

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES EM PISOS DE EDIFÍCIOS DE CONCRETO SUBMETIDOS A ATIVIDADES HUMANAS RÍTMICAS

Lucas Andrade Cordeiro¹, Gerson Moacyr Sisniegas Alva²

¹ Graduando na Faculdade de Engenharia Civil – FECIV
Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil – lucas.cordeiro1@ufu.br

² Professor Doutor na Faculdade de Engenharia Civil – FECIV
Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, Brasil – gmsalva@ufu.br

Resumo

Este trabalho de pesquisa busca estudar o comportamento dinâmico de pisos isolados de concreto armado, quando submetidos a excitações dinâmicas oriundas de atividades humanas rítmicas (dança, ginástica aeróbica e saltos à vontade). Assim sendo, este trabalho investiga o comportamento dinâmico de modelos estruturais de pisos de edifícios de concreto, sendo placas com lado igual a 6 metros e simplesmente apoiados nos 4 lados. São empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do programa ANSYS. Os resultados obtidos indicam que os limites recomendados em normas internacionais de projeto, no que tange aos valores das acelerações de pico (acelerações máximas) podem ser violados em algumas situações específicas. Tal fato demonstra que essas atividades rítmicas podem gerar níveis elevados de acelerações de pico violando critérios de projeto, no que tange ao conforto humano. Foi constatado que a atuação dessas ações humanas rítmicas pode gerar perturbações importantes em pisos de diferentes espessuras, podendo critérios da norma NBR 6118:2023 serem atendidos em relação a vibrações excessivas, mas podem vir a comprometer o conforto humano devido as altas acelerações de pico presentes no piso.

Palavras-chave: Concreto Armado, Dinâmica Estrutural, Modelagem Computacional, ANSYS

ABSTRACT

This paper seeks to study the dynamic behavior of isolated reinforced concrete floors, when subjected to dynamic excitations from rhythmic human activities (dancing, aerobic gymnastics and jumping at will). Therefore, this paper investigates the dynamic behavior of structural models of concrete building floors, being simply supported square slabs with sides equal to 6 meters. Usual discretization techniques are used, via the finite element method (FEM), using the ANSYS program. The results obtained indicate that the recommended limits by design international standards, regarding the values of peak accelerations (maximum accelerations) may be violated in some specific situations. This fact demonstrates that these rhythmic activities can generate high levels of peak accelerations, violating design criteria regarding human comfort. It was found that the performance of these rhythmic human actions can generate important disturbances in floors of different thicknesses of slabs. The criteria of standard NBR 6118:2023 may be checked in relation to excessive vibrations, however, they can compromise human comfort due to high peak accelerations present on the floor.

Keywords: Reinforced Concrete, Structural Dynamics, Computer Modelling, ANSYS.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a vibração excessiva em pisos de edifícios de concreto tornou-se uma questão cada vez mais prevalente, especialmente em estruturas submetidas a atividades humanas rítmicas. Essa problemática, que antes era considerada rara, agora afeta diversos tipos de construções, como academias, escritórios, salas de aula e até mesmo residências.

Dentre fatores que contribuem para o aumento das vibrações excessivas em pisos de edifícios estão tendências na arquitetura moderna, onde a busca por ambientes mais abertos e flexíveis na arquitetura moderna resultam em estruturas mais esbeltas e leves, o que as torna mais suscetíveis a vibrações. A própria evolução em pesquisas de materiais de construção, em que o uso de aços e concretos de alta resistência permite aprovações no Estado Limite Último às peças mais esbeltas, trazem com si peças com uma menor frequência fundamental, rigidez e capacidade de amortecimento. Tais fatores combinados com o aumento na concentração de pessoas em um mesmo ambiente, especialmente em atividades rítmicas como dança ou exercícios físicos, ampliam os efeitos das vibrações.

Deste modo, o estudo sobre as vibrações excessivas causadas por carregamentos dinâmicos traz uma preocupação significativa tanto em relação ao Estado Limite de Serviço quanto aos critérios de conforto humano, sendo este tema já bastante abrangido por pesquisadores como MURRAY et al, 2016, FAISCA, 2003 e em estudos brasileiros que constatam que a obediência à norma pode não ser um critério suficiente para o atendimento do conforto aos usuários nos modelos propostos por LOZOVEY et al. (2018 apud MOURA, 2023).

Certas situações específicas indicam que os limites de flechas estabelecidos pelas normas de projetos atendem o Estado Limite de Serviço e o Estado Limite de Vibrações nos critérios estáticos. Entretanto, podem não atender os critérios dinâmicos quanto aos valores das acelerações de pico (acelerações máximas) em regime permanente, os quais podem ser excedidos e influenciar negativamente no conforto humano.

1.1 OBJETIVO

O objetivo central deste trabalho é investigar o comportamento dinâmico de pisos de concreto sobre a ação de atividades rítmicas humanas a fim de verificar os critérios dinâmicos para o Estado Limite de Serviço de Vibrações Excessivas. Também é objetivo deste trabalho comparar o critério simplificado da ABNT NBR 6118:2023 de controle das frequências naturais para a verificação do Estado-limite de vibrações excessivas com o critério de obtenção da aceleração máxima obtida via análise dinâmica transiente para confronto com a aceleração limite

recomendada para pisos de edificações quando submetidos a atividades humanas rítmicas em manuais internacionais.

