ESTUDO DE CASO DE PAINÉIS ALVEOLARES SUJEITOS AO ESTADO LIMITE DE SERVIÇO DE VIBRAÇÕES EXCESSIVAS

PIVA, Iago (1); GIDRÃO, Gustavo de Miranda Saleme (2); SANTOS, Danilo Pereira (3)

(1) Aluno, Fundação Hermínio Ometto, iagopiva111@gmail.com;

(2) Professor Msc. Fundação Hermínio Ometto, Gustavo.gidrao@gmail.com

(3) Mestrando, Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos, danilopereira.eng@usp.br

Resumo: O presente artigo reporta sobre a importância da verificação do Estado limite de vibrações excessivas (ELS-VE) de pavimentos pré moldados de painéis alveolares. Para o estudo foi utilizado um painel alveolar em concreto armado de 15 cm de altura modelado em elementos finitos sólidos com armaduras em elementos de treliça (T3D2) completamente embutidas dentro do concreto. Foi realizada análise modal teórica para se obter, as frequências naturais fundamentais para vãos de 5, 7 e 9 metros. Efetuou-se então, uma verificação de frequência crítica para ELS-VE conforme a ABNT NBR 6118:2014 e foi verificado que somente a laje com 5 metros foi satisfatória em relação a situações de utilização como escritórios ou salas de concerto. Evidentemente o sistema construtivo de painéis alveolares, revolucionou a construção civil, porém, ainda é escasso estudos da sua verificação em relação ao ELS-VE cuja metodologia é apresentada no presente artigo se faz importante para garantia da qualidade e eficiência. Além disso, é necessário salientar que uma limitação do estudo aqui desenvolvido é que o painel isolado é mais suscetível ao estado limite de vibrações excessivas, uma vez que conforme a literatura afirma, a capa aumenta a frequência natural da laje alveolar, melhorando o desempenho dinâmico.

Palavras-chave: *Vibrações Excessivas, Painéis Alveolares, Frequência Natural.*

Área do Conhecimento: *Qualidade e desempenho de produtos e sistemas construtivos*

1 INTRODUÇÃO

Devido à otimização da inércia, utilização de materiais com rígido controle de qualidade e aplicação de protensão, os painéis alveolares, se mostram, uma excelente alternativa para vencer grandes vãos. Entretanto a combinação de materiais com altas resistências, resultam em baixo amortecimento interno (GIDRÃO; KRAHL; CARRAZEDO, 2018), grandes vãos, peças mais leves e mais esbeltas podem ter efeitos colaterais como vibrações excessivas. Tal patologia pode se desenvolver tanto com excitações de baixa energia, por exemplo o caminhar de pessoas, movimentos rítmicos de academias, e ainda vibrações forçadas induzidas pelo movimento de grandes rotores. Em todos estes casos pode-se observar uma queda da eficiência da estrutura e desconforto para os usuários, podendo até em alguns casos ser observado um desenvolvimento de doenças físicas e psicológicas. Portanto, fica demonstrada a importância do estudo do comportamento dinâmico de estruturas de concreto armado, sobretudo a avaliação do conforto e dos aspectos dos estados limites de serviço de vibrações excessivas (ELS-VE).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vibrações em lajes alveolares

Um estudo realizado por PAVIC e REYNOLDS (2002), afirma 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 necessária extrema cautela ao interpretar a multiplicidade de procedimentos e parâmetros existentes na literatura relacionados à percepção humana de vibrações.

JOHANSSON (2009) desenvolve importante trabalho para avaliação subjetiva de conforto em lajes alveolares sujeitas a excitação do caminhar. Neste estudo, foi construído em laboratório um pavimento simplesmente apoiado com vão de 8 m, dentro dos limites normativos. Testes subjetivos foram realizados em usuários antes e depois do lançamento da capa de concreto. Os resultados apontaram que 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 desempenho de vibração, mas as vibrações ainda eram classificadas como claramente perceptíveis ou fortemente perceptíveis. Portanto fica claro pelo trabalho de JOHANSSON (2009) que a sensibilidade de vibração é algo subjetivo e pessoal.

A verificação da vibração deve ser feita em uma etapa inicial do projeto (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.

2.2 Formulação do problema dinâmico e análise modal

A ABNT NBR 6118:2014 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 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 equilíbrio dinâmico tensorial de uma estrutura com número arbitrário de graus de liberdade, conforme a 2ª Lei de Newton.

