

Estudo de caso de verificação no estado limite de serviço de vibrações excessivas em lajes alveolares**Case study of the service limit state verification of excessive vibrations on alveolar slabs**

DOI:10.34117/bjdv6n10-058

Recebimento dos originais:08/09/2020

Aceitação para publicação:05/10/2020

Iago Vanderlei Dias Piva

Aluno de graduação em engenharia civil pela Fundação Hermínio Ometto – UNIARARAS

Endereço: Rua Dr. Maximiliano Baruto, 500, Jardim Universitário, Araras – SP

E-mail: iagopiva15@alunos.fho.edu.br

Gustavo de Miranda Saleme Gidrão

Doutor em ciências pela Escola de Engenharia de São Carlos

Endereço: Rua Dr. Maximiliano Baruto, 500, Jardim Universitário, Araras – SP

E-mail: gidrao@fho.edu.br

RESUMO

O artigo discute a metodologia básica para verificação do Estado limite de vibrações excessivas (ELS-VE) de painéis pré-moldados de lajes alveolares através do uso de Elemento Finitos. As análises foram feitas em painéis de 9, 12 e 15 cm de altura, modeladas em elementos finitos e obtidas as frequências naturais fundamentais os para vãos de 5, 7 e 9 m e comparação da frequência crítica para ELS-VE conforme a ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014).

Palavras-Chaves: Vibrações Excessivas, Lajes Alveolares, Frequência Natural**ABSTRACT**

The article discusses the basic methodology for verifying the excessive vibration limit state (ELS-VE) of pre-molded alveolar slab panels through the use of Finite Element. The analyses were made in panels of 9, 12 and 15 cm of height, modeled in finite elements and obtained the fundamental natural frequencies for spans of 5, 7 and 9 m and comparison of the critical frequency for ELS-VE according to ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014).

Keywords: Excessive Vibrations, Alveolar Slabs, Natural Frequency.**1 INTRODUÇÃO**

As lajes alveolares pré-moldadas são elementos amplamente utilizados na indústria da construção civil, se destacando na construção de pavimentos comerciais e industriais. Fatores como sua inércia otimizada, alta resistência dos materiais constituintes e eventualmente uso de protensão, garantem considerável capacidade em vencer grandes vãos. No entanto, as características

supracitadas também favorecem estes elementos a sofrer com ações dinâmicas, podendo desenvolver patologias de Estado Limite de Serviço de vibrações excessivas (ELS – VE) tanto em situações de baixa energia vibracional (e.g. o caminhar de uma pessoa, exercícios rítmicos em academias) quanto em situações de alta energia vibracional (e.g. um rotor em funcionamento). A ABNT NBR 6118 (ABNT,2014) indica algumas espessuras recomendadas para lajes maciças e a ABNT NBR 14861 (ABNT, 2011) recomenda espessuras para lajes alveolares. Porém, estas normas não estabelecem relação limite vão/espessura para essa tipologia de lajes (KAWAI, 2015). Neste contexto, a violação do ELS-VE gera valores significativos de deslocamento e aceleração, podendo causar dano estrutural como desconforto, problemas físicos e psicológicos nos usuários das edificações. Portanto, a frequência natural de um pavimento é importante por dois fatores, a influência das vibrações ocasionadas por forças dinâmicas e, por demonstrar como os usuários percebem essas vibrações, sendo que essas frequências podem até afetar alguns órgãos internos do corpo humano, tornando maior o incômodo. (MAST, 2001)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 VIBRAÇÕES EM LAJES ALVEOLARES

Durante a etapa inicial do projeto, os efeitos dinâmicos devem ser considerados adequadamente (PAVIC; REYNOLDS, 2002). Os trabalhos de MARCOS e CARRAZEDO (2014) e MARCOS (2015) são pioneiros no Brasil na análise de casos de vibração em lajes alveolares, demonstrando detalhadamente a metodologia para se efetuar a análise modal teórica e experimental, de um pavimento de edifício comercial em estrutura de concreto pré-moldado.

JOHANSSON (2009), desenvolveu um importante trabalho para avaliação subjetiva de conforto em lajes alveolares sujeitos a excitação do caminhar. Neste estudo, foi construído em laboratório um pavimento simplesmente apoiado com vão de 8 m, dentro dos limites recomendados pelas normativas. Testes subjetivos foram realizados em usuários, antes e depois do lançamento da capa de concreto. Os resultados apontaram que, a grande maioria das pessoas, classificou como inaceitável as vibrações induzidas por outra pessoa caminhando. Após a concretagem da capa, os resultados dos testes subjetivos indicaram que, a capa de concreto melhorou o desempenho de vibração, mas ainda eram classificadas como, claramente perceptíveis ou fortemente perceptíveis. Portanto ficou claro, pelo trabalho de JOHANSSON (2009) que a sensibilidade de vibração é algo subjetivo e pessoal. Neste sentido, PAVIC; REYNOLDS (2002) afirmaram que a caracterização de seres humanos como receptores de vibrações de piso é provavelmente o aspecto mais difícil do problema de manutenção da vibração do piso. Assim, é necessário extrema cautela ao interpretar a

multiplicidade de procedimentos e parâmetros existentes na literatura relacionados à percepção humana de vibrações.

