

ESTUDO PARAMÉTRICO POR ELEMENTOS FINITOS DE LAJES NERVURADAS DEVIDO ÀS AÇÕES HUMANAS

Yuri Cláudio Vieira da Costa^a, Tereza Denyse de Araujo^b

^a*Aluno de Mestrado, Programa de Pós-graduação em engenharia civil: estruturas e construção civil, Universidade Federal do Ceará, UFC, Fortaleza, CE, Brasil, yuricvc@yahoo.br*

^b*DEECC, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 710, Pici, 60455-760, Fortaleza, CE, Brasil, denyse@ufc.br*

Palavras chave: Frequências naturais, Ações humanas, Conforto humano.

Resumo. No Brasil, a utilização de laje nervurada de concreto armado em edifícios de múltiplos pavimentos é hoje bem difundida, sendo essas edificações destinadas as mais diversas finalidades, como academias, supermercados, estacionamentos, escritórios e unidades residenciais. Atividades simples como andar, pular e saltar podem gerar vibrações nestas lajes e podem causar incomodo nas pessoas, dúvidas a respeito da segurança da estrutura, deslocamento de pisos e até, dependendo da intensidade das vibrações, risco de colapso. Portanto, o objetivo deste trabalho é apresentar o comportamento estático e dinâmico de lajes nervuradas de concreto armado quando submetidas a ações humanas rítmicas. Para tal, são realizados estudos paramétricos sobre a influência da viga de bordo e da relação entre vãos na resposta estática e dinâmica destas lajes. As análises são realizadas utilizando o programa computacional ABAQUS, cujas lajes são modeladas por elementos finitos sólidos tridimensionais, a fim de obter naturalmente a excentricidade entre os elementos estruturais (mesa, nervura e viga de bordo). Os resultados obtidos destas análises são comparados entre si. Além disso, as respostas dinâmicas são comparadas a padrões normativos fornecidos pela NBR 6118 (ABNT, 2003) no que se refere às frequências naturais e com normas internacionais no tocante ao conforto humano.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil gera uma grande quantidade de empregos no Brasil, daí a fundamental importância desse setor para a economia. Só na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), cerca de 23 mil postos de trabalho no setor da construção civil foram gerados em 2010 (PED, 2010). O problema é que para as empresas construtoras continuarem atuando no mercado, gerando empregos, elas precisam estar em constante processo de modernização, com novas técnicas construtivas que minimizem tempo e custos, sem deixar de lado a segurança. Nesse processo de modernização, o que normalmente as construtoras visam é o menor gasto com materiais, devido ao seu custo elevado.

Dependendo do tipo de laje adotada em uma edificação de vários pavimentos o consumo de concreto nessas lajes pode chegar a quase dois terços do volume total de concreto utilizado na estrutura (DIAS, 2003). Assim, Reduzindo a matéria prima utilizada, entre outras medidas, é possível minimizar os gastos da construção, podendo desta forma oferecer produtos ao mercado com valores mais competitivos.

Deste modo, com a necessidade de racionalização na construção civil, reduzindo tempo e custos, a laje nervurada torna-se uma opção cada vez mais utilizada (Bocchi Jr, 1995). Ela pode ser utilizada para vencer grandes vãos (Silva, 2005), permitir o uso de divisórias flexíveis (Coelho *et al*, 2010), reduzir o peso da estrutura (Araújo, 2005; Silva, 2008) ou porque o uso da laje maciça pode se tornar uma opção antieconômica, pois para vencer grandes vãos, ela necessita de espessuras elevadas sendo que parte de sua resistência seria utilizada para combater as solicitações de seu peso próprio (Stramandinoli, 2003).

Devido à larga utilização deste tipo de laje no mercado da construção civil, este trabalho se dedica a estudar o comportamento estático e dinâmico de lajes nervuradas de concreto armado. São realizados estudos paramétricos para analisar a influencia da relação entre vãos e da viga de bordo na resposta do sistema estrutural. As frequências naturais dos modelos analisados também são confrontadas com os valores fornecidos pela norma brasileira NBR 6118 (ABNT, 2003).

Neste trabalho, uma laje nervurada foi modelada com base em um projeto real de uma laje de academia localizada em um edifício de múltiplos pavimentos. Para as análises foram gerados três modelos de lajes diferentes, variando a relação entre vãos de 1 a 2. Em cada modelo, a viga de bordo foi modelada com três alturas diferentes e são aplicados três carregamentos diferentes, sendo dois estáticos e um dinâmico. As respostas das análises (frequências e deslocamentos) são comparadas entre si. A carga dinâmica refere-se a uma pessoa pulando no centro da laje, sendo que os carregamentos estáticos são, respectivamente, o especificado pela NBR 6120 (ABNT, 1980) e a amplitude do carregamento dinâmico aplicado estaticamente no centro da laje.