Para esse estudo, também serão comparados os resultados da análise dinâmica com a análise estática usual em relação ao Estado de Deformações Excessivas. A comparação efetiva será a espessura de laje que permite o atendimento dos critérios estáticos confrontada com a espessura que atende aos critérios dinâmicos.

1.2 METODOLOGIA

Este estudo analisa o comportamento dinâmico de modelos estruturais de pisos (lajes) de edifícios de concreto. As lajes são quadradas com lados medindo 6 metros e estando simplesmente apoiados nos quatro lados. Foram analisadas lajes maciças com espessuras de 8, 10, 12, 14, 15, 16 e 18 centímetros para esse estudo.

Foram utilizadas técnicas convencionais de discretização, por meio do método dos elementos finitos (MEF) utilizando o software ANSYS. Para realizar a análise dos modelos estruturais submetidos a ação de comportamento rítmico humano é feita a análise modal e análise transiente das lajes, sendo os resultados comparados com as diretrizes obtidas na ABNT NBR 6118:2023 e os critérios de aceleração máxima para o conforto humano em documentos internacionais, como o de MURRAY et al. (2003).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A realização desse artigo ressalta um tema bastante explorado atualmente, sendo alguns documentos em questão importantes para as conclusões deste. Materiais como a publicação Avaliação de conforto humano sobre pisos de edificações de concreto armado submetidos a ações humanas rítmicas (GASPAR, 2014) e a “Análise comparativa de diferentes metodologias para a verificação do estado-limite de serviço de vibrações excessivas em pavimentos de concreto” (Moura, 2023) são estudos que abrangem a comparação de metodologias para verificar o Estado Limite de Serviço de Vibrações em Pavimentos de Concreto e foram levadas em consideração para a escrita deste.

2.1 ABNT NBR 6118:2023

2.1.1 ESTADO DE DEFORMAÇÕES EXCESSIVAS

A ABNT NBR 6118:2023 é uma norma brasileira que estabelece os requisitos e procedimentos para o projeto de estruturas de concreto armado. Ela abrange desde o dimensionamento de elementos simples, como lajes, vigas e pilares, até o projeto de estruturas mais complexas, como edifícios e pontes. A norma define critérios de segurança, durabilidade e desempenho para as estruturas de concreto armado, garantindo que sejam projetadas e construídas de forma adequada e segura.

Em relação ao que tange na norma sobre deslocamentos limites que a estrutura deve proporcionar para um bom funcionamento em serviço e a Tabela 13.3 indica o valor de $L/250$ como deslocamento limite em razão da limitação visual.

2.1.2 ESTADO LIMITE DE VIBRAÇÕES EXCESSIVAS

Para garantir um comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, é necessário afastar ao máximo a frequência fundamental da estrutura (F_n) da frequência crítica (F_{crit}), que é dependente da finalidade da edificação (Vide Tabela 1). Sobre o Estado limite de vibrações excessivas, a ABNT NBR 6118:2023 propõe que a seguinte condição deve ser atendida:

$$F_n > 1,2 \times F_{crit}$$

As frequências naturais são obtidas via análise modal. Estas foram utilizadas para verificar a aprovação das lajes diante comparação com as diretrizes normativas previstas na Tabela 23.1 da NBR 6118:2023 frente ao Estado Limite de Vibrações Excessivas, visando atender a condição ($F_{crit} = 8,0$ Hz):

$$F_n > 1,2 \times 8 \text{ Hz}$$

$$\therefore F_n > 9,6 \text{ Hz}$$

Tabela 1 - Frequência Crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas

| 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 |

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118 (2023)

2.2 MANUAIS INTERNACIONAIS

No Manual internacional Design Guide 11 (Murray et al.,2016) e na norma internacional ISO 2631-2 (2003) são propostos métodos atualizados para avaliar sistemas de alta frequência e refinamentos no uso do método dos elementos finitos para análise de sistemas estruturais. Os parâmetros de comparação para os limites de tolerância e garantia do conforto humano sobre vibrações excessivas foram baseados no Capítulo 2 desse manual.

Murray et.al (2016) destaca que “A resposta humana ao movimento estrutural é um fenômeno muito complexo envolvendo a magnitude do movimento, o ambiente ao redor do sensor e do sensor humano” e considerando o critério da norma internacional ISO 2631-2 (2003). Ainda que este valor seja considerado como “Razoavelmente desconfortável” pela ISO 2631-2 (2003), Murray et. al (2016) destaca que esse é um valor aceitável para atividades rítmicas como ginástica, portanto, adota-se para esse estudo um valor limite para a aprovação em relação a aceleração em regime permanente da estrutura de $a = 0,5 \text{ m/s}^2$ (Vide Tabela 2) .

Tabela 2 - Valores de Aceitação de Aceleração para vibrações

| Valores de Aceitação de Aceleração para vibrações | |
|---|------------------------------|
| Aceleração | Descrição |
| menor que 0.315 m/s^2 | Não é desconfortável |
| 0.315 m/s^2 a 0.63 m/s^2 | Um pouco desconfortável |
| 0.5 m/s^2 a 1 m/s^2 | Razoavelmente desconfortável |
| 0.8 m/s^2 a 1.6 m/s^2 | Desconfortável |
| 1.25 m/s^2 a 2.5 m/s^2 | Muito Desconfortável |
| Maior que 2 m/s^2 | Extremamente desconfortável |

Fonte: Adaptado de ISO 2631-2 (2003)

3. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Neste estudo foram simuladas lajes maciças de concreto quadradas e simplesmente apoiadas, com 6 m de lado e com diferentes espessuras. Especificou-se para as lajes concreto C25, com Módulo de Elasticidade de 28GPa.