2.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DINÂMICO E ANÁLISE MODAL

A ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) propõe a utilização de um modelo de análise dinâmica linear. Logo, para se determinar a eficiência de um determinado elemento em relação ao estado limite de serviço, é de interesse se efetuar uma análise modal teórica prévia para se caracterizar as frequências naturais e modos de vibração, estabelecendo critérios para a maior eficiência destes elementos.

Inicialmente, pode-se escrever o equilíbrio dinâmico tensorial de uma estrutura com um número arbitrário de graus de liberdade, conforme a Eq. (1) (EWINS, 1994; PAULTRE, 2011; WARBURTON, 1976):

$$(1) \quad [M]u + [C]u + [K]u = p(t)$$

Onde:

$[M]u$, é o termo que representa a inércia do sistema;

$[C]u$, é o termo que representa a força de amortecimento viscoso;

$[K]u$, é o termo que representa a força elástica.

Para efeito de análise modal, isto é, determinação das frequências naturais e modos de vibração do sistema mecânico, supõe-se um impulso aplicado à estrutura em intervalo de tempo muito curto ($p(t) = 0$), sendo possível reescrever (1), conforme a Eq. (2):

$$(2) \quad [M]u + [C]u + [K]u = 0$$

Como hipótese simplificadora, pode-se aceitar que o amortecimento é muito pequeno (e.g. $\xi = 2\%$, segundo BACHMANN et al. (1995)), e assim, para se obter as frequências naturais a estrutura pode descrever um comportamento livre e não amortecido, logo tem-se que $[C] = 0$, conforme a Eq. (3):

$$(3) \quad [M]u + [K]u = 0$$

Pela simples substituição, verifica-se facilmente que $u = \varphi_j \sin(w_{ij}t)$ é solução da Eq. (3), e assim, este sistema de equações é válido para qualquer instante de tempo, implicando na existência da Eq. (4):

$$(4) \quad ([K] - \omega^2[M])\varphi = 0$$

Portanto, conclui-se que além da solução trivial, este sistema apresentará solução não nula e indeterminada, se e somente se, o respectivo determinante for nulo, conforme a Equação (5):

$$(4) \quad ([K] - \omega^2[M])\varphi = 0$$

Portanto, conclui-se que além da solução trivial, este sistema apresentará solução não nula e indeterminada, se e somente se, o respectivo determinante for nulo, conforme a Equação (5):

$$(5) \quad \det[K] - \omega^2[M] = 0$$

Desta forma, chega-se a um problema generalizado de autovetores (φ_{ij}) e autovalores (ω_{ij}), onde para um sistema oscilatório de N graus de liberdade, os autovalores encontrados serão as frequências naturais angulares e os autovetores serão os modos de vibração correspondentes a estas frequências naturais. Portanto, definidas as matrizes de rigidez e massa do problema, é possível se efetuar a análise modal via simulação numérica.

2.3 LIMITAÇÃO DA FREQUÊNCIA NATURAL FUNDAMENTAL

Uma vez encontradas as frequências naturais da estrutura, a frequência fundamental (1º modo), deverá ser comparada com os valores de frequências críticas de acordo com a utilização do pavimento, conforme prescrições apresentadas pela ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014):

Tabela 1: Frequências críticas (ABNT NBR 6118:2014)

Finalidade da edificação	Freq. Crítica (Hz)
Ginásio/academias	8
Salas de dança ou concerto (s/ cadeiras fixas)	7
Passarelas	4,5
Escritórios	4
Salas de concerto (c/ cadeiras fixas)	3,5

Assim, conforme a ABNT NBR 6118:2014, quando o primeiro modo vibracional do pavimento analisado estiver pelo menos 20 % acima da frequência crítica, o mesmo apresenta um bom desempenho ao Estado limite de serviço de vibrações excessivas, conforme a equação:

$$(6) \quad f_{n1} > 1,2 f_{crit}$$

3 ESTUDO DE CASO

O presente artigo objetiva a realização de análise modal teórica para modelos numéricos de lajes alveolares. Neste sentido, foram realizadas 9 simulações numéricas de lajes alveolares, considerando variações de espessura e comprimento. Foi mantida a largura da laje em 110 cm, fck do concreto de 40 MPa e aço CA-50. A Figura 1 apresenta uma seção típica de laje alveolar analisada no presente artigo. A Tabela 2 apresenta os arranjos de laje alveolar estudados.

