



VIBRAÇÕES INDUZIDAS EM LAJE DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO.

Matheus Nunes Reis

Thiago Araujo Macedo

Rosanna Duarte Fernandes Dutra

matheusnreis95@gmail.com

thiagoaramac@gmail.com

rosanna.dutra@uniceub.br

Centro Universitário de Brasília - UniCEUB

SEPN, 707/907, Via W 5 Norte - Asa Norte, Brasília - DF, 70790-075, Brasil.

Resumo. *Vibrações indesejadas em estruturas são um exemplo comum de estados limites de serviço em estruturas, podendo gerar desde leve desconforto aos usuários quanto condições de estado limite último por fadiga. Dentre muitos fatores relacionados ao surgimento de vibrações, pode-se destacar a alteração do uso da estrutura. O presente trabalho trata de um estudo de caso de duas lajes em concreto armado, originalmente projetadas para serem um depósito de materiais esportivos, e posteriormente utilizadas como local de treinamento de artes marciais, em um clube em Brasília-DF. O estudo visa identificar as deformações devidas aos carregamentos e as vibrações induzidas devidas ao ritmo do treinamento marcial dos usuários. Serão efetuadas análises estruturais e modais com auxílio dos softwares Eberick V10, TQS 19 e ANSYS V18, para a determinação de flechas, frequências naturais, deslocamentos, velocidades e acelerações induzidas. Uma vez obtidos os resultados de análise, estes serão comparados com as limitações em serviço estabelecidas pela ISO 2631-2, DIN 4150-4 e NBR 6118:2014.*

Palavras-Chave: *Vibração, Frequência Natural, Análise Modal, Laje*

Abstract. *Undesirable vibrations in structures are a usual example of serviceability limit state in structures, and may lead from user's discomfort to fatigue ultimate limit states. In many factors related to cause vibrations, one can highlight the change of structure usage. This paper is a case study of a couple of reinforced concrete slabs, originally designed to be a sports materials storage, and then it's been used as a martial arts training place, inside a club in Brasília-DF. The study aims to identify the deflections caused by loads and the martial training induced vibrations. The structural and modal analyses will be run within the softwares Eberick*

V10, TQS 19 and ANSYS V18, determining the deflections, natural frequency, accelerations, velocities and induced deformations. Once the results are obtained, they'll be compared to the serviceability limitations established by ISO 2631-2, DIN 4150-4 and NBR 6118:2014.

Keywords: *Vibration, Natural Frequency, Modal Analyses, Slab*

INTRODUÇÃO

Dentre os problemas que estruturas podem apresentar, as vibrações originadas por ações dinâmicas (periódicas ou transientes) são um tipo de patologia que projetistas costumam negligenciar. Lajes são elementos esbeltos que podem sofrer com ações dinâmicas em ginásios, academias de dança e locais de treinamentos de esportes.

Neste contexto, o presente trabalho descreve o problema observado em uma laje situada em um clube que passou por alteração de utilização e os usuários passaram a se queixar de vibrações excessivas. Apresenta também embasamento teórico a respeito da definição de frequências naturais e reúne aspectos normativos sobre acelerações toleráveis.

1 ASPECTOS GERAIS

Segundo LIMA (2007), é frequente que sejam verificadas alterações de uso em estruturas que culminam no surgimento de carregamentos dinâmicos não previstos em projetos. Exemplo disso é a utilização de edifícios comerciais para funcionamento de academias de ginástica.

Carregamentos humanos ocorrem essencialmente em baixas frequências, podendo entrar em ressonância com a frequência natural das estruturas. Battista & Varela (2002) constataram problemas de vibração excessivas em lajes de edificações residenciais, causando desconforto aos usuários mesmo em concordância com critérios normativos vigentes.

MOURING (1992) investiga carregamentos causados por atividades humanas e suas respectivas respostas dinâmicas em estruturas, e visa desenvolver procedimentos analíticos para a quantificação da influência de cada aspecto dos carregamentos na resposta estrutural. Segundo a autora, os elementos que mais contribuem para a componente vertical do carregamento são peso, sexo, idade, velocidade, razão de passo, comprimento do passo, particularidades do passo, calçado e superfície sobre a qual se caminha. Em geral, a razão de passo varia entre 1,5 Hz a 2,9 Hz.

No Distrito Federal, BALTAR (2000) fez uma análise computacional de passarelas de pedestres, objetivando obter as características dinâmicas e seu comportamento sob carregamentos transientes. Em todos os casos foram feitas uma série de análises: Estática para obtenção dos deslocamentos nodais da estrutura; Modal para a obtenção das frequências naturais de vibrações associadas; Transiente para a obtenção das forças e acelerações geradas pelos carregamentos variáveis.

2 ESTUDO DE CASO

2.1 Localização

A edificação em estudo é um ginásio de esportes, encontrado em um clube em Brasília/DF nas imediações da avenida L4 Sul. (Fig. 1)



Figura 1. Localização da estrutura. (Fonte: Autor, 2017)

2.2 Descrição da estrutura

A edificação é um galpão em concreto armado com cobertura metálica, e conta com um segundo pavimento, originalmente utilizado como DML, agora utilizado como local de treino de artes marciais. (Fig. 2 e 3)



Figura 2. Vista do pavimento superior. (Fonte: Autor, 2017)



Figura 3. Vista interna. (Fonte: Autor, 2017)

3 CRITÉRIOS E NORMAS UTILIZADAS

3.1 Norma brasileira NBR 6118/14

Esta norma é fundamentada no preceito de frequência fundamental mínima estabelecendo que a frequência da estrutura seja maior ou igual à frequência crítica (f_{crit}) majorada em 20%, de acordo com os valores na Tabela 1.

