

ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE BAND GAPS EM ESTRUTURAS PERIÓDICAS COM DIFERENTES TIPOS DE PERIODICIDADE

Guilherme Duarte de Oliveira Melo, guilherme.melo361@academico.ufgd.edu.br
Cezar Berlato Faustino Filho, cez.ar.filho045@academico.ufgd.edu.br
Gabriel Berres, gabriel_berres@hotmail.com
Rodrigo Borges Santos, rodrigobsantos@ufgd.edu.br

Universidade Federal da Grande Dourados, Rod. Dourados-Itahum, Km12 - Cidade Universitária- FAEN, Dourados - MS, 79804-970.

Resumo. *Vibrações nos materiais terrestres, também chamadas de atividades sísmicas, são causadas por uma repentina liberação de energia, podendo gerar graves danos às construções civis. Nessa perspectiva, sistemas de controle ativo, semiativo, híbrido e passivo vem sendo concebidos ao longo dos anos com o objetivo de evitar o colapso estrutural durante tais eventos sísmicos. Diferentes pesquisas têm demonstrado que a redução de vibração pode ser obtida por meio do conceito de periodicidade, onde realiza-se um controle passivo das vibrações, isolando a estrutura pela base. As estruturas periódicas (EP) envolvem elementos idênticos (células unitárias) ou partes conectadas repetidamente, com diferentes propriedades geométricas e/ou físicas ao longo de seu comprimento. A filtragem das vibrações proporcionada pela EP é obtida em certos intervalos de frequência, conhecidos como Band Gaps, possibilitando a aplicação dessas estruturas em diferentes campos da engenharia. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é estudar a formação de Band Gaps considerando que a célula unitária seja concebida por diferentes tipos de periodicidade, isto é, com descontinuidade do tipo geométrica, de material ou mista (material e geométrica). As estruturas periódicas são modeladas via método dos elementos espectrais considerando elementos de barra e de viga do tipo Euler Bernolli. Os resultados mostram que quanto maior for a descontinuidade na célula, sejam elas devidas às propriedades físicas do material ou devida a mudança de geometria, maior será o desempenho da EP na atenuação de vibração e, também é mostrado que uma célula com periodicidade mista é mais adequada para conseguir atenuação de vibração em baixas frequências.*

Palavras chave: *Isolamento sísmico. Estruturas periódicas. Métodos dos elementos espectrais.*

Vibrations in earth materials, also called seismic activities, are caused by a sudden release of energy, which can cause serious damage to civil constructions. From this perspective, active, semi-active, hybrid and passive control systems have been designed over the years in order to avoid structural collapse during such seismic events. Different researches have demonstrated that the reduction of vibration can be tolerated through the concept of periodicity, where a passive control of the vibrations is carried out, isolating the structure by the base. Periodic structures (PE) involve identical elements (unit cells) or repeatedly connected parts, with different ceramic and/or physical properties along their length. The vibration of the vibrations provided by the EP is met in certain frequency ranges, known as Band Gaps, allowing the application of these structures in different fields of engineering. In this context, the objective of this work is to study the formation of Band Gaps considering that the unit cell is made by different types of periodicity, that is, with discontinuity of the geometric type, of material or mixed (material and beans). The periodic structures are modeled via the method of spectral elements considering bar and beam elements of the Euler Bernolli type. The results show that the greater the discontinuity in the cell, whether due to the physical properties of the material or due to the change in geometry, the greater the performance of the EP in vibration attenuation, and it is also shown that a cell with wrong periodicity is more suitable for obtaining vibration attenuation at low frequencies.

Keywords: *Seismic isolation. Periodic structures. Spectral element methods.*

1. INTRODUÇÃO

A redução da vibração estrutural tem sido um tópico muito importante para muitos engenheiros, haja visto os enormes danos materiais e à vida humana encontrados no cenário pós tremores. Nesse sentido, por meio do estudo das vibrações mecânicas avalia-se a dinâmica dos abalos sísmicos, onde devido a inerência de qualquer sistema mecânico possuir frequências naturais de vibração fenômenos de ressonância ocorrem, podendo levar a um colapso estrutural.

Diferentes sistemas para evitar tais abalos sísmicos vêm sendo estudados, nos quais as soluções dividem-se em quatro tipos: sistemas ativos, semiativos, híbridos e passivos (Beneveli, 2002)(Carneiro, 2009) (Santos, 2018).

