



International Conference for
Academia and Industry Co-operation

20/11/2023 – 24/11/2023

São Luis - Maranhão - Brasil



International Meeting in Materials
Science and Engineering of Maranhão

DESENVOLVIMENTO E UTILIZAÇÃO DE ELEMENTO ESPECTRAL DE PLACA FINA PARA ESTUDO DE METAMATERIAIS E CRISTAIS FONÔNICOS

DEVELOPMENT AND USE OF A THIN PLATE SPECTRAL ELEMENT FOR THE STUDY OF METAMATERIALS AND PHONONIC CRYSTALS

Flávio N. Pereira¹, Luis G. C. Viana¹ e Lucas R. S. Oliveira^{1*}

1 - Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).
São Luís, MA, Brasil.

lucasoliveira13@aluno.uema.br

RESUMO

O estudo de vibrações mecânicas representa um pilar para o pleno desenvolvimento tecnológico da sociedade contemporânea, pois possibilita, dentre outros fatores, diagnosticar e prevenir falhas estruturais como deslocamentos, trincas e rachaduras em diversos mecanismos. Por conseguinte, uma das formas de restringir a propagação de tais ondas elásticas na estrutura é por meio de band gaps – pequenas faixas de frequência onde não ocorre o movimento vibracional – os quais podem ser otimizados pela adição de Metamateriais na estrutura estudada, dentre os quais pode-se destacar os ressonadores locais. Isso se faz necessário uma vez que, quanto maior a propagação, mais suscetível a falha a estrutura se torna. Entretanto, a detecção desses efeitos pode demandar um alto tempo e custo computacional, além disso, dependendo do tipo de estrutura analisada. O atual trabalho busca desenvolver a análise de band gaps com a utilização do Método do Elemento Espectral por meio de códigos em linguagem MATLAB em estruturas do tipo placa fina sem a dependência de computadores de alta capacidade.

Palavras-chave: Metamateriais; Bandgaps; Espectral; Ressonadores.

ABSTRACT

The study of mechanical vibrations represents a pillar for the full technological development of contemporary society, as it makes it possible, among other factors, to diagnose and prevent structural failures such as displacements, cracks, and disruptions in various mechanisms. Therefore, one of the ways to restrict the propagation of such elastic waves in the structure is through band gaps – small frequency bands where vibrational movement does not occur – which can be optimized by the addition of Metamaterials to the studied structure, among which local resonators can be highlighted. This is necessary since the greater the propagation, the more susceptible the structure becomes to failure. However, detecting these effects can require high time and computational costs, depending on the type of structure analyzed. The current work seeks to develop band gap analysis using the Spectral Element Method through codes in MATLAB language in thin plate-type structures without dependence on high-capacity computers.

Keywords: Metamaterials; Bandgaps; Spectral; Resonators.

INTRODUÇÃO

Os metamateriais recebem esse nome pois são uma classe de materiais criada artificialmente, cuja principal característica é a presença de propriedades não encontradas na natureza. Esse tipo de material é obtido através da distribuição periódica de células unitárias em matrizes. De acordo como trabalho de Walser (2001), os metamateriais podem ser definidos como compostos macroscópicos tridimensionais obtidos somente pelo homem, integrado por células organizadas periodicamente, de modo a gerar uma combinação otimizada e que apresente propriedades que não estão presentes em materiais comuns disponíveis na natureza [1]. Além disso, segundo Pendry (1999) "Os metamateriais são um campo de pesquisa altamente ativo e promissor, com aplicações em uma ampla variedade de tecnologias, incluindo óptica, eletrônica, comunicação e energia" [2].