1

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 a 2ª Lei de Newton, conforme a Eq.(1):

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = 0 \quad (1)$$

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

$$[M]\ddot{u} + [K]u = 0 \quad (2)$$

Pela simples substituição, verifica-se facilmente que $u = \phi_{ij} \sin(w_{ij} t)$ é solução da Eq. (2), e assim, este sistema de equações é válido para qualquer instante de tempo, implicando na existência da Eq.(3):

$$([K] - \omega^2 [M])\phi = 0 \quad (3)$$

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(4):

$$\det\left|[K] - \omega^2 [M]\right| = 0 \,(4)$$

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 Limite 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 paviemtno, conforme prescrições apresentadas pela ABNT NBR 6118:2014 (i.e.,Tabela 1):

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

Finalidade da edificação	Freq. crítica
Ginásio/academias	8,0
Salas de dança ou concerto (s/ cadeiras fixas)	7,0
Passarelas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto (c/ cadeiras fixas)	3,5

Assim e 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 bom desempenho ao Estado limite de serviço de vibrações excessivas, conforme a Eq. 5:

$$f_{n1} > 1{,}2 f_{crit} \quad (5)$$

3 ESTUDO DE CASO

No presente artigo será efetuado um estudo de caso de análise modal teórica para um painel alveolar de 15 cm de altura, com vãos de 5, 7 e 9 metros, largura de 111 cm, alvéolos de 12 cm, constituída de concreto armado C40, e armaduras de CA-50. Esse painel apresenta algumas características encontradas em painéis comercializados, porém adaptado para o estudo, devido às diferenças geométricas entre fabricantes. As características geométricas deste elemento são conforme a Figura 1.

Figura 1 – Estudo de caso: características (a) malha de elementos finitos, (b) seção transversal para o painel alveolar e (c) disposição das armaduras.

(a)

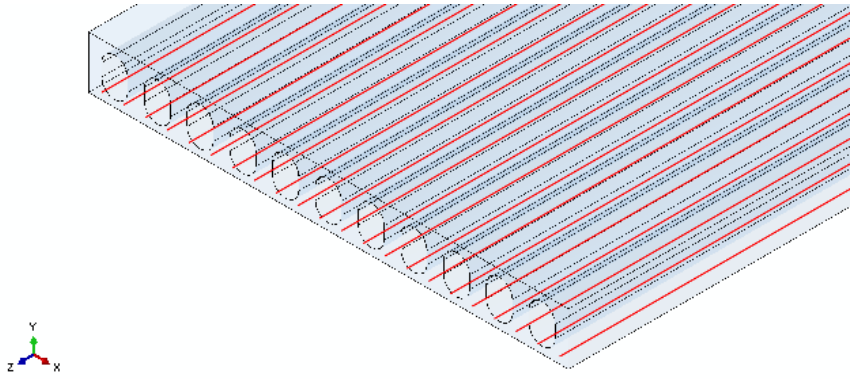


(b)





(c)



Para esta simulação numérica foi utilizada uma fina malha de aproximadamente 1 cm, de elementos finitos sólidos C3D8, implementados no software comercial Abaqus CAE Simulia. As barras de armaduras foram consideradas como treliças 3D (i.e., modelo T3D2) perfeitamente embutidas dentro do sólido concreto. As condições de contorno utilizadas na simulação foi a de uma viga simplesmente apoiada nas extremidades dos painéis. Os módulos de elasticidade e densidade utilizados para cada material constituinte do modelo são conforme a Tabela 2. Cabe salientar que o módulo de elasticidade dinâmico do concreto C40 foi estimado conforme prescrições de GIDRÃO (2015). Foi utilizada a condição bi apoiada. Não foi considerada capa de concreto.