O processo estabelecido tem como objetivo afastar a frequência fundamental da estrutura dos primeiros harmônicos gerados pelas cargas de ações humanas, evitando, assim, o efeito de ressonância. De acordo com Varela (2004) a estrutura pode apresentar vibrações incômodas mesmo que a estrutura tenha frequência natural afastada das frequências de utilização.

Tabela 1. Frequência crítica para vibrações em alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas (Fonte: NBR 6118/2014)

Caso	f_{crit} (HZ)
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8.0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7.0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4.5
Escritórios	4.0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3.5

A mesma norma preconiza que as flechas totais instantâneas atendam ao critério de $L/250$ para conforto visual dos usuários das estruturas relacionados à aceitabilidade sensorial. Importante citar que L é considerado o vão de elementos sustentados nas extremidades por apoios imóveis, podendo ser utilizado também em situações de balanço, porém, com o valor dobrado. Em situação de verificação de superfície, L deve ser considerado o menor vão.

3.2 Norma ISO 2631-2

Esta norma faz uma avaliação da exposição do ser humano na exposição de corpo inteiro a vibrações e colisões em edificações. A Fig. 4 ilustra valores recomendados de acelerações máximas a diversas estruturas em variadas frequências, de forma a garantir o conforto e reduzindo a percepção de vibrações durante atividades humanas.

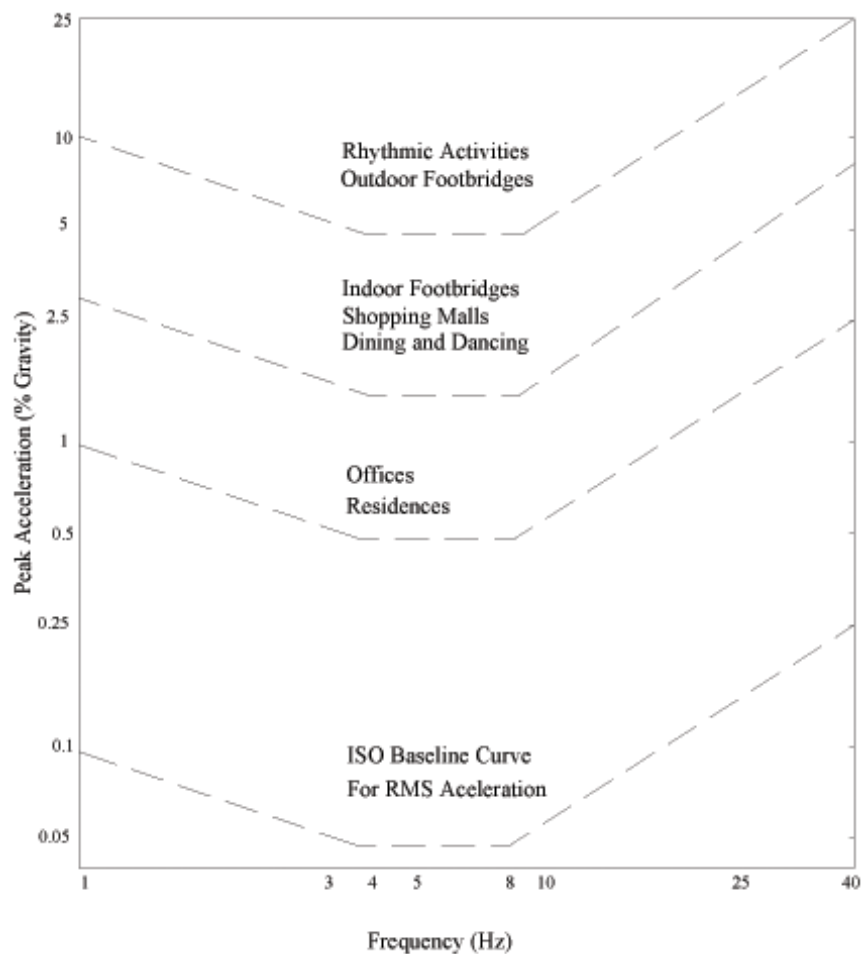


Figura 4. Pico de aceleração recomendado para conforto humano relacionado a vibrações de atividades humanas (Fonte: ISO 2631-2/2003)

3.3 Norma DIN 4150-4

Esta norma relaciona-se a vibrações em estruturas, trazendo recomendações de parâmetros dinâmicos. A Tabela 2

Tabela 2. Valores máximos aceitáveis de amplitude da velocidade (em mm/s) (Fonte: DIN 4150-4/1986)

Finalidade do edifício	Para nível de fundação			No andar superior (para qualquer nível de frequência)
	$1 \text{ Hz} < f < 10 \text{ Hz}$	$10 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$	$50 \text{ Hz} < f < 100 \text{ Hz}$	
Comercial, industrial	20 mm/s	20 a 40 mm/s	40 a 50 mm/s	40 mm/s
Moradia	5 mm/s	5 a 15 mm/s	15 a 20 mm/s	15 mm/s
hospitais, bibliotecas (e outros tipos de funções que exigem limitação espacial de níveis de vibração)	3 mm/s	3 a 8 mm/s	8 a 10 mm/s	8 mm/s