Entre os tipos citados, destaca-se o controle passivo, que se divide em amortecedores e sistema de isolamento de base; o primeiro deles tem a capacidade de absorver a energia cinética indesejada, por outro lado o segundo é instalado na

fundação de edifícios, filtrando certas frequências de vibrações e isolando a estrutura. Em estudos mais recentes, têm-se focado nos sistemas de isolamento de base, por meio da utilização de estruturas periódicas (EP), que por definição são compostas por uma repetição de elementos idênticos, as células unitárias, a menor parte integrante de uma EP e constituída por materiais de diferentes propriedades físicas e/ou geometrias.

A periodicidade da estrutura permite a geração dos chamados *Band Gaps* (BG), que consiste basicamente em intervalos de frequência nos quais a propagação da onda é significativamente amenizada. A geração de tais bandas de parada está diretamente relacionada com descontinuidades da estrutura periódica, que promovem a reflexão das ondas que propagam na estrutura; dessa maneira, por via de diferentes materiais e geometrias presentes nas células unitárias obtêm-se distintas regiões atenuativas (Carneiro, 2009) (Santos, 2018).

A formação dos *Band Gaps* pode ser obtida através da utilização de diferentes tipos de descontinuidades, sendo elas geométrica, em que as partes que compõem a célula unitária possuem razões de área e comprimento diferentes, material, que apresenta materiais distintos, e mista, que mescla as duas características já citadas. Uma comparação entre essas periodicidades, assim como um estudo para diferentes números de células é realizado ao longo deste trabalho, onde por meio de curvas de transmissibilidade são realizadas análises comparativas entre os BG.

A aplicação de tais estruturas é bastante abrangente, sendo vistas no setor automotivo (Asiri, 2007) e aeronáutico (Asiri and Baz, 2005), além de apresentar boa performance para o isolamento sísmico nas construções civis (Witarto et al, 2018) (Xiang et al, 2012). E, então, avaliar o desempenho dessas estruturas para aplicações em isolamento de vibrações em baixas frequências, como por exemplo em fenômenos sísmicos que compreende a faixa de 2 a 40 Hz. Para isso, as estruturas são modeladas via método dos elementos espectrais considerando elementos de barra e de viga do tipo Euler Bernolli (Lee, 2009), e então, sendo possível avaliar o comportamento da propagação de ondas longitudinais e flexurais.

2. METODOLOGIA

Ao longo desta seção a fundamentação teórica utilizada para a modelagem das estruturas periódicas é demonstrada. Sequencialmente, define-se a estruturação de uma EP, assim como os *Band Gaps* considerados. Além disso, por meio dos conceitos presentes em (Lee, 2009) os métodos dos elementos espectrais são usados para a obtenção de uma relação de transmissibilidade entre os deslocamentos da entrada e da saída da estrutura periódica.

2.1 Estruturas periódicas

No presente trabalho serão tratadas apenas estruturas periódicas de uma dimensão, como mostra a Fig. 1 a seguir:

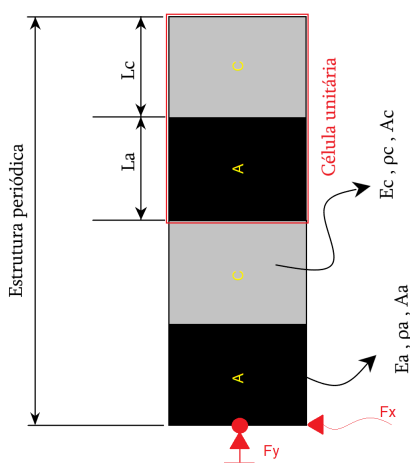


Figura 1. Estrutura periódica genérica (Elaborado pelo autor)

Fica evidente por meio da Fig. 1 que a célula unitária é composta por duas partes (A e C) com distintas propriedades físicas e/ou geométricas, como mostra as variáveis E , ρ , A e L , que representam, respectivamente, o módulo de elasticidade (Pa), a densidade (Kg/m^3), a área da seção transversal (m^2) e finalmente o comprimento de cada elemento (m) da célula unitária. Juntamente a isso, tem-se a introdução de ondas flexionais e longitudinais na estrutura, representadas na devida ordem como F_x e F_y .

A relação existente entre as propriedades físicas e geométricas dos elementos que compõem a célula unitária será utilizada nas modelagens numéricas, de modo que as variáveis E_{ca} , ρ_{ca} , A_{ca} e L_{ca} representem a razão entre os respectivos parâmetros dos elementos C e A, ou seja, $E_{ca} = E_c/E_a$ e $\rho_{ca} = \rho_c/\rho_a$.

2.2 Formação dos *Band Gaps*

Como dito anteriormente, as discontinuidades presentes na EP são as responsáveis pela formação de intervalos atenuativos ao longo da frequência, sendo eles conhecidos como *Band Gaps*. Em tais regiões, as interações entre a onda incidente e as discontinuidades presentes permitem a modificação da propagação da onda em questão ao longo da estrutura periódica (Santos, 2018)(Jr *et al.*, 2019)(Carneiro Jr *et al.*, 2021). Dessa maneira, alterando as razões de área (A_{ca}), comprimento (L_{ca}), elasticidade (E_{ca}) e densidade(ρ_{ca}) obtém-se diferentes zonas atenuativas.