O elemento finito no software ANSYS escolhido para simular as lajes escolhido foi o Elemento de Casca SHELL 181, sendo a discretização das placas de comprimento $0,25 \times 0,25 \text{ (m)}$ adotadas no software ANSYS. O elemento finito SHELL181 é adequado para analisar estruturas de casca finas a moderadamente espessas, além disso é bem adequado para aplicações lineares, de grande rotação e/ou de grande deformação não linear.

O próprio software ANSYS leva em conta o peso próprio de cada laje para realizar as análises modais e transientes, devendo-se fornecer na entrada de dados apenas a carga adicional permanente mais a parcela frequente da carga variável. O peso específico do concreto armado foi adotado da Tabela 1 da NBR 6120:2019 como 25 kN/m³.

3.1 ANÁLISE ESTÁTICA

Os critérios para a obtenção dos valores de deslocamentos da análise estática das lajes estudadas foram obtidos através dos procedimentos presentes no item 17.3.2 da NBR 6118:2023 e dos valores de coeficientes de majoração presentes na Tabela 11.2 da mesma norma para a combinação quase-permanente ($\Psi_2 = 0,4$).

A Tabela 3 apresenta as condições de cada laje em relação a aprovação de critérios de dimensionamento Estado Limite Ultimo (ELU), onde foram utilizados os procedimentos de cálculo da ABNT NBR 6118:2023 respeitando os critérios de ductilidade e limites de armadura mínima e máximas, do Estado Limite de Serviço (ELS), visando fortalecer a ideia supracitada de que a evolução dos materiais permite uma estrutura com uma menor rigidez e maior esbeltez, entretanto, em detrimento de uma estrutura que está nos limites do aceitável em relação a deslocamentos e vibrações excessivas. Os valores de flecha total para a verificação do Estado Limite de Serviço com a combinação quase-permanente são comparados com o valor de flecha limite presente na Tabela 13.3 da NBR 6118:2023.

Tabela 3 - Verificação dos Deslocamentos Limites

| Laje | Critérios de Dimensionamento ELU | Flecha Total ELS Combinação Quase-Permanente (cm) | Flecha Limite (Aceitação Visual) |
|--------|----------------------------------|---|----------------------------------|
| h (cm) | | | L/250 = 2.4 (cm) |
| 8 | Não ok! | 9.19 | Não ok! |
| 10 | Ok! | 5.31 | Não ok! |
| 12 | Ok! | 1.84 | Ok! |
| 14 | Ok! | 1.26 | Ok! |
| 15 | Ok! | 1.06 | Ok! |
| 16 | Ok! | 0.91 | Ok! |
| 18 | Ok! | 0.68 | Ok! |

Fonte: Autor (2024)

3.2 ANÁLISE DINÂMICA MODAL

Para realizar a análise modal, “o primeiro ponto a ser avaliado diz respeito à variação das frequências naturais e dos modos de vibração em função da massa e da rigidez da estrutura” (MOURA et al, 2023). Portanto, é necessário adotar os parâmetros de cálculo utilizados no Estado Limite de Serviço para obter as forças estáticas atuantes sobre as lajes estudadas.

Foi admitido um carregamento permanente adicional $g = 1 \text{ kN/m}^2$, considerando regularização de piso e possíveis revestimentos previstos. Para o carregamento variável das lajes foi admitido $q = 5 \text{ kN/m}^2$, com base nos valores mínimos previstos na Tabela 10 da NBR 6120:2019 de carga variável em academias. Portanto, uma vez que a análise será a verificação do Estado Limite de Serviço de Vibrações Excessivas, o carregamento adicional sobre a laje (além do peso próprio) utilizado no software ANSYS é obtido pela Equação (1):

$$P = g + q \cdot \Psi_1 \quad (1)$$

$$P = 1 + 5 \cdot 0,6$$

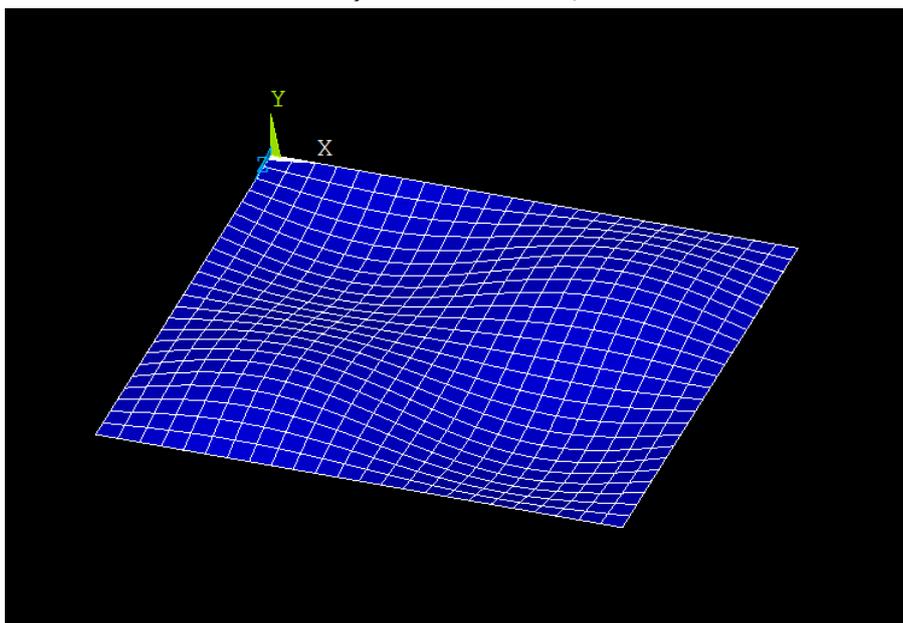
$$P = 4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Considerando a aceleração da gravidade igual a 10 m/s^2 , a massa adicional sobre a laje é de 400 kg/m^2 . O fator de ponderação $\Psi_1 = 0,6$ é aplicável para áreas com ocupação comercial ou de escritórios na Tabela 11.2 da NBR 6118:2023 para combinações frequentes.