3.4 Carregamento dinâmico devido à caminhada e corrida

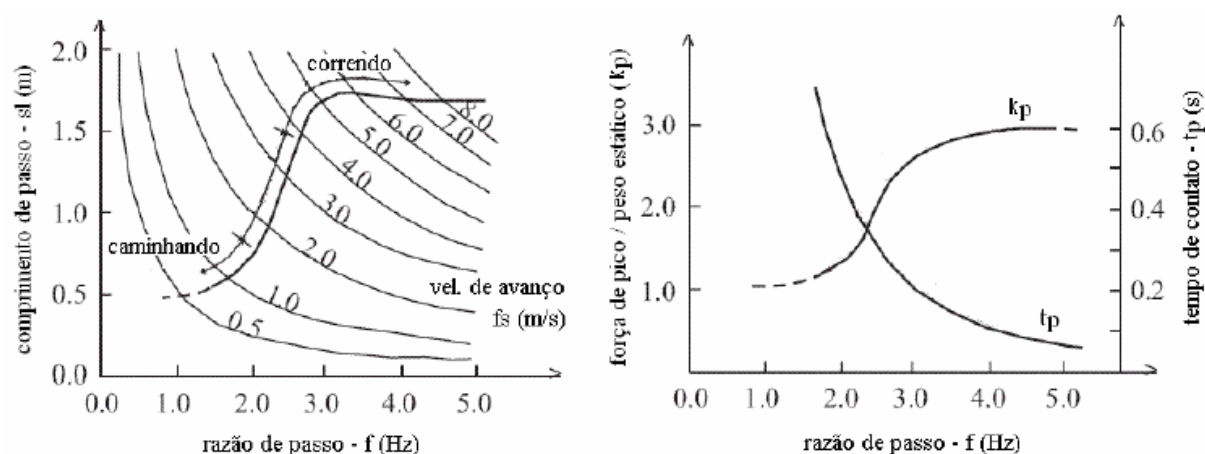


Figura 5. Correlações entre os parâmetros que definem os movimentos de caminhar e correr (Fonte: WHEELER, 1982)

A Fig.5 mostra as correlações entre comprimento de passo e razão de passo no gráfico à esquerda e entre, também, a força de pico, razão de passo e tempo de contato, no gráfico à direita.

4 ANÁLISES NUMÉRICAS NO ANSYS

Foi desenvolvido modelo numérico no *software* ANSYS V18 para realização do estudo dos modos de vibração e vibrações induzidas na laje da estrutura. A Fig. 6 mostra a estrutura das lajes, vigas e pilares modelados no *software*.

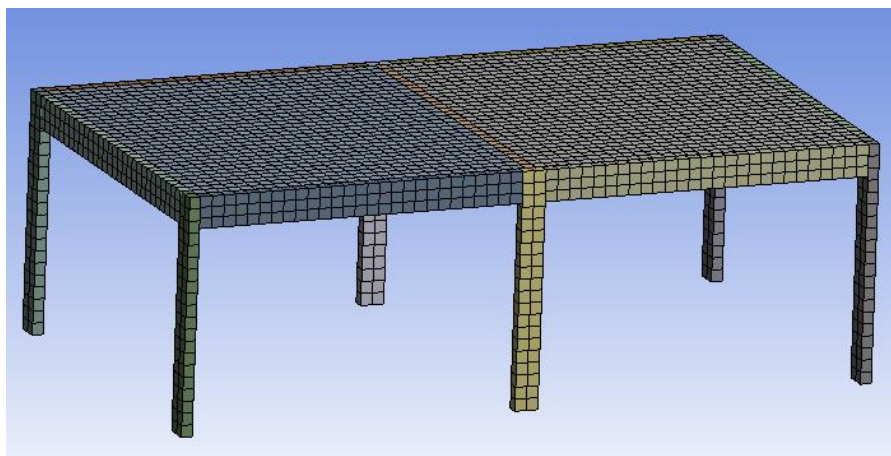


Figura 6. Modelo gerado no ANSYS V18.

As Fig. 7, 8 e 9, à seguir, mostram os seis primeiros modos de vibrar e seus para a estrutura em questão.

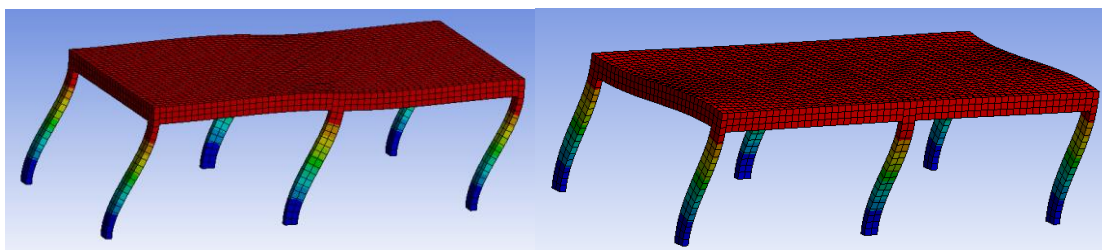


Figura 7. 1º modo ($f = 4.247$ Hz) à esquerda e 2º modo ($f = 5.010$ Hz) à direita