Para a análise da formação de zonas atenuativas utiliza-se o conceito de transmissibilidade, que consiste na relação entre os deslocamentos de saída e entrada de uma célula. Nesse sentido, a transmissibilidade de ondas longitudinais ($T_{longitudinal}$) e flexionais ($T_{flexional}$) é definida como:

$$T_{longitudinal} = \frac{U_s}{U_e} \quad (1)$$

$$T_{flexional} = \frac{W_s}{W_e} \quad (2)$$

onde U_e e U_s representam, respectivamente, os deslocamentos axiais na entrada e na saída da estrutura periódica. De maneira semelhante, W_s e W_e configuram os deslocamentos transversais de saída e entrada, respectivamente. Consequentemente, nas faixas de frequência em que a transmissibilidade for menor que a unidade compreende-se que a onda incidente está sendo atenuada pela EP.

A Fig.2 evidencia as regiões de parada (*Band Gaps* - BG) e passagem (*Band Pass* - BP) em um gráfico de transmissibilidade longitudinal versus frequência, onde a linha tracejada representa a unidade no eixo da transmissibilidade.

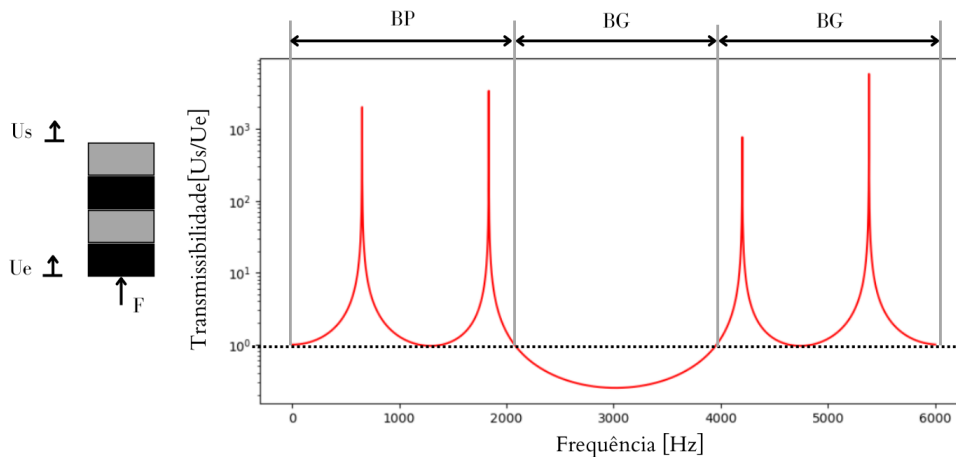


Figura 2. Zonas de passagem (BP) e parada (BG) (Elaborado pelo autor)

2.3 Método dos elementos espectrais

A resposta dinâmica de uma estrutura periódica é obtida por meio de uma modelagem matemática na qual se utiliza o método dos elementos espectrais (SEM), onde um conjunto de equações diferenciais são solucionadas no domínio da frequência, aplicando-se a transformada de Fourier.

De maneira análoga ao método dos elementos finitos (FEM), o SEM emprega a discretização de uma estrutura em elementos menores, porém, diferentemente do primeiro, este necessita de uma quantidade mínima de elementos. Segundo (Lee, 2009), para representar uma estrutura regular um único elemento basta, ou seja, sem mudança nas suas propriedades geométricas e de material ao longo do seu comprimento.

Fazendo uso do SEM diferentes elementos podem ser estudados, sendo que para ondas longitudinais usa-se o elemento de barra, por outro lado, para contemplar ondas flexionais utiliza-se o elemento espectral de viga. Em sumo, entende-se cada elemento de uma célula unitária como sendo um elemento espectral, que por sua vez é composto de duas modelagens distintas, barra (*Rod*) e viga (*Beam*), o que forma a matriz espectral do elemento. Unindo-se dois ou mais elementos, como no caso da EP, obtém-se uma matriz espectral global. No presente trabalho, por questões de relevância, será detalhada apenas a modelagem que acopla o elemento de barra e viga.