Figura 1 - Seção transversal de uma laje alveolar de 15 cm de espessura

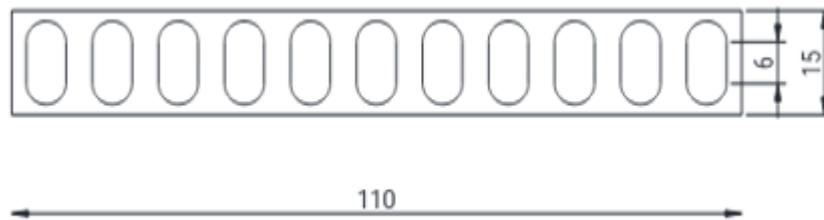


Tabela 2: Arranjos de Laje Alveolar

ID	Espessura (cm)	Comprimento da Laje (cm)
1 - E9C5	9	500
2 - E9C7	9	700
3 - E9C9	9	900
4 - E12C5	12	500
5 - E12C7	12	700
6 - E12C12	12	900
7 - E15C5	15	500
8 - E15C7	15	700
9 - E15C12	15	900

As simulações dos arranjos foram realizadas no software comercial de elementos finitos Abaqus CAE Simulia, utilizando uma malha de elementos finitos sólidos C3D8, com 1 cm de aresta, com um arranjo cúbico (TET). Para as armaduras, a consideração foi de elementos de treliça 3D (modelo T3D2), perfeitamente embutidas no concreto (Figura 2) com 1 cm. A Figura 3 apresenta a malha descrita acima, que foi utilizada nos elementos sólidos (Concreto). Foi utilizado o modelo de análise modal de Lanczos, onde foi estipulada uma frequência máxima de simulação de 40 Hz, partindo do valor inicial de 0 Hz.

Os módulos de elasticidade e densidade utilizados para cada material constituinte do modelo estão na Tabela 2. Cabe salientar que o módulo de elasticidade dinâmico do concreto C40 foi estimado conforme prescrições de GIDRÃO (2015). Foi utilizada a condição biapoiada, sem consideração de capa de concreto.

Figura 2 - Embutimento das armaduras na laje

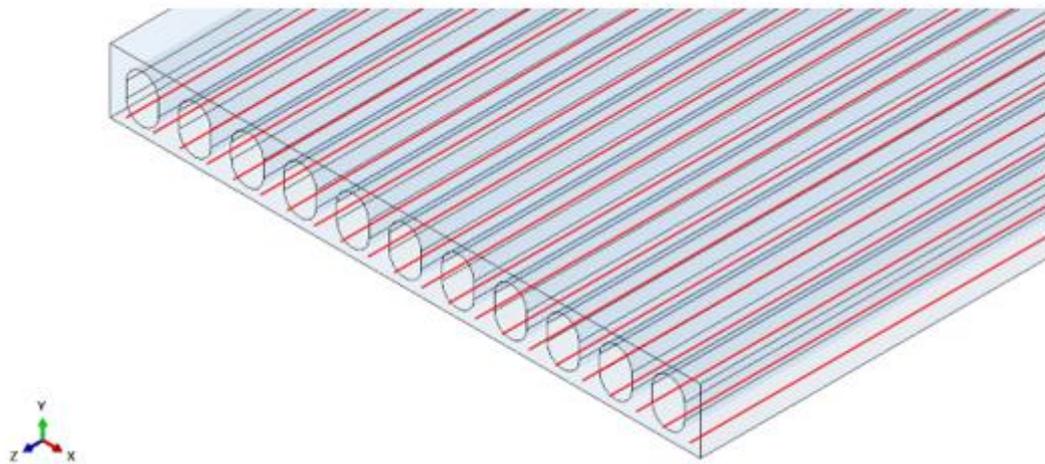


Figura 3 - Malha sólida característica de um modelo (E9C7)

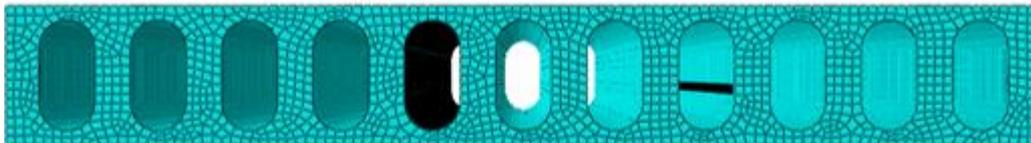


Tabela 3 - Materiais da Laje Alveolar

Material	Densidade (kg/m ³)	Ed (GPa)	Coefficiente de Poisson
Aço (CA-50)	7850	210	0,35
Concreto (C40)	2400	44	0,2

A modelagem no software segue uma sequência. O primeiro passo a ser realizado é a criação dos materiais, um para o concreto e outro para o aço, com seus respectivos valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, apresentados na Tabela 3. Prosseguindo com a modelagem, o segundo passo é o desenho das peças. As lajes são realizadas por extrusão de uma seção, de acordo com a Figura 1, com profundidade segundo o arranjo. O aço, é uma criação de fio, com comprimento referente ao arranjo. Posteriormente, deve ser criado uma seção para cada elemento para que cada elemento seja associado com seu respectivo material. As armaduras consideradas tem diâmetro de 1 cm. Após a criação e assimilação das seções, as malhas devem ser criadas nos elementos, conforme descritas acima e a figura 3. Depois da criação das malhas, os elementos devem ser colocados de forma que a armadura esteja colocada corretamente dentro das lajes, e o embutimento deve ser criado de acordo com a Figura 2. As condições de contorno são aplicadas nas arestas inferiores das

extremidades da laje e consideradas como apoios de 1º gênero. O Step ou operação realizada é uma perturbação linear de frequência com os limites vibracionais entre 1 e 40 Hz.