A análise modal no software ANSYS permitiu determinar as frequências naturais e os modos de vibração das lajes de espessuras de 8, 10, 12, 14, 15, 16 e 18 centímetros.

Como exemplo dos resultados apresentados pelo software, tem-se a Figura 1 com a representação do quarto modo de vibração (F_{04}) e a Tabela 4 com todos os modos de vibração da laje $h = 14 \text{ cm}$.

Figura 1 - Laje de 14 cm de espessura em seu quarto modo de vibração com $F_{04} = 32,725 \text{ Hz}$



Fonte: Autor (2024)

Tabela 4 - Modos de Vibração e Frequências Naturais da Laje de $h = 14\text{cm}$

| Laje $h = 14\text{ cm}$ | |
|-------------------------|-----------------|
| Modos de Vibração | Frequência (Hz) |
| F ₀₁ | 8.1795 |
| F ₀₂ | 20.546 |
| F ₀₃ | 20.546 |
| F ₀₄ | 32.725 |
| F ₀₅ | 41.423 |
| F ₀₆ | 41.424 |
| F ₀₇ | 53.375 |
| F ₀₈ | 53.375 |

Fonte: Autor (2024)

Realizando, da mesma forma, as análises das lajes remanescentes, é possível obter a Tabela 5 referente à frequência fundamental (primeiro modo de vibração). Define-se então, se os elementos estudados são considerados de baixa ou alta frequência pelo critério de Murray et.al, 2016, onde elementos que possuem o primeiro modo de vibração $F_n < 9\text{ hz}$ são considerados de baixa frequência e elementos com F_n superiores a 9 Hz são considerados de alta frequência. Também é possível realizar a verificação comparativa com a NBR 6118:2023 em relação ao seu item 23.1, onde $F_n > 9,6\text{ hz}$ para esse estudo.

Tabela 5 - Frequência Fundamental das Lajes, classificação e verificação segundo a NBR 6118

| Laje | F _n | Tipo de Elemento | F _n > 1.2 F _{crit} |
|-----------|----------------|------------------|--|
| Espessura | Hz | | |
| 8 | 3.970 | Baixa Frequência | Não ok! |
| 10 | 5.323 | Baixa Frequência | Não ok! |
| 12 | 6.751 | Baixa Frequência | Não ok! |
| 14 | 8.180 | Baixa Frequência | Não ok! |
| 15 | 8.915 | Baixa Frequência | Não ok! |
| 16 | 9.656 | Alta Frequência | Ok! |
| 18 | 11.154 | Alta Frequência | Ok! |

Fonte: Autor (2024)

A partir da Tabela 5 é possível verificar que os tipos de elementos determinados através do critério de Murray et.al, 2013 condizem com a NBR 6118:2023 e demonstra um resultado esperado, visto que sistemas de alta frequência estão menos aptos a sofrerem com ressonantes

provindas de atividades dinâmicas rítmicas humanas, sendo estes sistemas de maior frequência aprovados em ambos os critérios de avaliação.

3.3 ANÁLISE DINÂMICA TRANSIENTE

A análise transiente consiste em realizar a aplicação de forças variáveis no tempo e cálculo da resposta dinâmica da estrutura, também no domínio do tempo, em termos de esforços e/ou tensões, bem como de deslocamentos e/ou velocidades e/ou acelerações.

Foram escolhidas neste estudo cargas dinâmicas que simulam ações provocadas por atividades aeróbicas, buscando simular a mesma situação prevista na Tabela 23.1 da NBR 6118:2023 para o caso de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas em Ginásio de esportes e academias de ginástica.

O modelo proposto por MURRAY et al., 2003 para simular a excitação dinâmica produzida por atividades humanas é representado pela Equação (2). A representação do carregamento dinâmico é realizada através de uma modelagem baseada em uma série de Fourier, que inclui três termos associados aos componentes de três harmônicos.

$$F(t) = P + P \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \cos(2\pi i f_p t + \phi_i) \right] \quad (2)$$

Onde:

F(t): representação matemática para o carregamento no tempo (N);

P: peso da pessoa, considerado como $P = 800\text{N}$ (BACHMANN et al., 1995);

n: número de harmônicos considerados para representar a atividade humana;

ϕ_i : ângulo de fase entre o i-ésimo e o primeiro harmônico.

α_i : coeficiente dinâmico do i-ésimo harmônico da frequência da força;

i: número do i-ésimo harmônico da frequência da força;

f_p : frequência do passo da atividade humana (Hz).

Os parâmetros de inserção nas séries de Fourier são baseados na Tabela 1-2 em Steel Design Guide 11 (Murray et al., 2016), sendo tais parâmetros para as excitações dinâmicas de atividades aeróbicas podendo ser representados na Tabela 6.