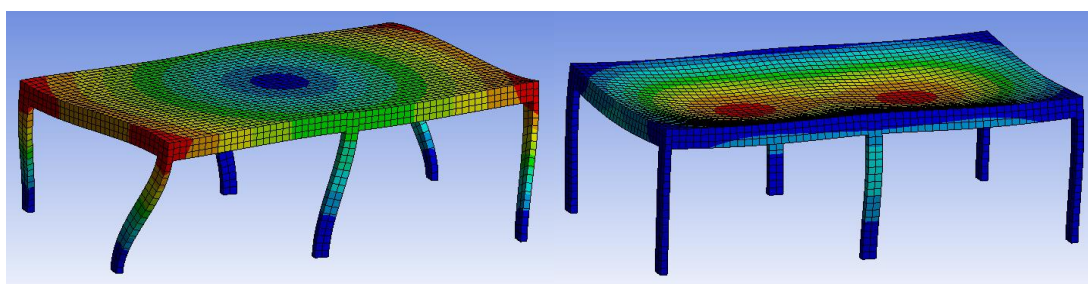


Figura 8. 3º modo ($f = 7.410$ Hz) à esquerda e 4º modo ($f = 13.295$ Hz) à direita

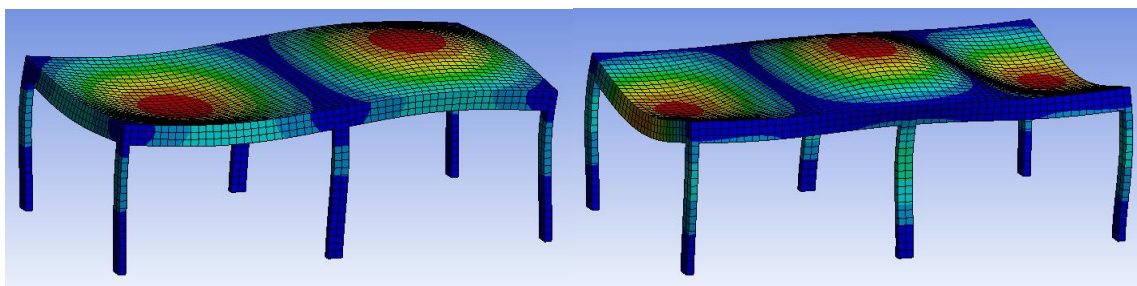


Figura 9. 5º modo ($f = 14.552$ Hz) à esquerda e 6º modo ($f = 24.749$ Hz) à direita

No primeiro modo de vibração, com frequência de 4.427 Hz, as lajes e vigas deslocam-se lateralmente, enquanto no segundo modo, com 5.010 Hz, deslocam-se frontalmente, como mostra a Fig. 7. Na Fig. 8, o terceiro modo, com 7.410 Hz, é caracterizado por uma torção gerada pelo giro das lajes e vigas, ao passo que no quarto modo, de 13.295 Hz, ambas as lajes se movimentam para cima e para baixo ao mesmo tempo. Pela Fig. 9 é possível observar o movimento alternado das lajes no quinto modo, de 14.552 Hz, enquanto o sexto, com 24.749 Hz, é definido por um movimento conjunto das lajes contrário ao da viga central.

Para verificar a segurança da estrutura quanto a efeitos de ressonância a NBR 6118/2014 permite comparar a frequência fundamental à frequência crítica, da Tabela 1, majorada em 20%. Como a estrutura foi construída inicialmente com o intuito de estocar materiais esportivos e para aulas de artes marciais, posteriormente, ou seja, ambiente comercial esportivo, adota-se a frequência crítica de um ambiente também considerado comercial e com movimentação esportiva. Dito isso, pela Tabela 1, a frequência crítica de 8.0 Hz para ginásio de esportes e academia de ginástica é adotada, na qual, com a majoração, corresponde à 9.6 Hz.

Como a frequência fundamental determinada foi de 4.427 Hz, e a norma brasileira recomenda que a crítica majorada seja menor que a mesma, a estrutura não é considerada satisfatória para estado-limite de vibrações excessivas em relação ao seu novo tipo de utilização.

Para análise de vibrações induzidas nas lajes apoiadas no conjunto de vigas e pilares considera-se uma análise transiente que busca avaliar a pior situação durante um treinamento ou aquecimento numa aula de artes marciais. Sendo assim, a simulação foi realizada reproduzindo pessoas com peso de 800N a cada metro quadrado pulando, num intervalo de tempo de aproximadamente 5 s, com uma frequência de excitação dinâmica de 3.4 Hz, valor este considerado como frequência média induzida por atividades humanas em diferentes atividades e estruturas segundo o CEB (1991).

Da Fig. 5, gráfico esquerdo, foram tirados os valores de $t_p = 0.15$ (tempo de contato dos pés com o chão) e $k_p = 2.8$ (força de pico). Este gráfico pode ser utilizado devido a similaridades entre atividades corrida com as de pulo, pois ambas estão relacionadas a movimentos rítmicos e de impacto, diferenciados entre si apenas pelas frequências induzidas. Com todos os dados citados realizam-se as análises dinâmicas numéricas no ANSYS. Diante do pressuposto, foram determinadas as acelerações, velocidades e deslocamentos verticais para estrutura na simulação.

As Fig. 10 e 11 exibem as acelerações no sentido vertical geradas pela excitação dinâmica e as regiões onde ocorreram as acelerações de maior valor, respectivamente.