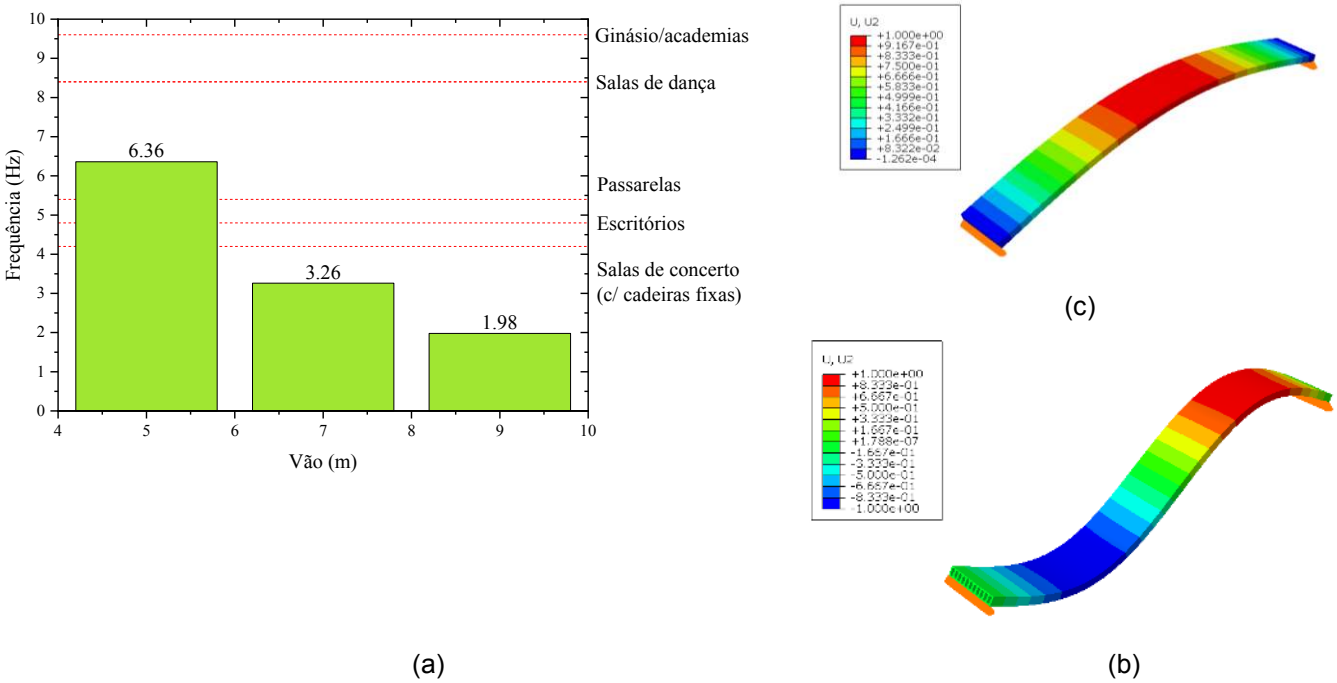
Tabela 2 – Materiais da laje alveolar

Material	Densidade (kg/m³)	E_d (GPa)	Coeficiente de Poisson
Aço	7850	210	0,35
Concreto (C40)	2400	44	0,2

4 RESULTADOS

A Figura 2.a apresenta as frequências naturais fundamentais de flexão em função do vão de painéis isolados. Nota-se que o aumento de 5 m para 9 m de vão gerou um decréscimo de 70% na frequência natural do elemento. O painel isolado com 5 metros de vão poderia ser utilizada na situação de passarelas, escritórios e salas de concerto, conforme a verificação de ELS-VE da ABNT NBR 6118:2014 (Eq. 5). Por outro lado, peças com grandes vãos de 7 m e 9 m não passariam em nenhuma situação. Outro fator interessante é que nenhum painel atendeu a situação de utilização de ginástica e salas de dança. Já a Figura 2.b e c apresentam respectivamente o modo de vibração flexional fundamental característico para o painel alveolar de 9 metros de vão (1,98 Hz) e o segundo modo de vibração para a mesma peça (7,83 Hz). Cabe salientar que a verificação da Eq. 5 é somente para o modo fundamental, uma vez que para a excitação deste modo se requer uma menor energia. Além disso, a consideração da capa e das armaduras de cisalhamento provavelmente iriam reduzir a frequência natural das lajes.

Figura 2 – (a) Frequências naturais, (b) 1º modo de vibração flexional – fundamental, (c) 2º modo flexional



5 CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou uma breve revisão bibliográfica e um estudo de caso para a verificação de estado limite de vibrações excessivas em painéis alveolares de concreto armado. Neste contexto, os principais pontos podem ser destacados:

- Devido a fatores como o avanço e precisão dos modelos de estado limite último, aumento da resistência dos concretos, otimização de seções transversais e diminuição do amortecimento interno, Estados limites de serviço como é o caso de vibrações excessivas podem ser críticos. Além disso e segundo a literatura, uma verificação prévia na fase de concepção deve ser efetuada;
- Esta verificação prévia de um painel alveolar isolado pode ser efetuada conforme a metodologia apresentada no presente artigo, onde se efetua a análise modal teórica por meio da obtenção de autovetores e autovalores de um sistema dinâmico;
- O aumento de 1,8 vezes para o vão gerou a diminuição de 70 % da frequência natural do painel, demonstrando a grande dependência entre o vão e a frequência natural, conforme esperado;
- Este resultado demonstra que o ELS-VE é uma condição muito crítica, devendo ser analisada de forma criteriosa, principalmente em situações de grandes vãos;
- Como objeto de futuras investigações, pode-se verificar a influência da protensão na verificação do ELS-VE;
- A verificação do ELS-VE é importante na garantia da qualidade do sistema construtivo de lajes alveolares;
- Cabe salientar que a verificação de frequências da ABNT NBR 6118:2014 apresenta certa limitação no sentido de não ser capaz de mensurar a tolerância que cada usuário têm sobre as vibrações,

mas é muito útil na falta de modelos mais precisos.

6 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.

DASSAULT SYSTEMES SIMULIA. Abaqus Documentation, [s. d.]. Disponível em: <http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/index.html>. Acesso em: 1 de jun de 2019.

EWINS, D. J. **Modal Testing : Theory and Pratice**. 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: 3O 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 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.

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.