostos em uma rede quadrada. As influências de parâmetros geométricos dos ressonadores, densidade do núcleo e módulo de elasticidade do revestimento são analisadas através de algoritmo implementado em MATLAB®. Os resultados revelarão se a largura e localização dos bandgaps são dependentes do diâmetro e densidade do núcleo, espessura e rigidez do revestimento e do contraste dos parâmetros elásticos dos materiais dos ressonadores, demonstrando a possibilidade de ajuste da frequência desejada conforme a configuração dos ressonadores para utilização no controle passivo de vibrações de flexão através de placas finas de metaconcreto.

Metodologia / Material e Métodos

O trabalho utiliza simulações numéricas a partir de dois métodos distintos: o Método da Expansão em Ondas Planas Melhorado (*Improved Plane Wave Expansion – IPWE*) e o Método dos Elementos Finitos (*MEF*), implementado no software COMSOL Multiphysics. São analisadas combinações periódicas de materiais em uma matriz quadrada, com núcleo metálico revestido por um material macio, formando o metaconcreto, a fim de gerar o gráfico de dispersão que evidencia as regiões de formação de *bandgaps*.

Ferramentas

Método de Expansão em Ondas Planas Melhorado (IPWE): é um método semianalítico empregado em estruturas de compósitos artificiais periódicos, utilizado para analisar *bandgaps* em materiais isotrópicos. Esse método baseia-se na decomposição de ondas em uma série de ondas planas, expressa como uma série de Fourier, que permite a formulação de um problema de autovalor e autovetor, gerando uma solução linear geral que descreve o comportamento oscilatório e a distribuição do deslocamento. Sua funcionalidade é semelhante à do método tradicional de Expansão em Ondas Planas, mas o *IPWE* tem como objetivo superar as limitações do modelo convencional.

Para um modelo bidimensional (2D), a solução é escrita considerando a periodicidade da teoria de Floquet-Bloch:

$$u(r) = e^{ikr} u_k(r) \quad (1)$$

onde:

- $u(r)$: campo de onda de deslocamento
- k : vetor de onda reduzido (dentro da 1ª zona de Brillouin),
- $u_k(r)$: função periódica com a mesma periodicidade do cristal.

A partir dessa equação, é possível resolver a equação do movimento proposta por Kirchhoff-Love. Após aplicar as condições periódicas de Floquet-Bloch para o deslocamento, realizar a transformada de Fourier para passar do domínio do tempo para o domínio da frequência e expandir as funções de densidade e amplitude de onda, obtemos a seguinte relação:

$$\mathbf{B}u = \omega^2 \mathbf{C}u \quad (2)$$

A equação (2) representa o problema de autovalor e autovetor $\omega(k)$ obtido pelo *IPWE*, em que u e ω correspondem ao deslocamento e à frequência angular, respectivamente. Como o problema envolve infinitos termos, é necessário truncar o número de termos em um intervalo $[-M, \dots, M] \in \mathbb{Z}$, de modo que o número de ondas seja $(2M + 1)^2$. Além disso, a generalização do problema é feita dentro da primeira zona de Brillouin, que representa a menor unidade que descreve o padrão de difração e as estruturas de bandas de energia em um cristal (Kittel et al., 2005).

Comsol Multiphysics: Utilizado para uma ampla gama de simulações baseadas no Método dos Elementos Finitos (*MEF*). O software permite a modelagem de células unitárias com condições periódicas, possibilitando o estudo das propriedades mecânicas e acústicas dos materiais.

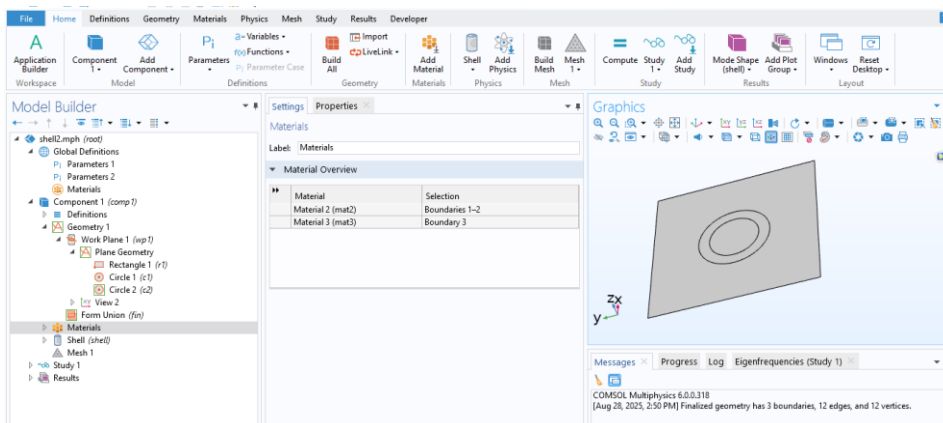


Figura 1. Interface gráfica do COMSOL, mostrando a criação de uma célula unitária dividida em três materiais para a simulação do comportamento mecânico