Os primeiros estudos sobre metamateriais foram feitos por Veselago (1967), onde foi apresentado teoria de existência de um material possuir simultaneamente propriedades negativas de permissividade elétrica e permeabilidade magnética [3]. Desse modo, a sua aplicação para otimização de band gaps é totalmente justificável. Por outro lado, por conta da escassez de soluções analíticas para problemas de Engenharia, problemáticas desse calibre requerem soluções aproximadas por cálculos repetitivos feitos em computadores. Diante disto, o Método de Elemento Espectral (do inglês Spectral Element Method - SEM) vem ganhando destaque no mercado por conta da sua rapidez de resultados se comparado ao Método dos Elementos Finitos (do inglês Finit Element Method - FEM) consolidado e requisitado a muito tempo ao facilitar a visualização e obtenção de simulações embora requisite um alto custo computacional. Entretanto, o SEM demanda um alto conhecimento sobre a estrutura analisada para os resultados serem precisos e, devido à complexidade das equações de movimento, não existe SEM para qualquer estrutura atualmente.

Dessa forma, uma placa fina consiste em um corpo finito com uma direção principal e duas transversais, onde sua espessura é menor que sua área. Atualmente, pela complexidade das ondas bidimensionais por se tratar de um corpo 2D, torna-se extremamente difícil desenvolver um método onde a placa não seja imposta a uma série de fatores, ou seja, somente placas de Levy são utilizadas. Este modelo é um dos utilizados para Elemento Espectral por conta de suas condições de contorno, onde pelo menos 2 bordas paralelas devem estar simplesmente apoiadas e deve-se considerar um material de rigidez constante. De acordo com Lee (2009) "As placas retangulares com pelo menos dois lados paralelos simplesmente suportados são chamadas de placas do tipo Levy e é bem conhecido na teoria das placas que soluções estão disponíveis para a classe de placas do tipo Levy" [4].

Continuando, uma das formas mais eficazes de gerar bandgaps é através de ressonadores locais. Estes objetos consistem em pequenas massas penduradas em molas distribuídas periodicamente ao longo da estrutura analisada. Nesse sentido, a quantidade de ressonadores, juntamente com a rigidez da mola e o peso do sistema, influencia na faixa de atuação do bandgaps, sendo necessários ressonadores específicos para cada frequência requisitada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Problema Placa de Levy Fixo-Fixo

Em primeira análise, foi realizada uma comparação de eficiência entre FEM e SEM. Para isso, primeiramente houve a construção computacional de uma Placa fina de Levy simplesmente apoiada em 4 bordas, sem deslocamentos nos eixos X, Y e Z, no software ANSYS, para se obter suas frequências naturais e comparar com os resultados obtidos com um código de SEM feito em linguagem MATLAB. As dimensões da placa utilizada estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1: Dimensões da placa

DIMENSÃO	VALOR	UNIDADE
Largura	1000	mm
Comprimento	1000	mm
Espessura	1	mm

Posteriormente, o material utilizado por toda a estrutura da placa foi o alumínio, cujas propriedades estão presentes na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades do alumínio

PROPRIEDADE	VALOR	UNIDADE
M. de Young	69	GPa
C. de Poisson	0,33	-
Densidade	2700	Kg/m ³

Como meta para a análise em ANSYS, o objetivo consistiu em adquirir resultados de análise modal para uma visualização do comportamento da placa em diferentes frequências naturais. Além disso, foi requisitado também a análise harmônica, com a aplicação e medição de força em pontos específicos, para comparação com o SEM. Isso se deve ao fato da análise harmônica e SEM estarem no domínio da frequência, baseando-se somente na deformação do ponto analisado em cada frequência.

Para simulação foi utilizado o elemento de simulação SHELL 181 por conta da sua maior rapidez de resultado se comparado a utilização de elemento 3D. Isso se deve ao SHELL 181 possuir 4 nós e 6 graus de liberdade.

Em seguida, para análise harmônica, a placa foi dividida em 4 partes de lados com 500x500 mm. Posteriormente, uma dessas 4 partes foi dividida novamente em 2 partes de lados 250x250 mm e um parte com 500x250 mm. Isso foi feito para a escolha de pontos específicos na estrutura. A força aplicada possui valor de 100 N, está localizada no centro da placa e os pontos analisados estão presentes na Fig. 1.