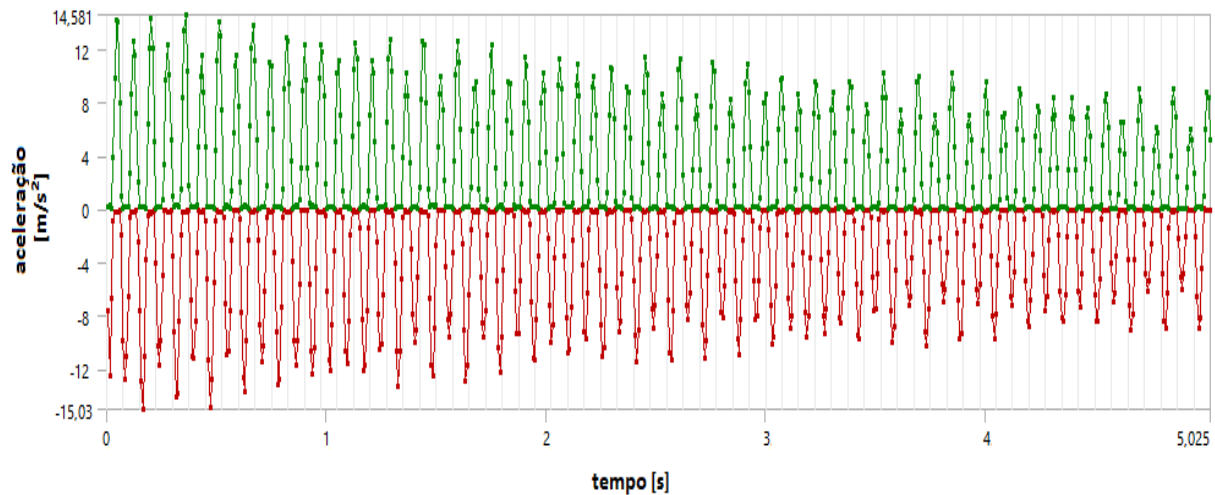


Figura 10. Acelerações verticais geradas pela excitação dinâmica.

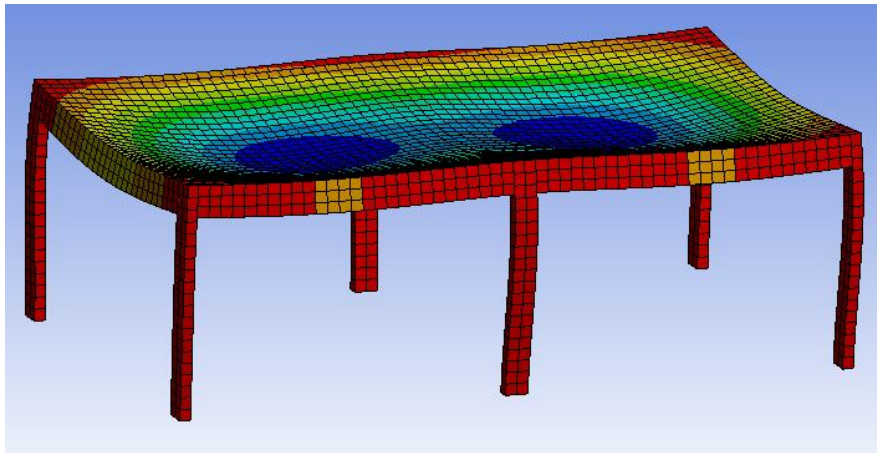


Figura 11. Acelerações máximas verticais geradas no ANSYS pela excitação dinâmica

As acelerações máximas da simulação ocorrem principalmente nos dois primeiros segundos de carregamento, sendo a aceleração máxima encontrada de 15.03 m/s^2 , como exibe a Fig. 10. Os maiores valores de acelerações ocorrem nos centros das lajes, em azul, voltadas levemente para a região da viga central, na Fig. 13.

A norma ISO 2631-2 apresenta valores recomendados de acelerações para estruturas relacionados ao conforto dos usuários, a depender da finalidade de uso, mostrados na Fig. 4. Comparando a aceleração máxima encontrada com os valores da ISO consultada percebe-se a alta intensidade do resultado, pois ultrapassa qualquer valor de pico proposto pela norma para conforto adequado.

As Fig. 12 e 13 exibem as velocidades no sentido vertical geradas na simulação dinâmica e as regiões de maiores valores de velocidades, respectivamente.