Por meio do método de força-deslocamento, os elementos espectrais são desenvolvidos com base na equação que descreve o movimento das ondas longitudinais ($E A u'' - \rho A \ddot{u} = 0$) e transversais ($E I w'''' + \rho A \ddot{w} = 0$), como mostrado

em (Fahy and Gardonio, 2007) e (Lee, 2009). Sendo que para a primeira delas, $u(x, t)$ é o deslocamento longitudinal, E o módulo de elasticidade do material (Pa), A a área da seção transversal (m^2), enquanto ρ é a densidade da barra (Kg/m^3). Para a segunda equação, tem-se que $w(x, t)$ como deslocamento transversal e I como momento de inércia (m^4). Dentro da linguagem matemática, a linha ($'$) indica que o parâmetro está sendo derivado em relação ao espaço, enquanto que os pontos (\cdot) indicam que a derivada é em relação ao tempo.

Solucionando tais equações, pode-se reorganiza-las para a forma matricial, além de condensa-las para atender a modelagem barra-viga acoplado, como proposto por (Lee, 2009). A configuração para o elemento espectral barra-viga acoplado passa a ter três graus de liberdade por nó, deslocamento axial (U_i), deslocamento transversal (W_i) e rotação (θ_i), como fica evidente na Fig. 3



Figura 3. Modelo de barra e viga acoplado (Adaptado de Lee, 2009)

De maneira semelhante aos elementos individuais de barra e viga, a relação espectral global para a estrutura acoplada é desenvolvida de acordo com a seguinte equação

$$S_g(\omega)d_g(\omega) = f_g(\omega) \quad (3)$$

onde as matrizes espectrais dos elementos de barra (S^B) e viga (S^R) fornecidas por (Lee, 2009) são unidas, resultando em uma matriz espectral global (S_g) na equação Eq. 4

$$S_g(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}^R & 0 & 0 & S_{11}^R & 0 & 0 \\ 0 & S_{11}^B & S_{12}^B & 0 & S_{13}^B & S_{14}^B \\ 0 & S_{21}^B & S_{22}^B & 0 & S_{23}^B & S_{24}^B \\ S_{21}^R & 0 & 0 & S_{22}^R & 0 & 0 \\ 0 & S_{31}^B & S_{32}^B & 0 & S_{33}^B & S_{34}^B \\ 0 & S_{41}^B & S_{42}^B & 0 & S_{43}^B & S_{44}^B \end{bmatrix} \quad (4)$$

Os termos presentes na matriz são encontrados de maneira resumida em (Lee, 2009), conforme abaixo:

$$S_{11}^B = S_{33}^B = \Delta_B \bar{L}^3 (\cos \bar{L} \sinh \bar{L} + \sin \bar{L} \cosh \bar{L}) \quad (5)$$

$$S_{12}^B = S_{21}^B = -S_{34}^B = -S_{43}^B = \Delta_B \bar{L}^3 k_F^{-1} \sin \bar{L} \sinh \bar{L} \quad (6)$$

$$S_{13}^B = S_{31}^B = -\Delta_B \bar{L}^3 (\sin \bar{L} + \sinh \bar{L}) \quad (7)$$

$$S_{14}^B = S_{41}^B = -S_{23}^B = -S_{32}^B = \Delta_B \bar{L}^3 k_F^{-1} (-\cos \bar{L} + \cosh \bar{L}) \quad (8)$$

$$S_{22}^B = S_{44}^B = \Delta_B \bar{L}^3 k_F^{-2} (-\cos \bar{L} \sinh \bar{L} + \sin \bar{L} \cosh \bar{L}) \quad (9)$$

$$S_{24}^B = S_{42}^B = \Delta_B \bar{L}^3 k_F^{-2} (-\sin \bar{L} + \sinh \bar{L}) \quad (10)$$

$$S_{11}^R = S_{22}^R = (k_L L) \cotan(k_L L) \quad (11)$$

$$S_{12}^R = S_{21}^R = -(k_L L) \operatorname{cosec}(k_L L) \quad (12)$$

$$\Delta_B = \frac{1}{1 - \cos \bar{L} \cosh \bar{L}} \quad (13)$$

$$\bar{L} = k_F L \quad (14)$$

Onde $k_F = \sqrt{\omega \left(\frac{\rho A}{EI} \right)^{1/4}}$ e $k_L = \omega \sqrt{\frac{\rho A}{EA}}$ são respectivamente os números de onda para flexão pura e vibração longitudinal, sendo ω a frequência temporal (rad/s).