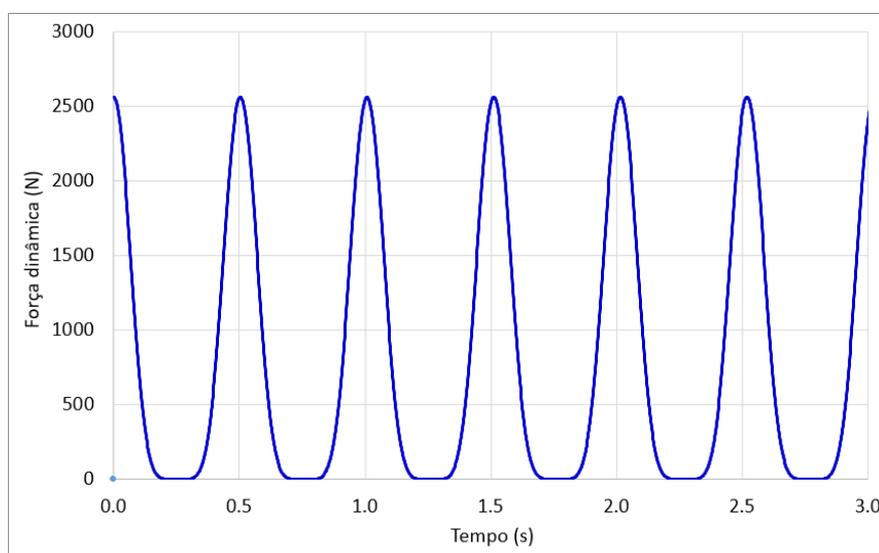
Tabela 6 - Parâmetros adotados na Série de Fourier

| Harmonico | Frequência da Atividade | Coefficiente Dinâmico | Ângulo de Fase ϕ |
|-----------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| i | Fp (Hz) | α_i | i |
| 1 | 2.0 - 2.75 | 1.5 | 0 |
| 2 | 4.0 - 5.50 | 0.6 | 0 |
| 3 | 6.0 - 8.25 | 0.1 | 0 |

Fonte: Adaptado de AISC Guide Design 11 (Murray et al., 2016)

Os carregamentos dinâmicos que ocorrem no tempo determinado obtidos pela Equação 1 são em geral representados pela Figura 2.

Figura 2 - Força Dinâmica pelo Tempo



Fonte: Autor (2024)

Para a análise transiente é necessário levar em consideração os efeitos dos coeficientes de α e β do amortecimento de Rayleigh, obtidos pela Equação 3 e 4 (Soriano, 2014). Ambos são obtidos através das frequências naturais de cada laje. Para esse estudo foram escolhidos as frequências naturais do primeiro (i) e do quinto modo (j), e com uma taxa de amortecimento $\xi = 0.03$.

$$\alpha = 2\xi \frac{\omega_i \cdot \omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (3)$$

$$\beta = 2\xi \frac{1}{\omega_i + \omega_j} \quad (4)$$

Nesse estudo adotou-se o valor de 0,25 pessoas por metro quadrado (recomendação usual na literatura especializada), totalizando assim 9 pessoas na laje. Adotou-se $\Delta t = 0.002$ segundos como intervalo de tempo adotado na análise, durante um tempo total de 10 segundos.

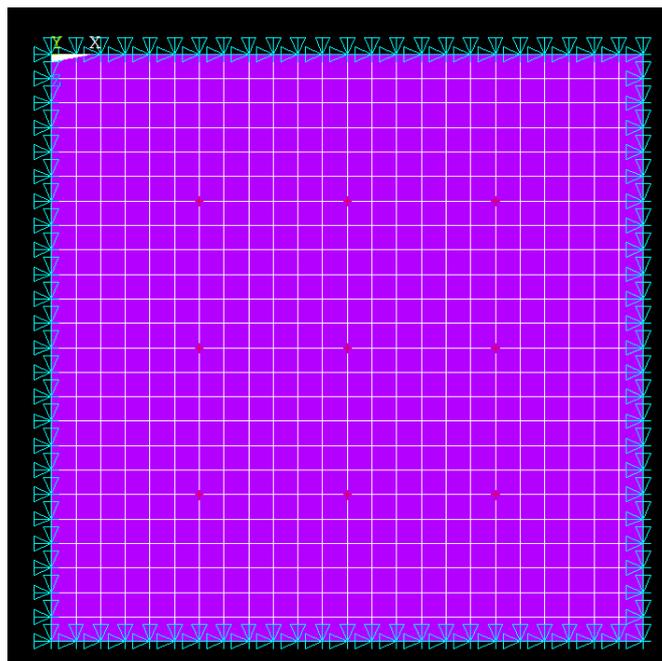
Vale citar que, para a análise transiente, os parâmetros necessários a serem adotados dependem em parte dos resultados obtidos na análise modal. Se a frequência fundamental coincidir com uma frequência harmônica de força, então a resposta máxima será ressonante (MURRAY et al.,2016).

Considerando que o intervalo de atuação em que as frequências causadas pelas excitações rítmicas humanas em atividades aeróbicas podem variar entre o primeiro e terceiro harmônico o valor de F_p (Hz) 2.00 à 8.25. As cargas dinâmicas para as lajes com frequência fundamental abaixo de 8.25 Hz foram arranjadas de forma a causar uma resposta máxima ressonante. Assim, busca-se uma frequência harmônica de força igual à frequência fundamental da laje, de forma a contribuir para quase toda a resposta ressonante e conseqüentemente a pior situação de aceleração na laje.