4 RESULTADOS

As figuras abaixo apresentam o primeiro (Figura 4) e segundo modo vibracional (Figura 5) característico das lajes estudadas no presente artigo. Nota-se que o primeiro modo vibracional é de flexão simples, sendo este o mais crítico pois é o que requer menos energia para excitação. Os modos de vibração superiores (e.g. segundo modo vibracional da Figura 5) requerem maior energia para serem excitados.

Figura 4 - 1º Primeiro modo vibracional

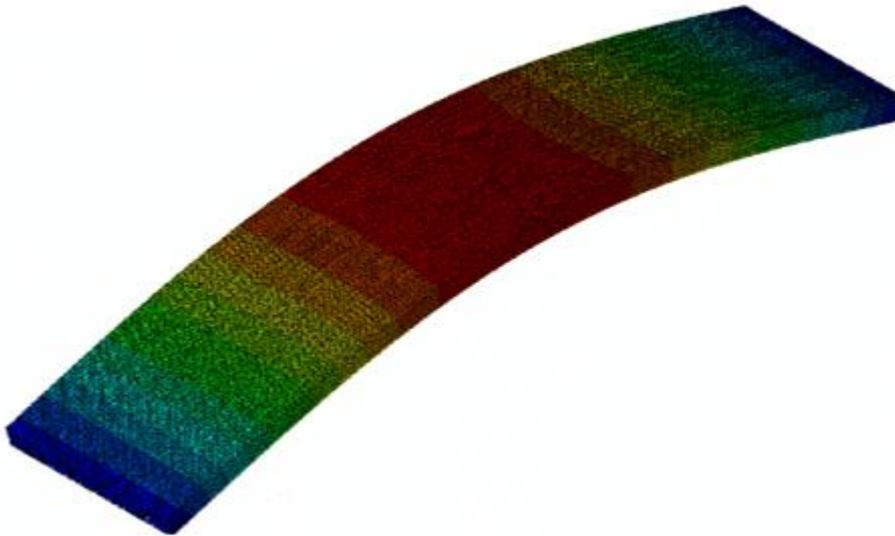
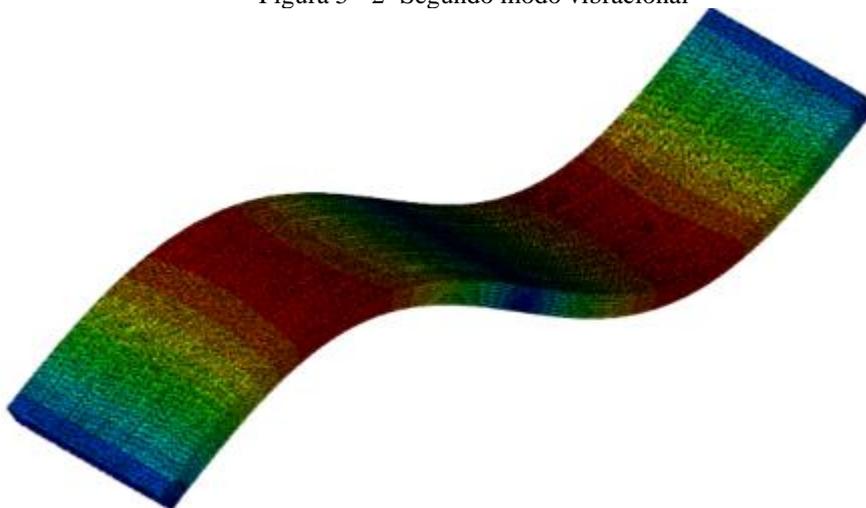


Figura 5 - 2º Segundo modo vibracional



As primeiras análises foram realizadas nas lajes de 9 cm de espessura e comprimento inicial de 5 m. Após a conclusão, foi determinada uma primeira frequência natural de 2,99 Hz e uma segunda de 11,8 Hz. Uma análise posterior, com um aumento no comprimento da laje em 2 m, totalizando 7 m, foi observado um decréscimo de 49% em relação à primeira frequência natural. Sucessivamente, o aumento de mais 2 m, com um comprimento final de 9 m, houve acentuada queda no valor de frequência, totalizando 69% menor em comparação à primeira análise.