Além disso, o campo de deslocamento ($d_g(\omega)$) e o vetor de força ($f_g(\omega)$) são acoplados com base na organização da matriz espectral global, resultando nas matrizes fornecidas pelas Eq. 15 e Eq. 16, respectivamente.

$$d_g(\omega) = \begin{Bmatrix} U_1 \\ W_1 \\ \theta_1 \\ U_2 \\ W_2 \\ \theta_2 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

$$f_g(\omega) = \begin{Bmatrix} N_1 \\ Q_1 \\ M_1 \\ N_2 \\ Q_2 \\ M_2 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

Sendo que para o vetor forças N_i é a força axial, Q_i a força de cisalhamento e finalmente M_i representa o momento fletor. Tais termos são encontrados com mais detalhes no livro (Lee, 2009), onde é feita toda a dedução das equações.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

Utilizando os conceitos discutidos até o momento, nesta seção desenvolve-se uma análise numérica quanto a formação dos *Band Gaps* para diferentes combinações de estruturas sob ondas longitudinais e flexionais, onde adota-se condições de contorno livre-livre para a EP.

3.1 Análise para diferentes tipos de periodicidades

Como mencionado, por meio da combinação de diferentes descontinuidades em uma estrutura periódica é possível obter três formas de periodicidade: geométrica, onde modifica-se apenas as razões A_{ca} e L_{ca} , material, quando mantendo as razões A_{ca} e L_{ca} unitárias utiliza-se materiais distintos; e finalmente a mista, que se caracteriza pela união das duas periodicidades citadas anteriormente.

Assumindo os parâmetros da parte A em $E_a = 5 \text{ MPa}$, $\rho_a = 950 \text{ Kg/m}^3$, $A_a = 0,0177 \text{ m}^2$ e $L_a = 0,3 \text{ m}$; e variando os mesmos para a parte C, conforme Tab.1, torna-se possível investigar a formação do *Band Gap* de acordo com o tipo de periodicidade. Nos casos em questão, a seção transversal da EP apresenta um formato circular e a quantidade de células é de $N_{cell} = 1$.

Tabela 1. Razões de propriedades

Propriedade	Tipo de periodicidade		
	Geométrica	Material	Mista
E_{ca}	1	600	600
ρ_{ca}	1	1,2	1,2
A_{ca}	2	1	2
L_{ca}	2	1	2

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.

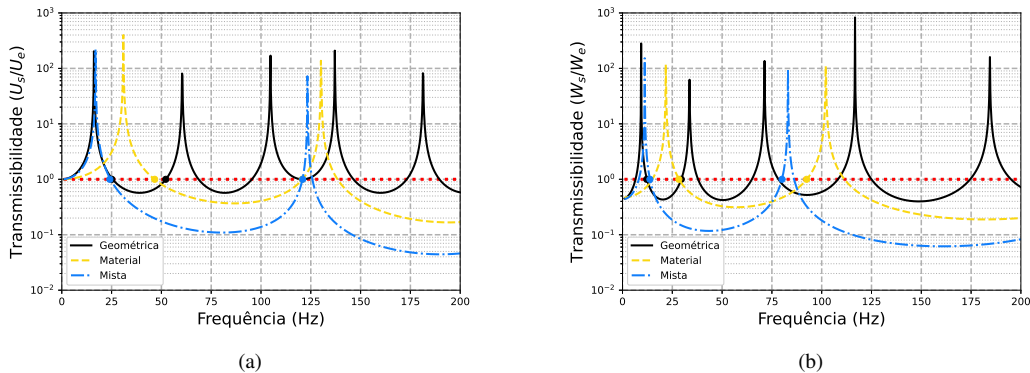


Figura 4. Influência de diferentes tipos de materiais na formação do *Band Gap* em uma célula mista: (a) sob ondas longitudinais, (b) sob ondas flexionais. (Elaborado pelo autor)

Analisando a Fig.4 nota-se que para ondas longitudinais, as larguras de banda dos *Band Gaps* são de 27,1 Hz, 74,1 Hz e 96,8 Hz para periodicidade do tipo geométrica, de material e mista, respectivamente. São observados aumentos de 173,4 % e 257,2 % em largura de banda para os outros dois tipos de periodicidade, tomando a geométrica como referência. Já para ondas flexionais, onde observa-se bandas de atenuação com larguras iguais a 22,9 Hz, 64,1 Hz e 66,4 Hz, para periodicidade do tipo geométrica, de material e mista, respectivamente, há um aumento percentual, quando comparado à geométrica, de 179,9 % e 189,9 % em largura de banda.

Conclui-se que o tipo de periodicidade possui influência direta com a largura do *Band Gap*, sendo mais expressivo nas ondas longitudinais. Além disso, nota-se uma redução da transmissibilidade para uma maior descontinuidade na célula unitária.

3.2 Análise para diferentes materiais

No estudo feito anteriormente, a célula unitária que apresentava periodicidade mista mostrou melhor desempenho em relação as outras. Dessa forma, a presente análise estudará o resultado da combinação de diferentes materiais para uma célula mista.