Fonte: Autor

Procedimento:

1. Formação de duas combinações de materiais
 - 1ª combinação: Concreto C30
 - 2ª combinação: Concreto C30, Nylon e Aço A36
2. Implementação do método *IPWE* em código MATLAB para gerar gráficos de dispersão.
3. Simulação no COMSOL de uma célula com condições periódicas, também gerando gráficos de dispersão.
4. Exportação dos dados do COMSOL para o MATLAB, onde os gráficos gerados pelos dois métodos são comparados.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos para a comparação da atenuação de vibrações em um sistema com periodicidade 2D, entre o metacimento com núcleo metálico revestido por material macio e o concreto tradicional, bem como a influência das propriedades dos dois materiais acoplados na formação e largura de *bandgaps*, com base nos trabalhos de Miranda Jr. (2018, 2019).

Geometria/Propriedades	Valores
Comprimento e largura da célula unitária= a	30 mm
Espessura da célula unitária	3mm
Modulo de Young (E_a, E_b, E_c)	30GPa/ 1GPa /210GPa/
Densidade (ρ_a, ρ_b, ρ_c)	$2500 \frac{m^3}{kg}$ / $1150 \frac{m^3}{kg}$ / $7800 \frac{m^3}{kg}$
Módulo de Poisson (ν_a, ν_b, ν_c)	0,2 / 0,4/0,30
Diâmetro do núcleo	8mm
Diâmetro do revestimento	13mm

Tabela 1: Propriedades e geometria dos materiais

Fonte: Carvalho, 2022

A tabela (1) apresenta algumas propriedades e geometria da célula do metamaterial, sendo nesse caso a célula quadrada, comprimento e largura iguais, a espessura usada para a simulação numérica. Os subíndices a, b, c são para distinguir os três materiais utilizados

para formar a célula unitária do metacimento, sendo respectivamente, Concreto C30, Aço A36 e Nylon.

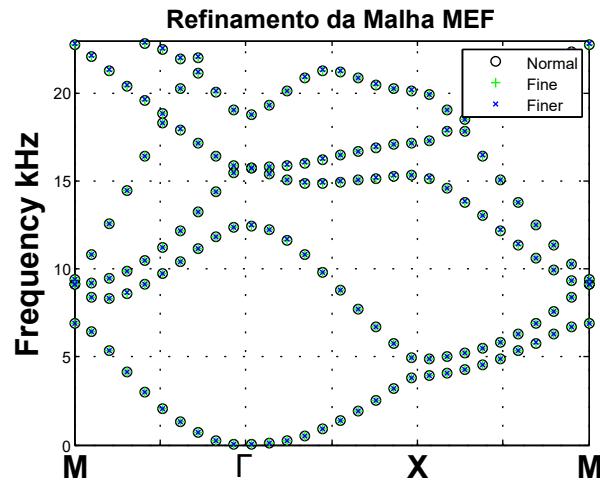


Figura 2: Gráfico gerado pelo software COMSOL Multiphysics, mostrando o refinamento da malha.

Fonte: Autor

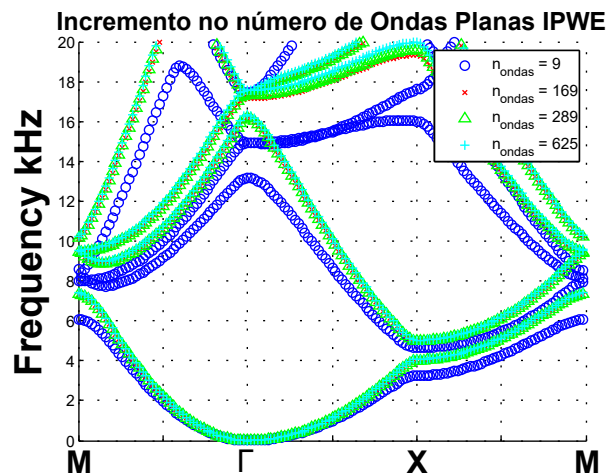


Figura 3: Gráfico gerado pelo método *IPWE*, em que n_{ondas} representa o número de ondas planas consideradas em cada ponto do domínio da função.