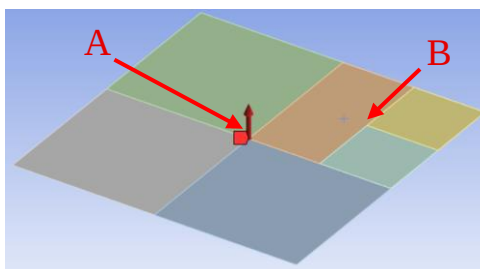


Fig. 1 – Representação da Placa Analisada

Na Fig. 1, a força aplicada está em sentido transversal a placa, o ponto A mede a excitação no ponto de aplicação da força e o ponto B mede a excitação em um ponto distante ao de aplicação da força de 100 N.

Problema Placa de Levy Fixo-Livre

Como forma de aplicação de bandgap na estrutura, utilizou-se o modelo de ressonadores locais no sistema massa-mola, em uma placa de Levy simplesmente apoiada em duas de suas extremidades, com a condição de não haver deslocamento em X, Y e Z.

Logo após a placa foi dividida em 16 partes iguais de lados com 250x250 mm. Essa ação foi necessária para distribuir igualmente os ressonadores ao longo da geometria da placa. A Fig. 2 apresenta a distribuição dos ressonadores, juntamente com os 3 pontos analisados na análise modal.

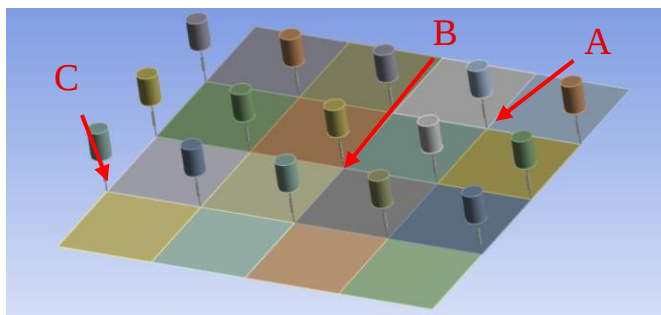


Fig. 2 – Representação da placa com ressonadores.

Na Fig. 2, o ponto de aplicação da força de 100 N está no ponto A. Foi escolhido 3 pontos distintos, onde o ponto C, por ser o mais distante ao de aplicação da força, possui bandgaps mais expressivos na análise harmônica. Posteriormente, a Tabela 3 possui as propriedades dos ressonadores utilizados.

Tabela 3: Propriedades do ressonador

PROPRIEDADE	VALOR	UNIDADE
M. de Young	69	GPa
C. de Poisson	0,33	-
Densidade	2700	Kg/m ³
Tamanho	75	Mm
Massa	0,39761	Kg

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Placa Fixo-Fixo Modal

Sua principal função foi promover uma visualização do comportamento da placa fina de acordo com as frequências naturais obtidas, além de validar os dados obtidos por meio do código em MATLAB. Na Tabela 4 possui os 7 primeiros modos de vibrar, acompanhados de suas respectivas frequências.

Tabela 4: Frequências Fixo-Fixo

MODO	FREQUÊNCIA (HZ)
(1,1)	4,85
(1,2)	12,14
(2,2)	19,43
(1,3)	24,28

(2,3)	31,57
(4,1)	41,3
(4,4)	43,71

A Fig. 3 possui a representação dos modos de vibrar da Tabela 4.