As propriedades geométricas da parte A, L_{ca} e S_{ca} , são mantidas idênticas ao caso misto fornecido na Tab.1, assim como número de células é mantido em $N_{cell} = 1$. As novas razões E_{ca} e ρ_{ca} utilizadas são apresentadas na Tab.2, representando as combinações como Borracha Macia-Borracha Dura (BM-BD), Borracha Macia-Concreto (BM-CT) e Borracha Macia-Aço (BM-AC). Tais propriedades são encontradas em (Fahy and Gardonio, 2007).

Tabela 2. Propriedades assumidas para combinações de materiais

Propriedade	Combinação		
	BM-BD	BM-CT	BM-AC
E_{ca}	10	5200	40000
ρ_{ca}	1,16	2,42	8,21

Os resultados obtidos são mostrados na Fig.5

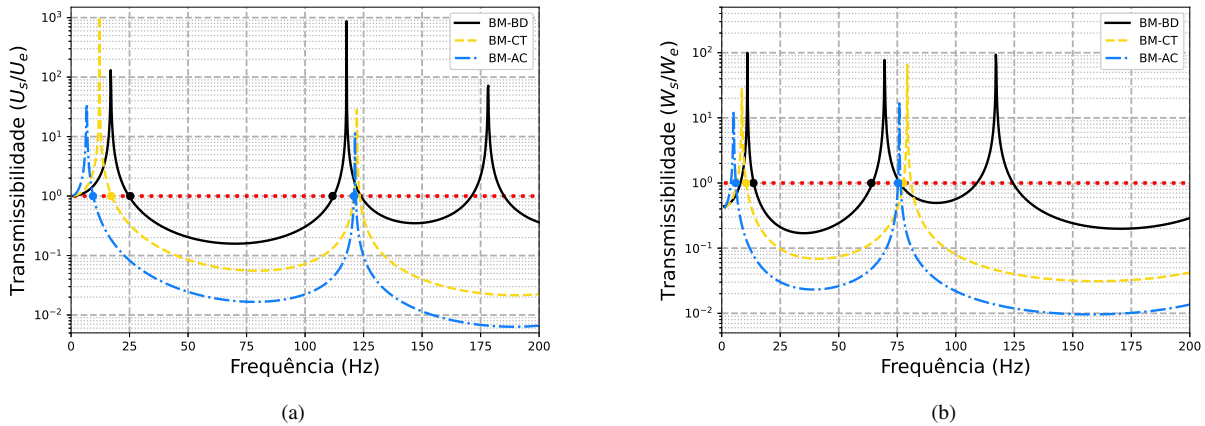


Figura 5. Influência de diferentes tipos de materiais na formação do *Band Gap* em uma célula mista: (a) sob ondas longitudinais, (b) sob ondas flexionais. (Elaborado pelo autor)

É possível perceber, por meio da Fig.5(a), que a combinação de materiais que apresentam propriedades cada vez mais distantes possibilita o início do *Band Gap* em uma frequência menor, sendo que o término das mesmas localizam-se próximos. Consequentemente, identifica-se que há um aumento da largura de banda, onde as combinações BM-BD, BM-CT, BM-AC formam regiões com largura de 86,4 Hz, 103,7 Hz e 111,6 Hz, respectivamente.

Paralelamente a isso, para ondas flexionais, como mostrado na Fig.5(b), também é observado uma antecipação na formação da *Band Gap*. Porém, o mesmo ocorre com o término da BG, implicando em uma mínima alteração na sua largura. Para as combinações BM-BD, BM-CT, BM-AC, o *Band Gap* tem larguras iguais a 50,4 Hz, 67,1 Hz e 69,3 Hz, respectivamente.

Juntamente a isso, percebe-se uma redução na transmissibilidade, para ambos os tipos de ondas, quanto maior a razão entre as propriedades físicas dos materiais.

3.3 Análise para diferentes números de células

A amplitude da transmissibilidade é influenciada diretamente pelo número de células unitárias (N_{cell}) presentes na estrutura periódica, (Santos, 2018). Dessa maneira, a presente análise visa investigar o comportamento de uma EP quando o N_{cell} assume valores de 2, 4 e 6. As razões entre as propriedades geométricas e físicas dos elementos A e C são mantida idênticas ao caso "Misto" apresentado pela Tab.1. Os resultados podem ser vistos na Fig.6.