Fonte: Autor

As figuras apresentam o gráfico de dispersão obtido tanto pelo *MEF* (COMSOL) quanto pelo *IPWE*, permitindo comparar a convergência dos modos de onda em cada método. Na Figura 2, a comparação é feita por meio do refinamento da malha, cujas características. Já na Figura 3, a comparação ocorre pelo aumento do número de ondas planas consideradas. Observa-se, nesse caso, uma diferença significativa quando $n_{ondas} = 9$,

indicando que esse resultado não representa uma boa aproximação. A tabela (2) apresenta as informações do refinamento da malha *MEF*.

Refinamento	Descrição da Malha	Graus de Liberdade
Normal	A malha completa consiste em 830 elementos de domínio e 108 elementos de fronteira.	10326
Fino (Fine)	A malha completa consiste em 1146 elementos de domínio e 128 elementos de fronteira.	14214
Mais Fina (Finer)	A malha completa consiste em 2248 elementos de domínio e 172 elementos de fronteira.	27558

Tabela 2: Descrição do refinamento da Malha em elementos finitos

Ao sobrepor as duas curvas, conforme mostrado na Figura 4, é possível identificar regiões de convergência até aproximadamente 10 kHz, as quais se alteram conforme a frequência aumenta. Além disso, observa-se que, a partir de 10 kHz, o gráfico obtido pelo *MEF* apresenta uma leve aproximação à solução do *IPWE* com 9 ondas planas

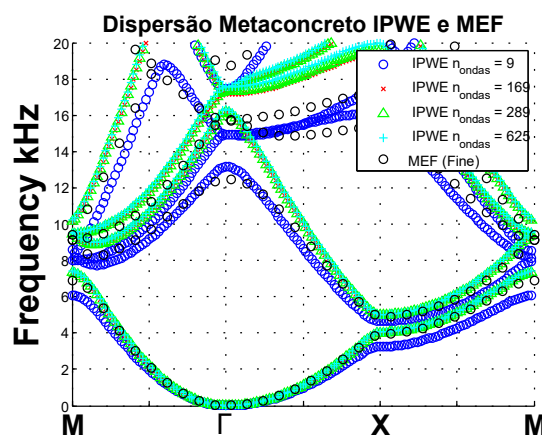


Figura 4: Gráficos de dispersão do metaconcreto comparando os métodos *IPWE* e *MEF*, mostrando diferença na convergência próxima a 10 kHz.

Fonte: Autor

Para o caso tradicional, ou seja, considerando apenas o Concreto C30, a Figura 5 mostra que, na mesma faixa de frequência, os modos de onda sofreram alterações e não apresentam regiões de atenuação de vibração. Já na Figura 6, é possível identificar regiões de convergência para ambos os métodos.

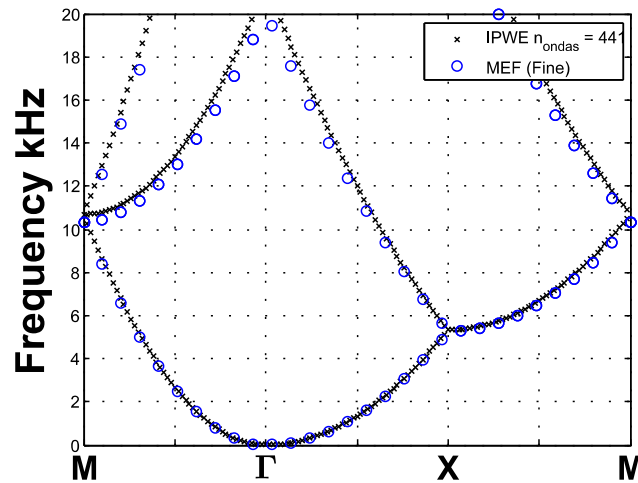


Figura 5: Gráficos de dispersão do concreto, comparando os métodos *IPWE* e *MEF*, com convergência mais próxima, porém com menor número de modos de onda até 20 kHz.