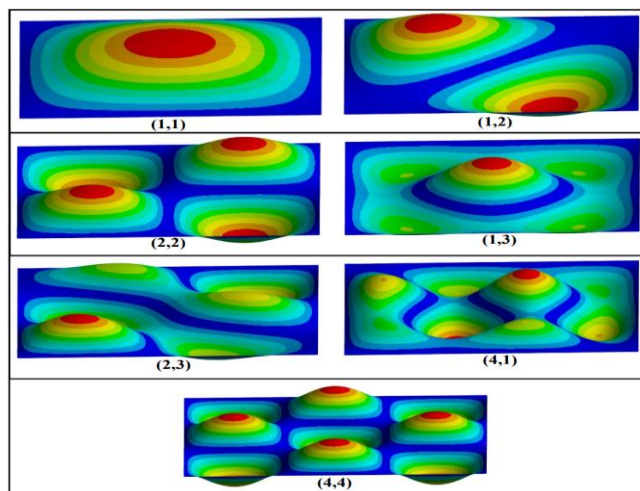


Fig. 3 – Modos de Vibrar com apoio em 4 bordas

Placa Fixo-Fixo Harmônico e Espectral

O objetivo principal é comparar o ponto de atuação da força. Entretanto, essa abordagem também permite uma verificação do comportamento da estrutura como um todo através de pontos distribuídos. Sua representação da amplitude em função da frequência aborda de forma simplificada, com valores precisos, as frequências naturais da peça. Na Fig. 4 tem-se a representação dos pontos A e B, onde cada pico indica uma frequência natural ao longo da faixa de 90 Hz.

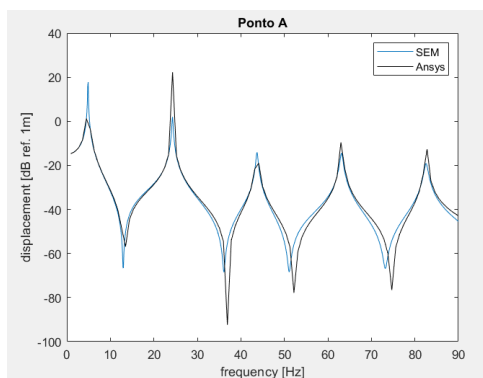


Fig. 4 – Ponto A Fixo-Fixo

As linhas em azul representam o SEM. A presença de picos negativos no ponto A demonstra que por se tratar do ponto de aplicação de força, ocorre maiores excitações. Além disso, devido ao alto custo computacional, os resultados colhidos em ANSYS não são exatamente iguais ao obtidos via SEM.

Placa Fixo-Livre Modal

Os ressonadores atuam em faixas de frequência específicas, portanto, necessitam de valores de rigidez de mola diferentes. A Tabela 5 representa os novos valores de frequências e os respectivos valores de rigidez K da mola.

Tabela 5: Frequência e Valores de K.

MODO	FREQUÊNCIA (Hz)	K (N/m)
(0,4)	76,7	92,250
(3,4)	93,75	137,822
(5,3)	109,64	188,501
(8,3)	256	1.027,676

Para a nova análise modal, a condição de simplesmente apoiado foi posta somente em duas extremidades opostas. A Fig. 6 mostra o novo comportamento da placa em 4 modos de vibrar suprimidos por bandgaps.

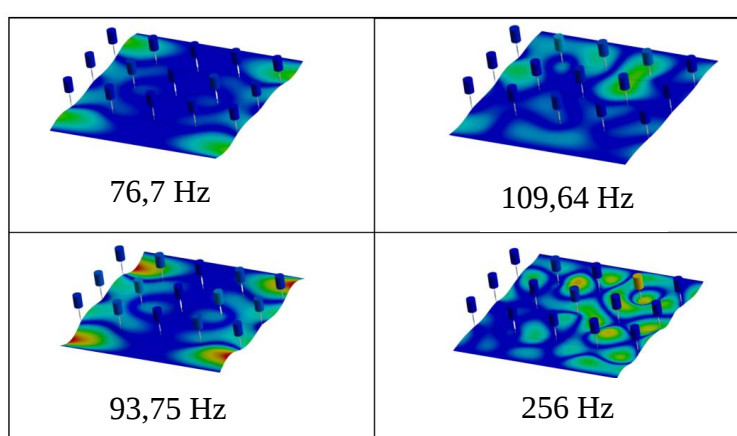


Fig. 6 – Bandgaps Modos de Vibrar Fixo-Livre

Placa Fixo-Livre Harmônico

Como forma de testar a eficiência do modelo, escolheu-se configurar e apresentar o bandgap para o modo (5,3), onde a Fig. 7 apresenta o bandgap para essa faixa de frequência no ponto A.