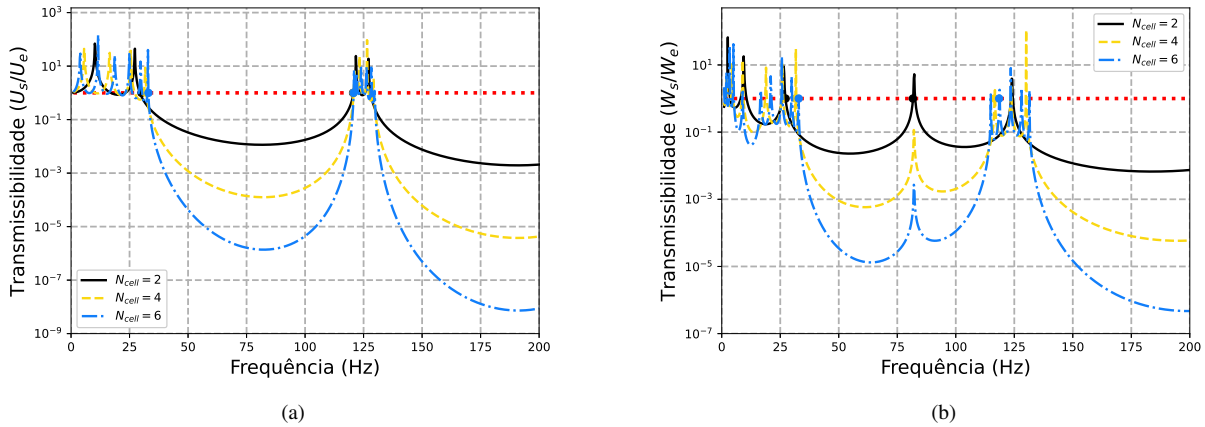


Figura 6. Influência do N_{cell} na formação do *Band Gap* em uma célula mista: (a) sob ondas longitudinais, (b) sob ondas flexionais. (Elaborado pelo autor)

Pode ser visto, por meio da Fig.6(a), que para ondas longitudinais o aumento do número de células causa um estreitamento da largura de banda, haja visto um início mais tardio do *Band Gap*, enquanto o seu término não sofre alteração. Nesse sentido, as BG para 2, 4 e 6 células apresentam, respectivamente, larguras iguais a 97 Hz, 88,5 Hz, 87,7 Hz.

Já para ondas flexionais, fica evidente pela Fig.6(b) que existe certa relação similaridade entre o N_{cell} e o número de *Band Gaps* formados, fenômeno que pode ser visto mais especificamente entre as frequências de 15 Hz e 80 Hz.

Finalmente, observa-se que para ambos os tipos de ondas houve uma redução da transmissibilidade com o acréscimo de células. Numericamente, para ondas longitudinais há uma queda de aproximadamente 110 vezes quando compara-se $N_{cell} = 4$, que apresenta transmissibilidade de $9 \cdot 10^{-4}$, e $N_{cell} = 6$, com $8,5 \cdot 10^{-6}$.

3.4 Análise para diferentes razões de área

Com o objetivo de verificar e quantificar as influências que as discontinuidades geométricas causam no *Band Gap*, esta seção apresenta o comportamento dos *gaps* para diferentes razões de área A_{ca} . Assim como considerado para as análises anteriores, as razões entre as propriedades E_{ca} , ρ_{ca} e L_{ca} são mantidas idênticas ao caso "Misto" fornecido pela Tab.1, onde considera-se $N_{cell} = 1$. Todavia, a razão de área A_{ca} assume valores de 2, 4 e 6, como visto na Fig.7.

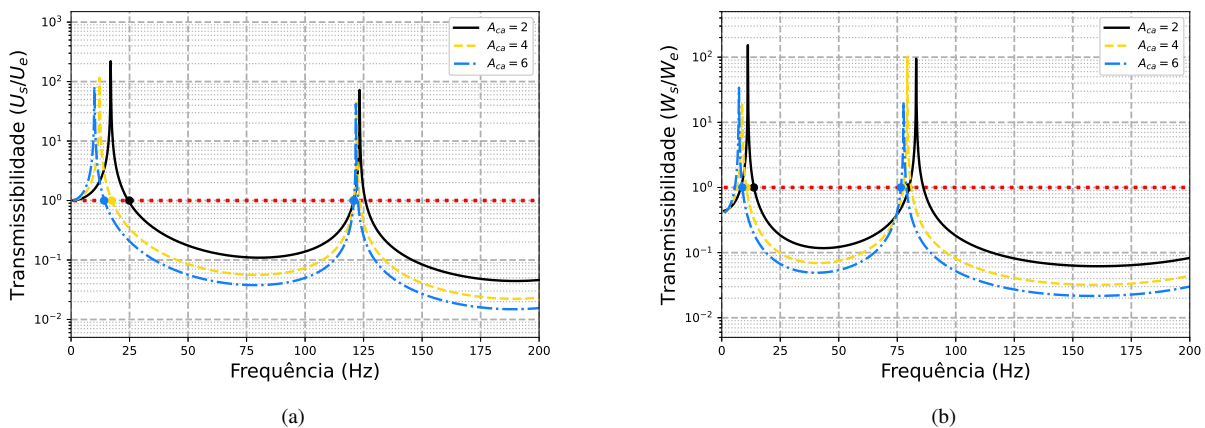


Figura 7. Influência da razão de área (A_{ca}) na formação do *Band Gap* em uma célula mista: (a) sob ondas longitudinais, (b) sob ondas flexionais. (Elaborado pelo autor)