Fonte: Autor

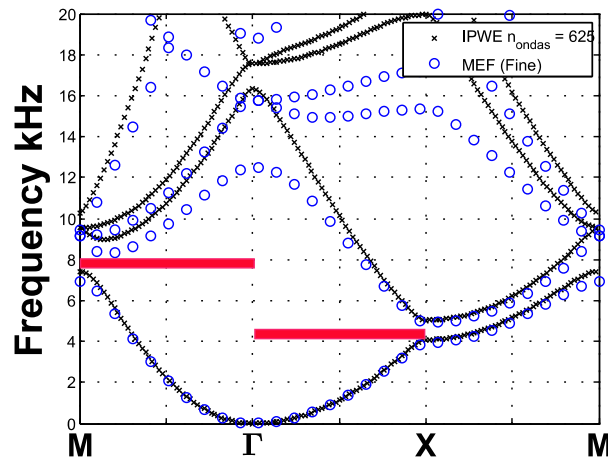


Figura 6: Gráfico de dispersão do metacimento, destacando as regiões de *bandgaps* parciais (retângulos vermelhos), correspondentes à atenuação de vibração comum aos dois métodos.

Fonte: Autor

A partir da Figura 6, observa-se que, apesar das diferenças na convergência, algumas regiões de atenuação são comuns aos dois gráficos. Essas diferenças contribuem para a definição da largura dos *bandgaps* e para a formação de novos.

Considerações finais

Os resultados obtidos demonstram que os métodos empregados (MEF e IPWE) apresentam boa concordância até aproximadamente 10 kHz, garantindo precisão e convergência satisfatória mesmo sem elevado refinamento. Essa característica representa uma vantagem significativa em termos de custo computacional.

Entretanto, algumas limitações foram identificadas neste estudo:

- Não foi gerado um gráfico da Função Resposta em Frequência (FRF), que permitiria observar como o sistema responde em termos de amplitude ao longo das frequências.
- Ainda não está esclarecido se a diferença de desempenho em altas frequências está associada à formulação da equação diferencial utilizada no IPWE em relação ao MEF.
- A análise foi restrita a um conjunto específico de materiais, limitando a generalização dos resultados.

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Realizar comparações mais aprofundadas entre as formulações matemáticas do IPWE e do MEF, com foco na origem das divergências em altas frequências.
- Investigar diferentes combinações de materiais, em especial metálicos e poliméricos no núcleo da célula unitária, buscando reduzir discrepâncias entre os métodos e ampliar as regiões de convergência.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC). Também expressamos nossa gratidão ao Instituto Federal do Maranhão (IFMA) pelo suporte institucional e infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

Referências

BARCHIESI, Emilio; SPAGNUOLO, Mario; PLACIDI, Luca. Mechanical metamaterials: a state of the art. *Mathematics and Mechanics of Solids*, v. 24, n. 1, p. 212-234, 2019

CARVALHO, André Luiz L. A Influência da Configuração dos Ressonadores nos Bandgaps de ondas de flexão do metaconcreto utilizando o método de placas finas. 2022. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal do Maranhão, São Luis, 2022.

- KAI, Wang et al. Review of low-frequency elastic wave metamaterials. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, v. 54, n. 10, p. 2678-2694, 2022.
- KITTEL, Charles. *Introduction to solid state physics* Eighth edition. John Wiley & Sons, 2005.
- KUMAR, Rakesh et al. Overview on metamaterial: History, types and applications. *Materials Today: Proceedings*, v. 56, p. 3016-3024, 2022.
- LIU, Junyi; GUO, Hanbei; WANG, Ting. A review of acoustic metamaterials and phononic crystals. *Crystals*, v. 10, n. 4, p. 305, 2020.
- MIRANDA, E. J. P. et al. Passive vibration control using a metaconcrete thin plate. *Cerâmica*, v. 65, p. 27-33, 2019.
- MIRANDA, Edson Jansen Pedrosa de; SANTOS, José Maria Campos Dos. Flexural wave band gaps in phononic crystal Euler-Bernoulli beams using wave finite element and plane wave expansion methods. *Materials Research*, v. 20, p. 729-742, 2018.
- BRITO, Luiz Antonio; SOARES, Álvaro Monoel de Souza; NAZARI, Bianca. Vibration: source of disturbance to the population and damage to buildings in urban areas. *Ambiente Construído*, v. 13, p. 129-141, 2013.
- CHEN, Zhenyu; WANG, Guifeng; LIM, C. W. Artificially engineered metaconcrete with wide bandgap for seismic surface wave manipulation. *Engineering Structures*, v. 276, p. 115375, 2023.