Para as lajes com frequência fundamental maiores que as forças harmônicas causadas pela excitação por atividade rítmica humana, foi limitada a frequência máxima de 8.25 Hz alcançada no terceiro harmônico.

A Figura 3 ilustra a posição escolhida para as 9 pessoas na laje. Essa configuração consiste na situação mais crítica para deslocamentos e acelerações verticais.

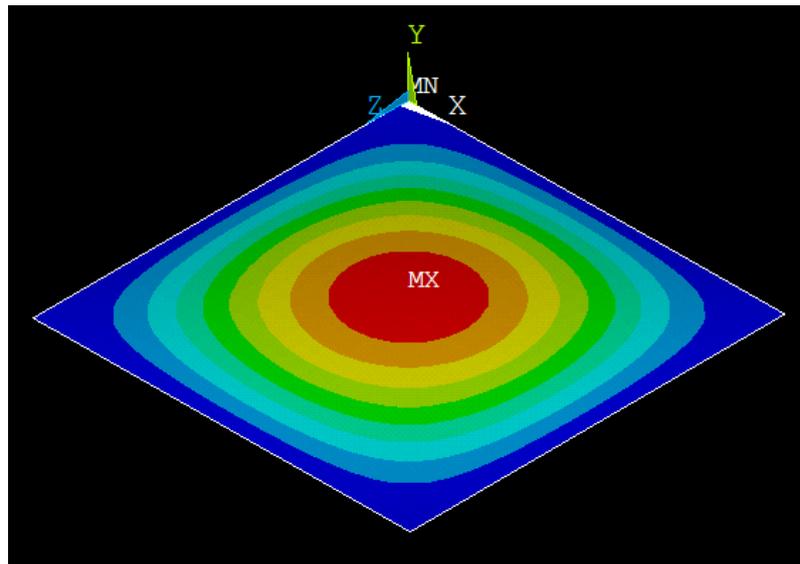
Figura 3 - Modelagem no software ANSYS da Análise Transiente Laje $h = 14\text{cm}$



Fonte: Autor (2024)

Figura 4 – Pontos críticos de deslocamentos no software ANSYS da Análise Transiente

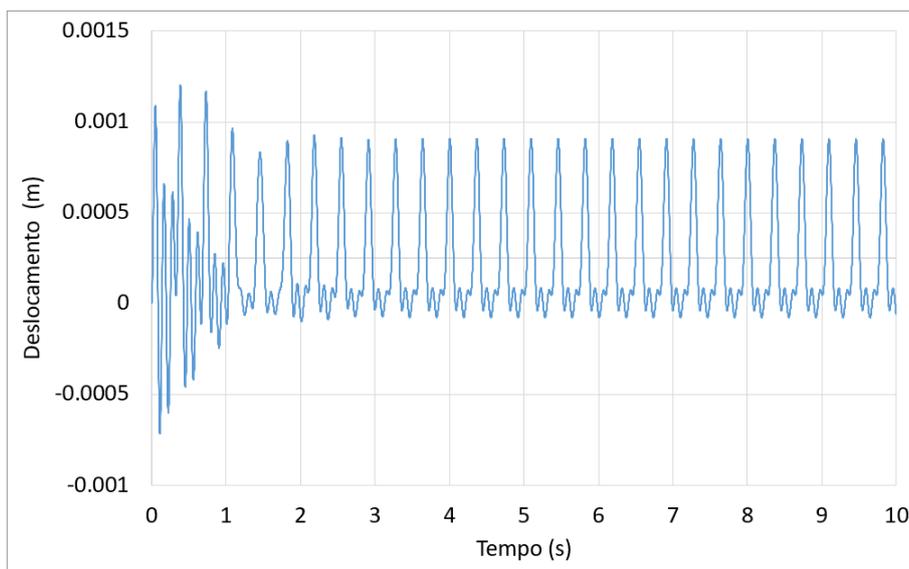
Laje h = 14cm



Fonte: Autor (2024)

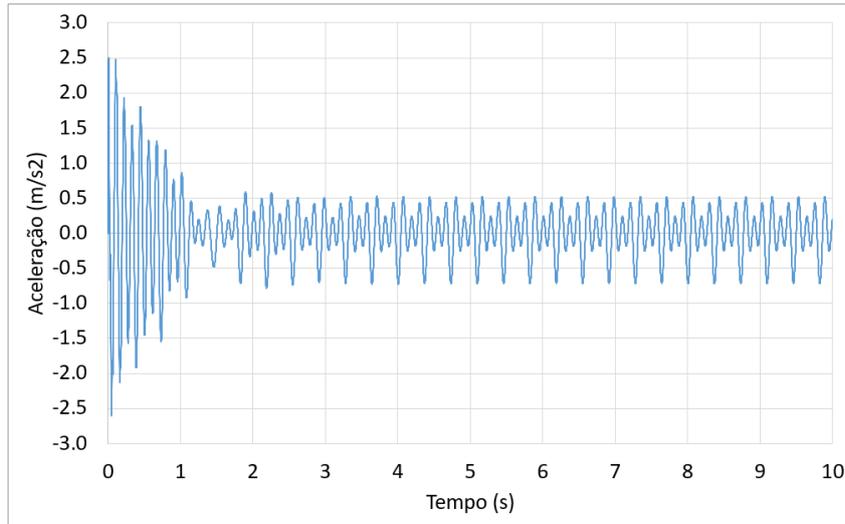
A análise transiente no software ANSYS permitiu a obtenção dos deslocamentos verticais das lajes, com os quais foram calculadas as acelerações via Método das Diferenças Finitas Centrais. As Figuras 5 e 6 apresentam, respectivamente, os deslocamentos e as acelerações no ponto central da laje.