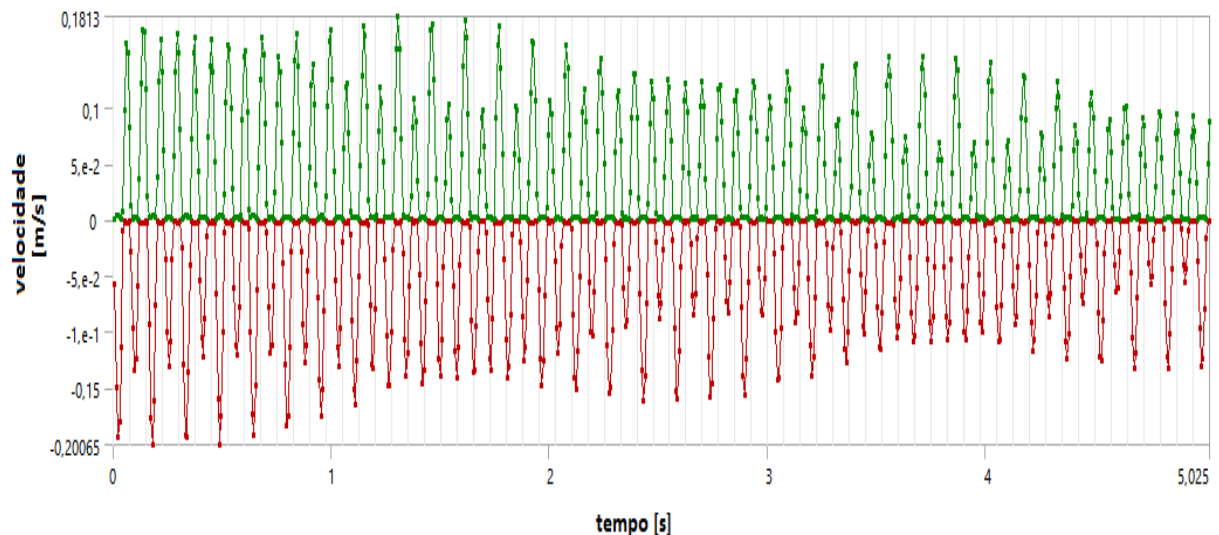


Figura 12. Velocidades verticais geradas pela excitação dinâmica

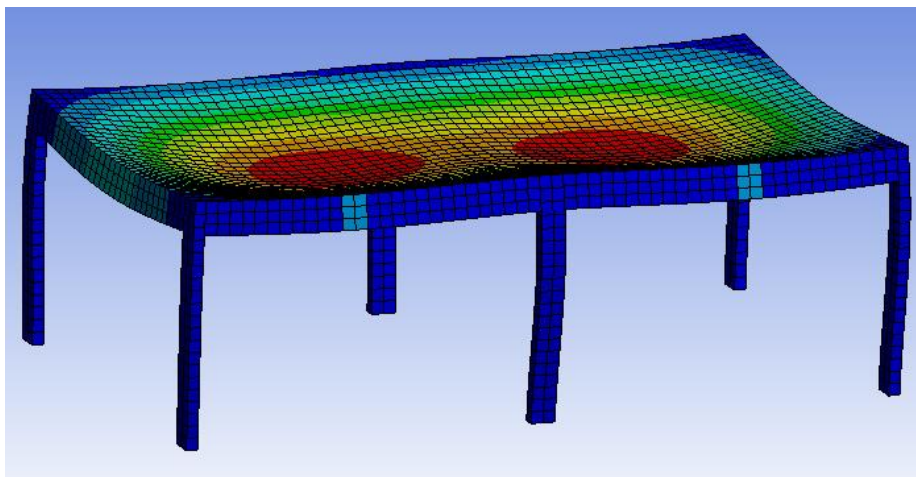


Figura 13. Velocidades máximas verticais geradas no ANSYS pela excitação dinâmica

As velocidades máximas durante a excitação dinâmica ocorrem principalmente nos dois primeiros segundos de carregamento, assim como nas acelerações, sendo a velocidade máxima definida em 0.20 m/s, como exibe a Fig. 12. Os maiores valores das velocidades encontram-se nos centros das lajes, na cor vermelha, também próximos à região da viga central, na Fig. 13.

A norma alemã DIN 4150-4 apresenta medidas recomendadas de velocidades, relacionadas ao conforto dos usuários, para estruturas, dependendo do tipo de utilização a que se destinam, apresentadas na Tabela 2. Observando a velocidade máxima encontrada com os valores recomendados pela norma constata-se o não atendimento da estrutura quanto ao conforto relacionado à velocidade em vibrações. A diretriz sugere, para um ambiente comercial em nível superior, valor de 0.04 m/s, bem menor que o encontrado durante a excitação.

As Fig. 14 e 15 exibem os deslocamentos no sentido vertical gerados durante os carregamentos dinâmicos e as regiões de maiores valores de deslocamento, respectivamente.