As mesmas análises foram efetuadas para uma laje com 12 cm de espessura e mais 3 em lajes com 15 cm de espessura, com comprimento inicial de 5 m, variando até um total de 9 m. Os resultados obtidos para os arranjos estão apresentados no gráfico abaixo:

Gráfico 1 - Frequências naturais para cada arranjo

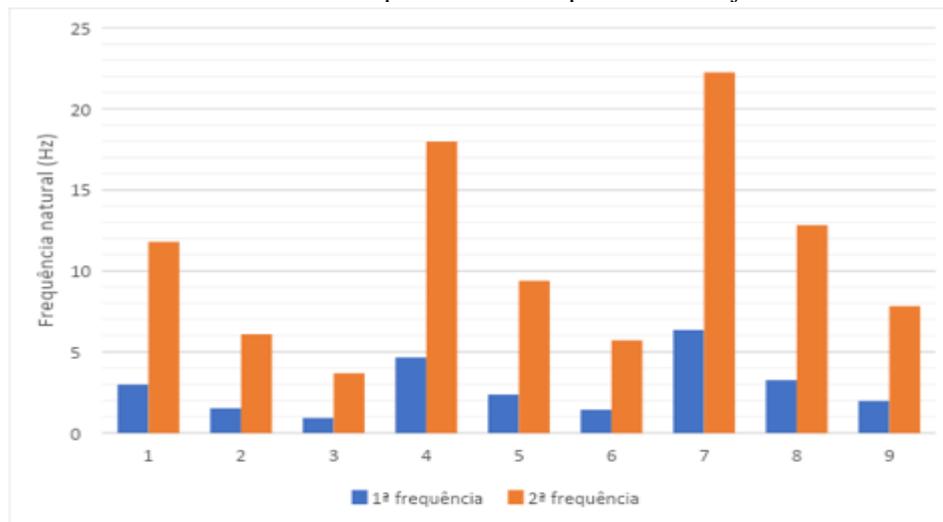


Tabela 4 – Valores obtidos de frequência natural para os arranjos em Hz.

Espessura	Comprimento	1ª frequência	2ª frequência
9 cm	5 m	2,99	11,8
	7 m	1,53	6,08
	9 m	0,93	3,69
12 cm	5 m	4,65	17,97
	7 m	2,37	9,39
	9 m	1,44	5,71
15 cm	5 m	6,36	22,26
	7 m	3,26	12,82
	9 m	1,98	7,83

Os resultados apresentam a relação da espessura da laje com seu comprimento, tendo como resultado uma influência direta na frequência natural das lajes alveolares. Fazendo um comparativo entre as espessuras das lajes, tomando como parâmetro as lajes de 9 cm, é evidente que, com o aumento da espessura para 12 cm e 15 cm, as frequências naturais aumentaram, indicando um aumento na rigidez da estrutura relacionada com o aumento da sua espessura.

Gráfico 2 - Aumento da 1ª frequência natural

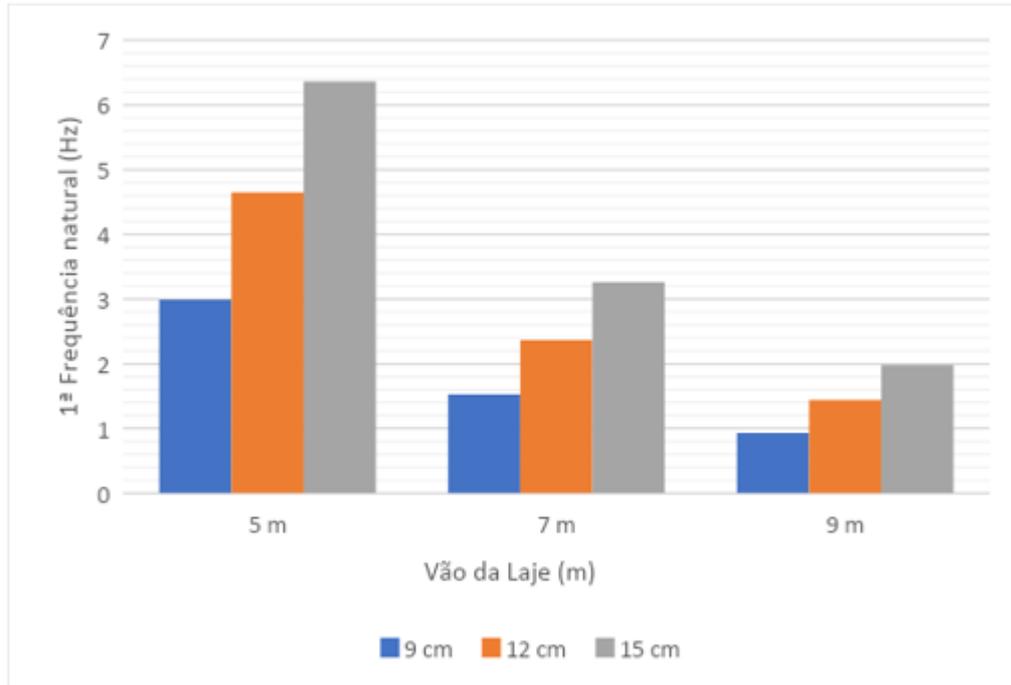
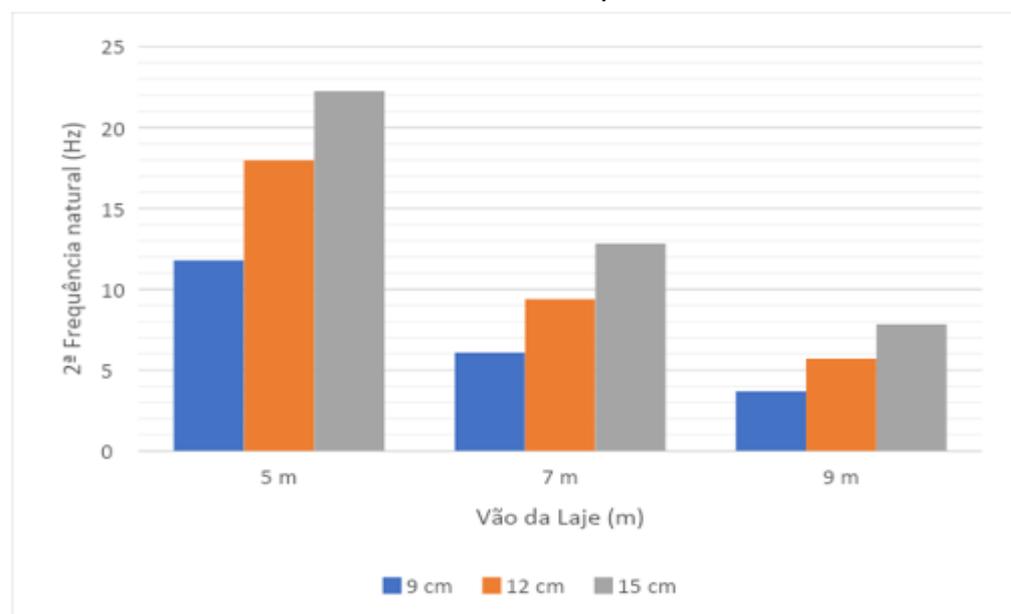