Figura 5 - Deslocamentos no centro da laje (h = 15cm)



Fonte: Autor (2024)

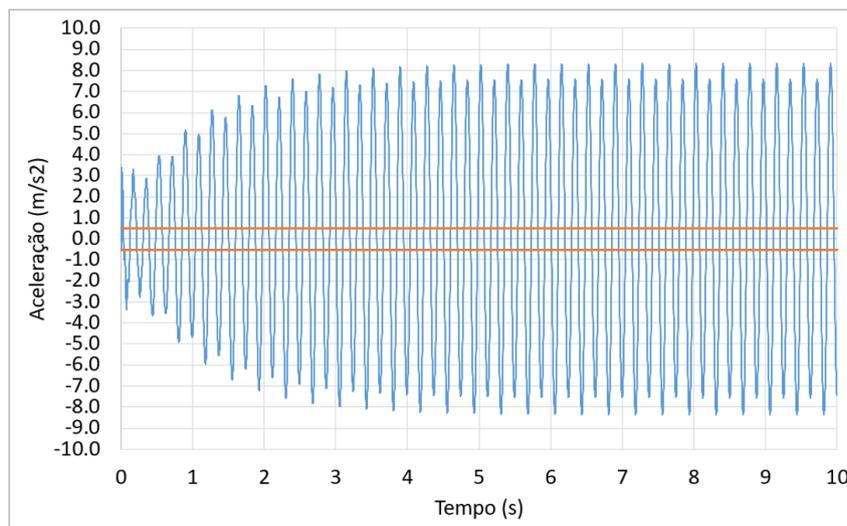
Figura 6 - Aceleração no centro da laje (h = 15cm)



Fonte: Autor (2024)

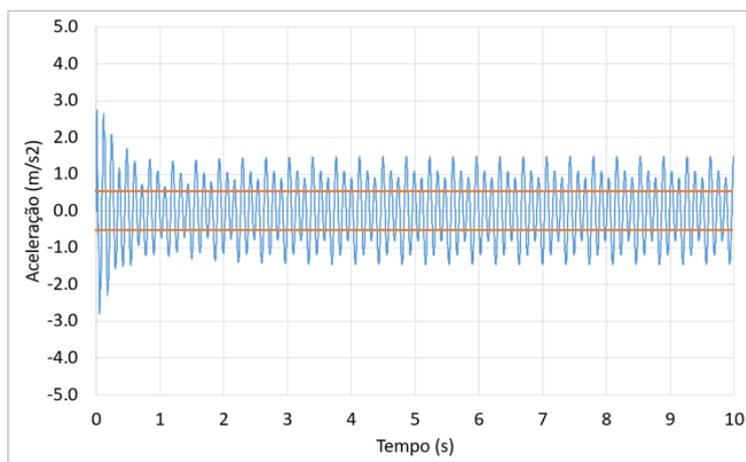
Observando as Figuras 5 e 6, é notável que os deslocamentos e acelerações de pico no regime transiente são elevados e descontínuos, e duram menos que 2 segundos. Portanto, somente as acelerações máximas (pico) em regime permanente serão consideradas para a comparação com os parâmetros de conforto (limite de $0,50 \text{ m/s}^2$). As Figuras 7, 8 e 9 contém o histórico de acelerações no centro das lajes de espessura de 10cm, 14 cm e 18 cm, em comparação com o valor limite de $0,5 \text{ m/s}^2$ para o regime permanente.

Figura 7 - Aceleração no centro da laje (h = 10cm)



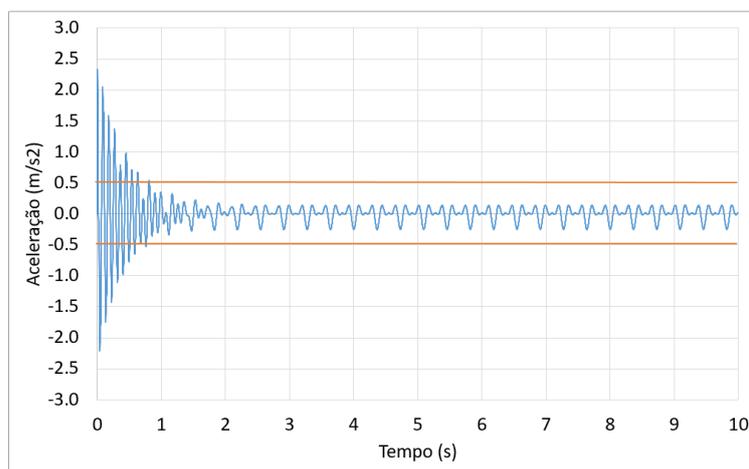
Fonte: Autor (2024)

Figura 8 - Aceleração no centro da laje (h = 14cm)



Fonte: Autor (2024)

Figura 9 - Aceleração no centro da laje (h = 18 cm)



Fonte: Autor (2024)

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos de aceleração máxima para cada laje e sua aprovação ou não em comparação aos critérios adotados.