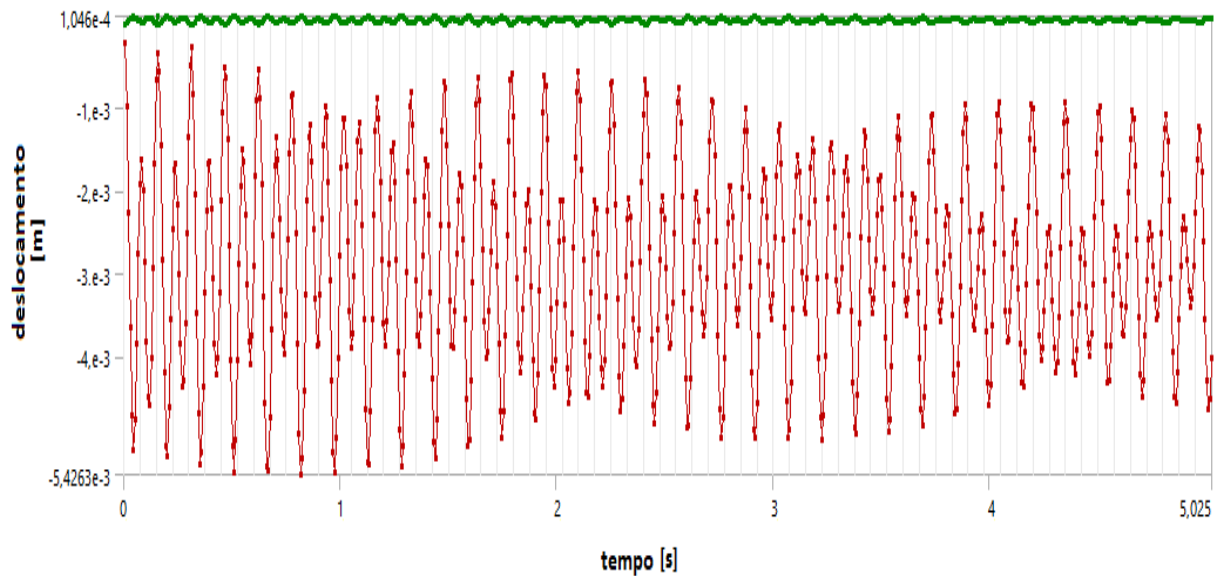


Figura 14. Deslocamentos verticais gerados pela excitação dinâmica

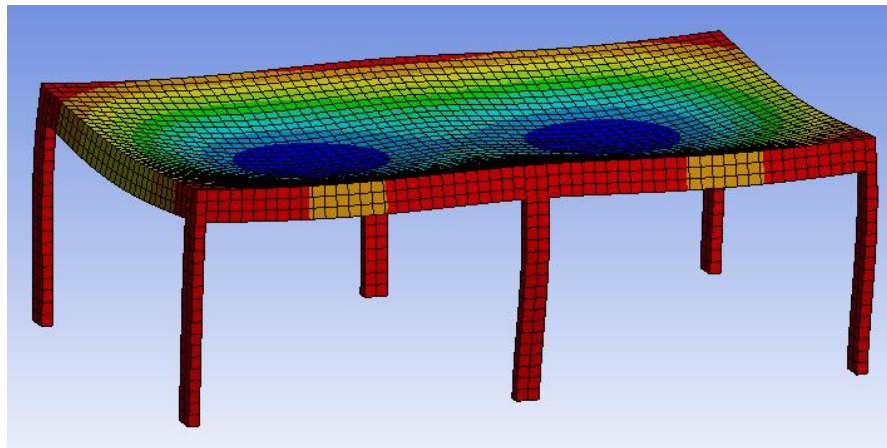


Figura 15. Deslocamentos verticais máximos gerados no ANSYS pela excitação dinâmica

Na Fig.14, os deslocamentos máximos induzidos durante a ação dinâmica de cargas ocorrem nos primeiros dois segundos de simulação, similar ao comportamento dos gráficos de acelerações e velocidades, que também sofrem perceptíveis reduções dos picos após 2 s. O deslocamento máximo encontrado é no valor de 0.00543 m, visto na mesma figura. Os maiores valores dos deslocamentos ocorrem nos centros das lajes, mostrados em azul na Fig. 15.

A NBR 6118/2014 apresenta o critério de $L/250$ que determina a flecha total, ou seja, o limite de deslocamento relacionado ao conforto sensorial visual dos usuários. O menor vão dentre as lajes é de 4.5 m, resultando num limite de 0.018 m para deslocamento vertical. O valor máximo de 0.00543 m é nitidamente menor que o limite estabelecido, caracterizando a estrutura como confortável sensorialmente.

5 ANÁLISES NUMÉRICAS NO TQS E EBERICK

Para verificação das flechas na laje da estrutura desenvolveu-se modelos numéricos nos softwares *TQS 19* e *Eberick V10*. As cargas consideradas foram peso próprio, acidentais de 2KN/m^2 e revestimento de 1KN/m^2 , em conformidade com a NBR 6120/1980. A Fig. 16 mostra a estrutura com lajes, vigas e pilares modelados.

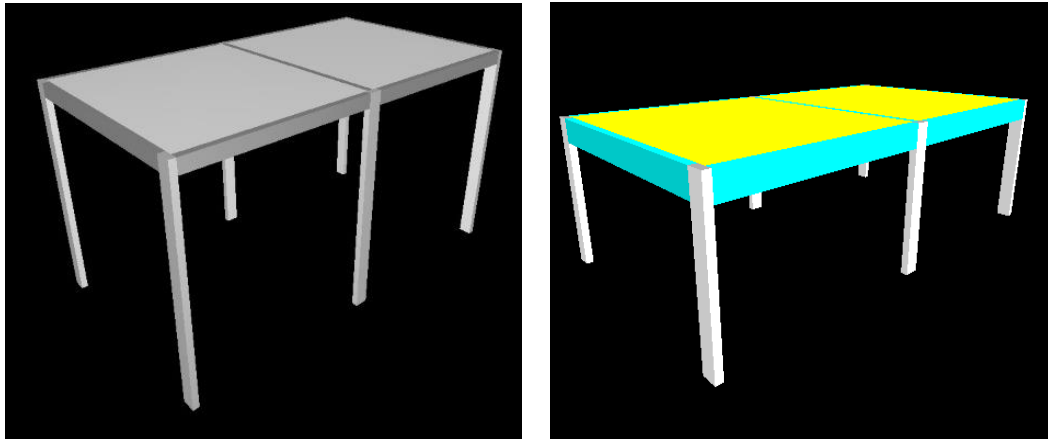


Figura 16. Modelos da estrutura gerados no *TQS* (esquerda) e no *Eberick* (direita)

A Fig. 17 apresenta a distribuição de flechas calculadas em ambos os softwares. Para a laje calculada no *TQS* obtém-se a flecha máxima de 0.0067 m , enquanto o *Eberick* retorna o valor de 0.0119 m . Em ambas análises, as maiores deformações, em vermelho, concentram-se nos centros das lajes, próximas à viga central.