Gráfico 3 - Aumento da 2ª frequência natural



Após a obtenção das frequências naturais dos arranjos, pode-se então comparar esses valores com os limites vibracionais fornecidos pela ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) e então, classificar os arranjos de lajes alveolares de acordo com os valores situacionais e as frequências. Os limites fornecidos estão indicados nos gráficos com auxílio de cores, de modo a facilitar a visualização, e seguem a relação indicada abaixo:

- Azul: 8 Hz Ginásio e academias;
- Vermelho: 7 Hz Salas de dança ou concerto (s/ cadeiras fixas);
- Verde: 4,5 Hz Passarelas;
- Roxo: 4 Escritórios;
- Preto: 3,5 Salas de concerto (c/ cadeiras fixas);

Gráfico 4 - Classificação quanto ao uso para lajes de 9 cm de espessura

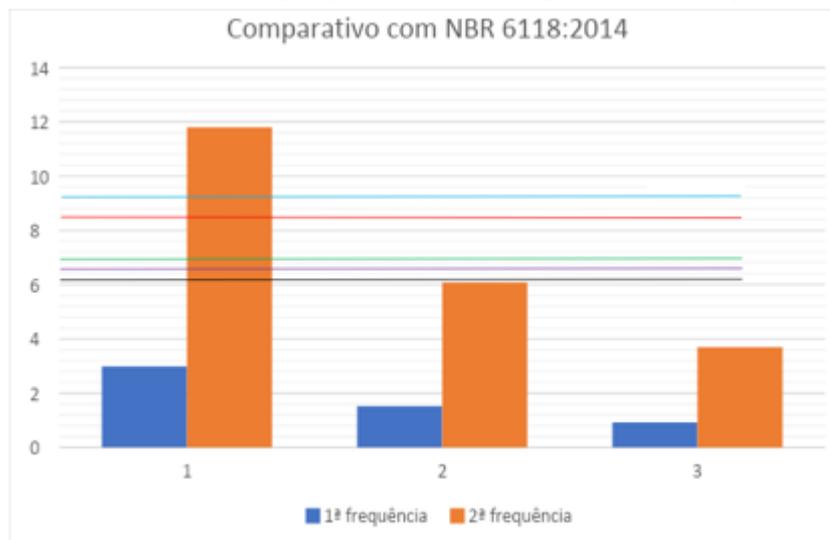


Gráfico 5 - Classificação quanto ao uso para lajes de 12 cm de espessura

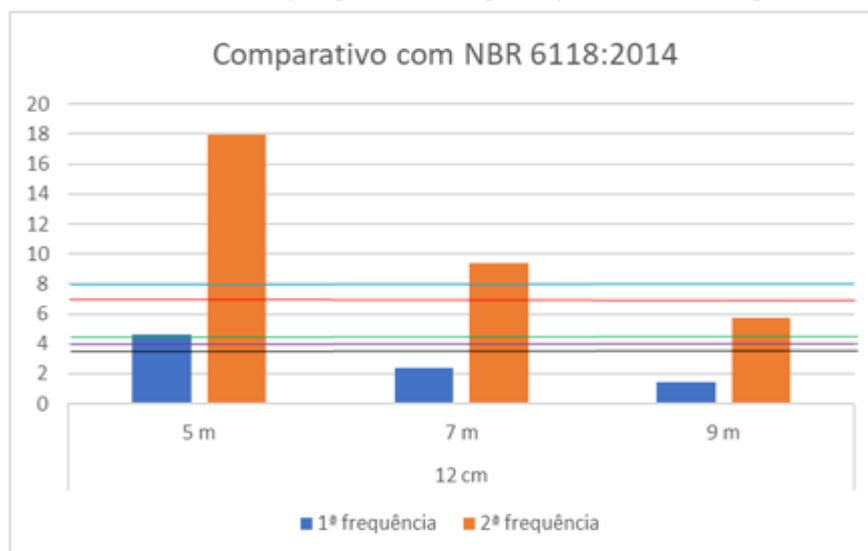
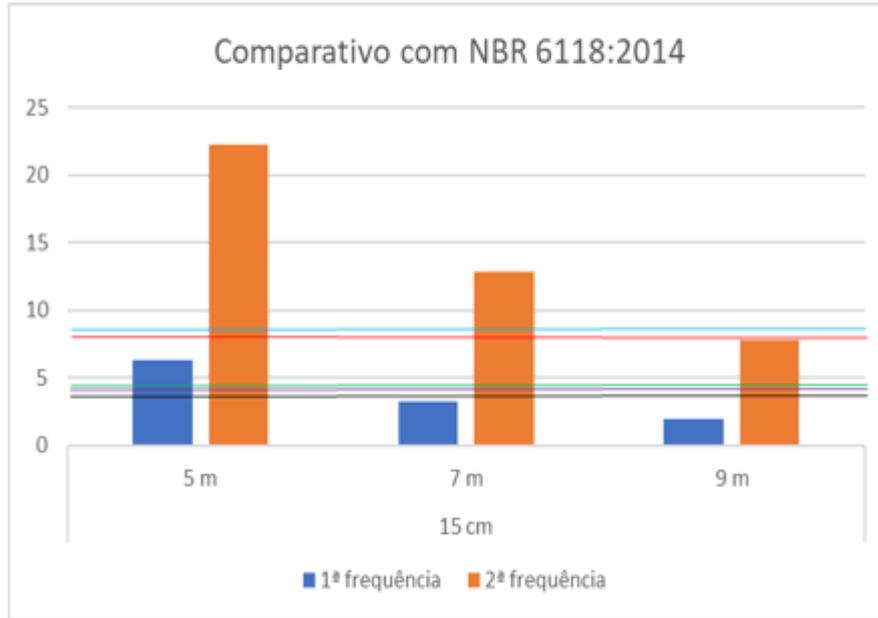


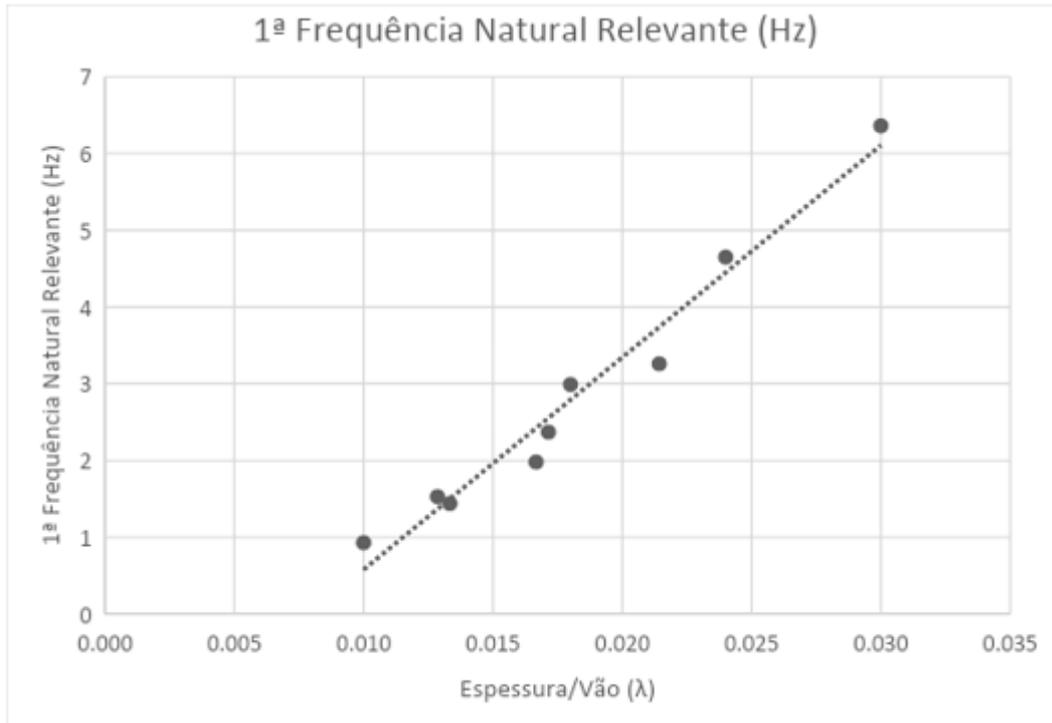
Gráfico 6 - Classificação quanto ao uso para lajes de 15 cm de espessura