Analisando a Fig.7(a) verifica-se um alargamento do *Band Gap* com o aumento de A_{ca} , haja visto que o mesmo inicia-se cada vez mais cedo, enquanto que seu término não sofre alterações significativas. Nesse sentido, as larguras de bandas assumem para A_{ca} iguais a 2, 4 e 6, respectivamente, valores de 95,8 Hz, 103,4 Hz e 106,8 Hz.

Em contrapartida, para ondas flexionais, o início do BG em frequências menores é acompanhado pelo seu término, o que não altera significativamente a largura do *Band Gap*. Isso pode ser visto na Fig.7(b), onde a largura de banda passa de 65,9 Hz para 66,9 Hz e finalmente para 67,7 Hz.

De modo similar ao ocorrido com o N_{cell} , para os dois tipos de ondas há uma redução da transmissibilidade para maiores descontinuidades, ou seja, maiores razões de área. Particularmente, para ondas flexionais, a transmissibilidade possui uma tendência de assumir valores menores no início da região de atenuação

4. CONCLUSÃO

Incidentes estruturais envolvendo eventos sísmicos ocorrem em diversas regiões do planeta. Nesse sentido, a redução da vibração estrutural tem sido um tópico muito importante entre muitos engenheiros. Neste trabalho, fazendo uso do método dos elementos espectrais para elementos de viga e barra, estruturas periódicas foram modeladas. Assim, por meio de um estudo numérico prévio, a capacidade das EP em isolar de vibrações pela base é investigada.

Os resultados apresentados pelas Fig. 4, 5 e 7 possibilitam constatar que quanto maior as descontinuidades presentes na célula unitária, sejam elas geradas por propriedades físicas ou geométricas, maior a atenuação de vibrações em baixa frequência. Juntamente a isso, fica evidente pela Fig. 6 que aumentar o número de células unitárias presentes na estrutura reduz a transmissibilidade de ondas longitudinais e transversais, porém ocorre um estreitamento na largura das bandas de parada.

Tendo em vista os aspectos que foram observados, conclui-se que estruturas periódicas têm potencial para serem utilizadas na atenuação de ondas longitudinais e flexionais em um sistema de isolamento de vibração, e, também é mostrado que uma célula com periodicidade mista é mais adequada para conseguir atenuação de vibração em baixas frequências. .

5. REFERÊNCIAS

- Asiri, S., 2007. "Vibration attenuation of automotive vehicle engine using periodic mounts". *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, Vol. 3, No. 3, pp. 302–315.
- Asiri, S. and Baz, A., 2005. "Periodic struts for gearbox support system". *Journal of Vibration and Control*, Vol. 11, No. 6, pp. 709–721.
- Beneveli, S.M.A., 2002. *Controle híbrido para atenuação de vibrações em edifícios. Tese (Doutorado)*. Ph.D. thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Carneiro, R.B., 2009. *Controle semi-ativo de vibrações em estruturas utilizando amortecedor magnetorreológico. Tese (Doutorado)*. Ph.D. thesis, Universidade de Brasília, Distrito Federal.
- Carneiro Jr et al, J., 2021. "On the attenuation of vibration using a finite periodic array of rods comprised of either symmetric or asymmetric cells". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 511, p. 116217.
- Fahy, F. and Gardonio, P., 2007. *Sound and structural vibration: radiation, transmission and response*. Elsevier, S.I, 2nd edition.
- Jr, J.P.C., Santos, R.B. and Bueno, D.D., 2019. "Analysis of suppression of longitudinal vibrations in rods with material periodicity". In *25 th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*. Uberlândia, Brasil.
- Lee, U., 2009. *Spectral element method in structural dynamics*. Wiley, Signapore, 1st edition.
- Santos, R.B., 2018. *An alternative approach to design periodic rods. Tese (Doutorado)*. Ph.D. thesis, Universidade Estadual Paulista, São Paulo.
- Witarto et al, W., 2018. "Seismic isolation of small modular reactors using metamaterials". *AIP Advances*, Vol. 8, No. 4, pp. 45–307.
- Xiang et al, H.J., 2012. "Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations: experimental validation". *Smart Materials and Structures*, Vol. 21, No. 11, p. 112003.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.