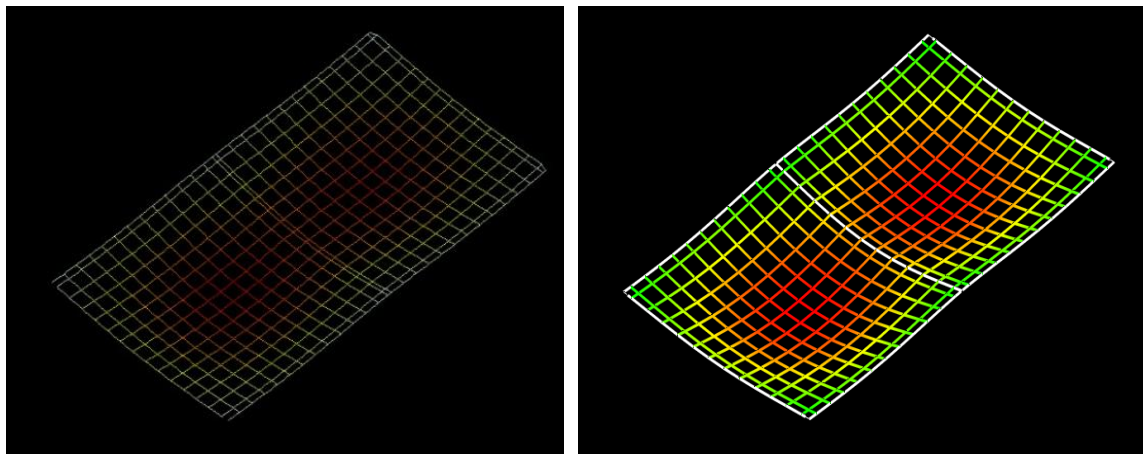


Figura 17. Distribuição das flechas calculadas no *TQS* (esquerda) e no *Eberick* (direita)

Referente ao critério de deslocamento limite da NBR 6118/2014, de L/250 para aceitabilidade sensorial, ambos resultados de flecha máxima gerados nos *softwares* encontram-se dentro do permitido pela norma, visto que o limite para as lajes é de 0.018 m.

6 CONCLUSÕES

A estrutura estudada apresenta-se, de acordo com os dados gerados pela simulação dinâmica, incompatível com as normas internacionais ISO 2631-2 e DIN 4150-4, referente aos valores da velocidade e aceleração máximas de pico. Entretanto, as medidas das flechas encontradas na análise estática estão dentro do limite citado pela NBR 6118, assim como o deslocamento máximo determinado na vibração induzida.

O baixo valor das deformações pode ser justificado pelo fato das lajes não possuírem nenhuma extremidade livre, conferindo-as mais rigidez. Além disso, os valores significativos de velocidades e acelerações durante as vibrações podem ser não apenas devido à concepção estrutural, mas também pelo acréscimo da mesma rigidez estabelecida pelos apoios.

A frequência fundamental da estrutura, de 4.247 Hz, além do segundo e terceiro modos encontram-se abaixo do valor recomendado calculado de 9.6 Hz, pela NBR 6118.

O estudo demonstra a importância da análise dinâmica no sentido de não se limitar apenas à estática, analisando a estrutura em questão envolvendo ambos os aspectos, um complementando ao outro.

Vale ressaltar que os resultados obtidos não caracterizam a situação estrutural quanto à ruptura, visto que os parâmetros utilizados estão relacionados ao conforto dos usuários na estrutura.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao suporte prestado pela Universidade de Brasília UNICEUB e à coordenação de engenharia civil.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014. NBR 6118:2014: *Projeto de Estruturas de concreto – Procedimento*, Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1980. NBR 6120: *Cargas para o cálculo de estruturas de edificações*, Rio de Janeiro.
- BALTAR, A. C. *Controle Híbrido para Atenuação de Vibrações em Edifícios*. Tese de Doutorado, PUC/RJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- BATTISTA, R. C. & VARELA, W. D. *Medidas Corretivas para Vibrações de Painéis Contínuos de Lajes de Edifícios*. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Brasil, 2002.

- CEB, 1991 . *Vibration problems in structures*. Practical Guidelines. Bulletin D'Information No 209. Comité Européen du Béton, Zurich.
- DEUTSCHE NORM (DIN 4150), 1986. *Structural vibration in buildings - effects on structures*.
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION, 2003. *Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration-Part 2: Human Exposure to Continuous and Shock-Induced Vibrations in Buildings (1 to 80 Hz)*. International Standard ISO 2631-2.
- MOURING, S. E. *Dynamic Response of Floor Systems to Building Occupant Activities*. Dissertação de Doutorado, Universidade Johns Hopkins, EUA, 1992.
- VARELA, W. D., 2004. *Modelo Teórico-Experimental para Análises de Vibrações Induzidas por Pessoas Caminhando sobre Lajes de Edifícios*. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro.
- WHEELER, J.E., 1982. Prediction and Control of Pedestrian Induced Vibration in Footbridges, ASCE, *Journal of the Structural Division*. Vol 108, No ST9, pp. 2045-2065.