Tabela 7 - Análise do critério de vibrações excessivas (VE): critério de controle de frequências naturais e critério de obtenção da aceleração máxima

| Laje (cm) | Verificação ELS - VE | | |
|-----------|----------------------|--------------------------|------------------------------|
| | $F_n > 1.2 F_{crit}$ | $a = 0.50 \text{ m/s}^2$ | ISO 2631-2 |
| 8 | Não ok! | 9.075 | Extremamente desconfortável |
| 10 | Não ok! | 8.357 | Extremamente desconfortável |
| 12 | Não ok! | 4.915 | Extremamente desconfortável |
| 14 | Não ok! | 1.473 | Muito Desconfortável |
| 15 | Não ok! | 0.722 | Razoavelmente desconfortável |
| 16 | Ok! | 0.443 | Um pouco desconfortável |
| 18 | Ok! | 0.249 | Não é desconfortável |

Fonte: Autor (2024)

Após obter os resultados da análise modal e os gráficos de aceleração no domínio do tempo é possível verificar a adequabilidade desses sistemas adotados diante a situações ocorridas no ELS – VE. Com os dados fornecidos pela Tabela 5 e Tabela 7 é possível verificar que os critérios aqui adotados para a avaliação das vibrações excessivas são de extrema importância quando o conforto humano é levado em consideração.

É notório que, a partir da Tabela 3, no dimensionamento em ELU e nas verificações de deslocamentos sobre carregamentos estáticos em ELS, as lajes de menor espessura, consideradas de baixa frequência, já são suficientes para cumprir com as verificações previstas em norma, dado que a laje de $h = 12$ cm é o suficiente para satisfazer ambas situações (ELU e ELS). Entretanto, tal laje no que tange aos critérios de conforto humano é reprovada no quesito de conforto pela ISO2631-2, sendo considerada extremamente desconfortável, e chega a acelerações de pico até 9 vezes maiores que a recomendada por Murray et al. (2003).

Para os critérios de conforto humano serem atendidos nos parâmetros de comparação com a norma brasileira, somente a partir da laje $h = 16$ cm de espessura os critérios da NBR 6118:2023 foram cumpridos.

Pela Tabela 7 é possível verificar que, para o estudo em questão, o critério presente na norma brasileira para verificações de vibrações excessivas, embora simplificado, foi suficiente em comparação ao critério de aceleração limite de $a = 0,50 \text{ m/s}^2$. Contudo, ainda na laje de $h = 16$ cm, o critério de conforto da ISO 2631-2 considera as situações causadas pelas vibrações excessivas como “Um pouco desconfortável”.

Vale ressaltar que o critério presente no item 23.1 da norma não leva em consideração a relação pessoas por metro quadrado e suas possíveis ações de caráter dinâmico sobre a laje para firmar a sua aprovação em relação ao ELS – VE. Portanto, o critério $F_n > 1.2 \cdot F_{cri}$ testá relacionado somente a questões como rigidez, cargas estáticas atuando sobre a laje, vãos e espessura da laje.

Desta maneira, um possível aumento na relação pessoas por metro quadrado realizando atividades rítmicas, acontecimento que ocorre com frequência em ambientes como academias e ginásios de esportes, podem aumentar de forma considerável os deslocamentos no domínio do tempo e, conseqüentemente a aceleração dessas lajes, existindo a possibilidade de reprovação das lajes nos critérios de aprovação do ELS –VE adjacentes presentes neste artigo.

5. CONCLUSÕES

Com base em todos os pontos apresentados neste artigo, todos os objetivos foram atingidos no que tange a investigar o comportamento dinâmico de pisos de concreto sobre a ação de atividades rítmicas humanas, comparando diferentes critérios e limites de vibração recomendados pela NBR 6118 e em manuais internacionais.

Além da comparação entre diferentes critérios para a avaliação do ELS – VE, foi possível verificar a importância do estudo desse Estado Limite nas estruturas de concreto armado diante os avanços da engenharia. É notável que o cumprimento dessas verificações podem ser onerosas, entretanto são de extrema importância para garantir o conforto humano e segurança das estruturas.

No estudo em questão, o critério recomendado para a verificação de vibrações excessivas presentes na NBR 6118:2023 - apesar de ser um método simplificado em comparação aos referenciados – forneceu bons resultados no que se refere ao conforto humano em comparação ao cálculo mais refinado proposto pelos manuais internacionais no âmbito das vibrações em sistemas estruturais causadas pelas atividades humanas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Ações para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118:2023: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

BACHMANN, H. & AMMANN, W. **Vibrations in structures induced by man and machines, International Association for Bridges and Structural Engineering**. [S. l.: s. n.], 1987.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2631-1 - Mechanical vibration and shock- Evaluation of human exposure to whole-body vibration**. Switzerland: [s. n.], 2003.

MOURA, Júlia Maria de França. **Análise comparativa de diferentes metodologias para a verificação do estado-limite de serviço de vibrações excessivas em pavimentos de concreto**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2023.

MURRAY, Thomas M.; ALLEN, David E. **Floor Vibrations Due to Human Activity, Steel Design Guide Series**. [S. l.]: American Institute of Steel Construction (AISC), 2003.

MURRAY, Thomas M.; ALLEN, David E. **Steel Design Guide 11: Vibrations of steel-framed structural systems due to human activity**. [S. l.]: American Institute of Steel Construction (AISC), 2016.

SORIANO, Humberto Lima. **Introdução à dinâmica das estruturas**. [S. l.]: Elsevier Editora, 2014.