É importante salientar que, a maioria dos arranjos, não obtiveram dados satisfatórios em relação ao uso de acordo com a norma, pois, deve-se considerar para comparação com a norma apenas os valores respectivos a 1ª frequência natural, no 1º modo vibracional, já que apresentam maior facilidade de que a ressonância seja atingida com baixas energias, caracterizando este modo como o mais crítico para a estrutura, então podem ser descartados da análise os valores respectivos a 2ª frequência natural. Sendo assim, apenas o arranjo E15C5, apresenta média eficiência, sendo aplicável em passarelas, escritórios ou salas de concerto (c/ cadeiras fixas). Por esse motivo, mesmo garantida a segurança aos estados limites últimos, deve-se analisar com cuidado as situações onde se combinam vãos grandes e espessuras pequenas.

Para melhor visualização, abaixo é demonstrado no gráfico abaixo, a influência da relação entre a espessura da laje e o vão ($\lambda = h/L$) com a frequência natural fundamental (i.e., 1º modo de vibração flexional) ($R^2 = 0,968$), conforme o gráfico abaixo.

Gráfico 7 - Relação vão/espessura para a 1ª frequência natural relevante



5 CONCLUSÃO

O artigo apresenta a importância da verificação de estado limite de serviço de vibrações excessivas e demonstra a metodologia preliminar de análise modal teórica para verificação desta situação em lajes alveolares. Após as análises, cabe destacar alguns pontos:

- Foram apresentados os modos de vibrações básicos que podem ser observados em casos de lajes alveolares, sendo o modo flexional simples àquele mais suscetível de ser excitado em uma situação em campo por apresentar uma frequência natural mais baixa;
- É possível determinar equações mais precisas, porém, é necessária uma maior coleta de dados e simulações. Essa coleta se faz extremamente trabalhosa, devido ao tempo elevado demandado para cada simulação.
- Cabe em análises futuras, identificar uma possível influência da aplicação de protensão nos painéis nas frequências naturais.
- Não se pode estimar a tolerância que cada indivíduo tem sobre cada situação e as manifestações dessas vibrações, porém, utilizar pessoas para uma análise laboratorial pode vir a ser útil na falta de modelos mais assertivos.
- Em futuros trabalhos, pode-se comparar normas internacionais que apresentem outros valores limites para situações não contempladas pela norma e outros métodos.

Portanto, realizar uma simulação em elementos finitos para análise do ELS-VE é imprescindível para uma estrutura esbelta como um painel de laje alveolar.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. In: 6118 2014, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro
- BACHMANN, Hugo et al. *Vibration Problems in Structures - Practical Guidelines*. [s. l.], 1995.
- EWINS, D. J. *Modal Testing: Theory and Practice*. New York: Britisg Library, 1994.
- GIDRÃO. PROPRIEDADES DINÂMICAS DO CONCRETO E RELAÇÕES COM SUA MICROESTRUTURA. 2015. Universidade de São Paulo, [s. l.], 2015.
- GIDRÃO, Gustavo; KRAHL, Pablo; CARRAZEDO, Ricardo. Characterization of concrete internal damping. In: 30 ENCONTRO LUSO-BRASILEIRO DE DEGRADAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO SÃO CARLOS, SÃO PAULO, BRASIL 22 2018, São Carlos. Anais... São Carlos Disponível em: <https://degrada2018.faiufscar.com/anais#/>
- JOHANSSON, Pia. *Vibration of Hollow Core Concrete Elements Induced by Walking*. [s. l.], 2009.
- MARCOS, L. K.; CARRAZEDO, R. Parametric study on the vibration sensitivity of hollow-core slabs floors. *Proceedings of the International Conference on Structural Dynamic , EURODYN*, [s. l.], v. 2014–Janua, n. July, p. 1095–1102, 2014. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84994417668&partnerID=40&md5=abeaccd1646e17f1d9bbd140fae7b10d>
- MARCOS, LARA KAWAI. *Sensibilidade a vibrações de pavimentos com lajes alveolares*. 2015. Universidade de São Paulo, [s. l.], 2015.
- MAST, R. F. *Vibration of Precast Prestressed Concrete Floors*. *PCI Journal*, p. 11, 2001.
- PAULTRE, Patrick. *Dynamics of Structures*. London: ISTE ltd/Wiley, 2011.
- PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Vibration serviceability of long-span concrete building floors. Part 1: Review of background information. *Shock and Vibration Digest*, [s. l.], v. 34, n. January, p. 191–211, 2002.
- WARBURTON, G. B. *The Dynamical Behaviour of Structures*. 2. ed. New York: PERGAMON PRESS OXFORD, 1976.