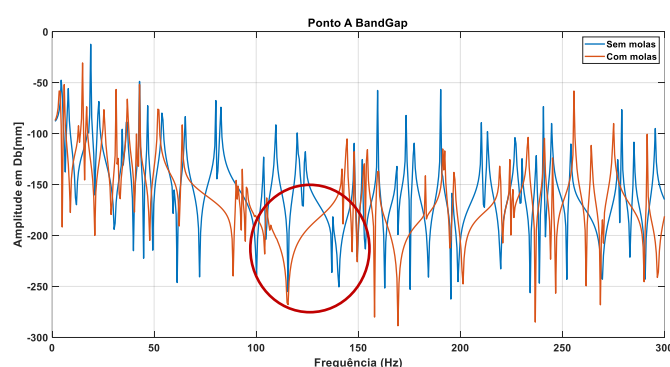


Fig. 7 – Ponto A Bandgap

O início do bandgap coincidiu com o ponto de 110 Hz, começando a atenuação da vibração no ponto. O ápice do bandgap coincide com uma contra ressonância e, posteriormente, conforme o bandgap vai se atenuando, ocorre mudanças em outros dois picos de frequência ao longo do gráfico. Na Fig. 8, está presente a resposta no ponto C.

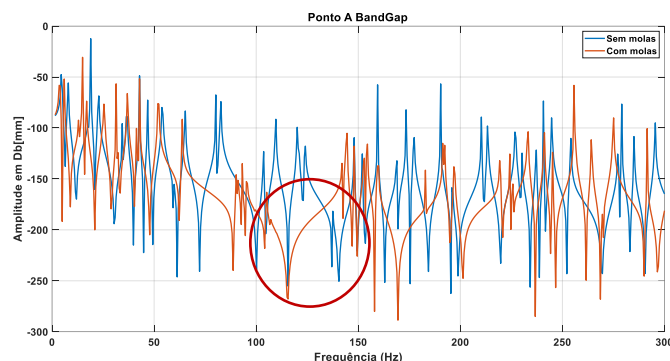


Fig. 7 – Ponto C Bandgap

O ponto C é o mais distante do ponto de aplicação da força. Nas frequências iniciais não existe alteração provocada pelos ressonadores. Posteriormente, quanto mais próximo do bandgap, mais modificações no gráfico são presentes. Além disso, frequências posteriores a do bandgap também sofreram alterações devido a ação dos ressonadores.

CONCLUSÕES

Diante ao abordado, o comportamento da placa varia em função da frequência. A utilização do FEM possuiu o objetivo de validar os resultados obtidos por SEM. O uso da Análise Modal facilita a observação do comportamento da placa por conta da mudança de frequência. Além disso, a Análise Harmônica promoveu a obtenção em gráfico dos picos de frequência naturais da placa estudada. A partir disso, foi possível validar os dados obtidos em SEM, onde a comparação entre os gráficos da Análise Harmônica e do SEM obteve resultados semelhantes, embora haja pequenas divergências entre os picos de frequência. Continuando, o trabalho abordado também demonstra a importância de ressonadores para a eliminação de deformação em frequências específicas. Com base nos resultados obtidos, a análise modal demonstra que é possível obter, com o auxílio dos ressonadores de sistema massa-mola, bandgaps para qualquer faixa de frequência necessária, sendo possível visualizar a estabilidade da placa de modo eficiente. Por fim, embora seja uma grande vantagem, é válido ressaltar que na análise harmônica para as mesmas condições, se a frequência natural que se deseja eliminar seja muito baixa, não é possível ver o bandgap de modo eficiente no gráfico de deformação.

REFERÊNCIAS

- [1] PENDRY, J. et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 11 Novembro 1999. 2075 - 2084.
- [2] Veselago, V.G., 1968, "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ ", Soviet Physics USP EKHI 10
- [3] LEE, U. Spectral Element Method in Structural Dynamics. 1ª. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- [4] Walser, R.M. Eletromagnetic metamaterials, Inaugural Lecture, Proc. Og SPIE. 2011. Complex Medium II: Beyond Linear Isotropic Dielectrics. P. 4467