2 DESCRIÇÃO DO MODELO ESTRUTURAL

A laje nervurada analisada neste trabalho é em concreto armado cujas dimensões originais são as do Modelo A, conforme mostra a Tabela 1. A viga de bordo utilizada no projeto corresponde a Viga 1, ou seja, dimensões 14 cm x 50 cm. Nos outros dois modelos (Modelo B e C) variam-se um dos vãos da laje e a altura da viga de bordo (Viga 2 – 70 cm e Viga 3 – 100 cm).

As vigas de bordo foram consideradas como biapoiadas com restrição de translação em x , y e z . Os modelos tentam preservar a relações entre vãos (L_x/L_y) variando de 1 a 2 (ver Fig. 1).

Tabela 1: Características geométricas das lajes (em metros)

	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Laje	4,28 x 4,28	6,72 x 4,28	8,55 x 4,28
Viga 1	0,14 x 0,50	0,14 x 0,50	0,14 x 0,50
Viga 2	0,14 x 0,75	0,14 x 0,75	0,14 x 0,75
Viga 3	0,14 x 1,00	0,14 x 1,00	0,14 x 1,00

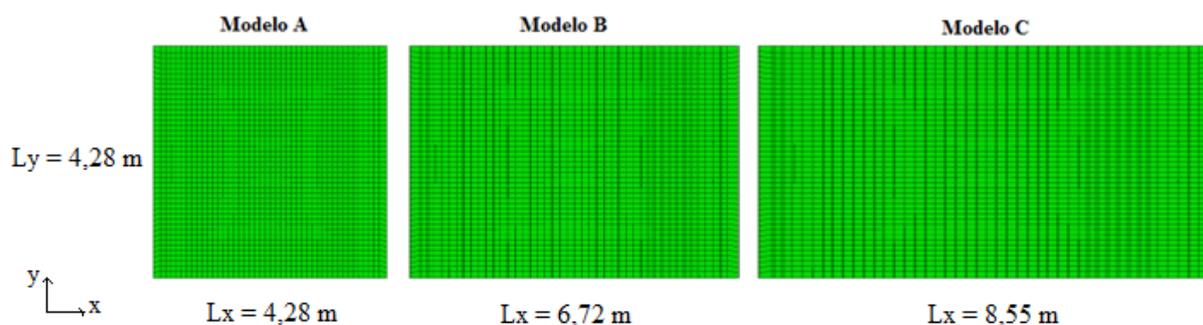


Figura 1: Modelos de lajes nervuradas.

Neste trabalho, as lajes nervuradas são bidirecionais com nervuras inclinadas (ver Fig. 2). As dimensões das nervuras, altura da mesa e vão entre nervuras foram adotadas conforme o projeto real. Como já foi dito, esta laje é destinada a uma academia de esportes.

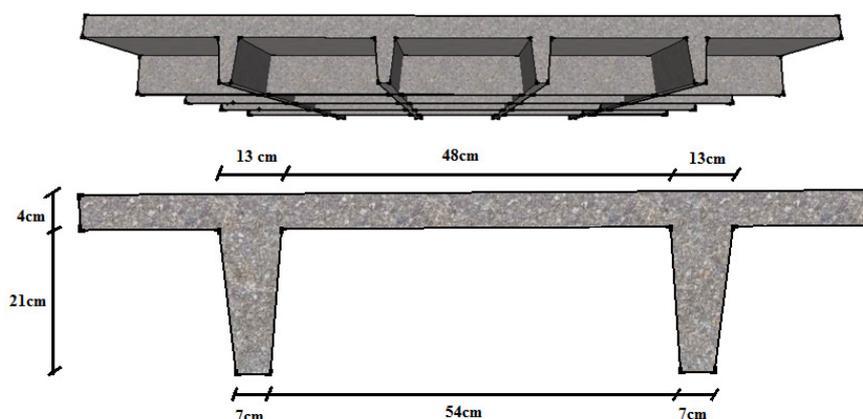


Figura 2: Características geométricas da laje nervurada

A resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}), aos 28 dias, é de 35 MPa; o módulo de elasticidade longitudinal secante (E_{sc}) igual a $2,82 \times 10^7$ kN/m²; o coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,2, conforme NBR 6118 (ABNT, 2003); e a densidade específica do concreto é considerada como 25 kN/m³ de acordo com a NBR 6120 (ABNT, 1980). Foi considerado um coeficiente de amortecimento de 2%.

O módulo de elasticidade longitudinal secante (E_{sc}) é calculado, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2003), pela seguinte expressão:

$$E_{cs} = 4760\sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

O revestimento da laje é considerado como carga permanente devido ao peso próprio, cujo valor adotado, em conformidade com a NBR 6120 (ABNT, 1980), é 1 kN/m².

Além da carga permanente (peso próprio do concreto armado e do revestimento), aplica-se

sobre a laje uma carga acidental que varia segundo a análise (estática e dinâmica). Para análise estática, duas cargas são consideradas: a primeira consiste em uma carga distribuída sobre a laje (ver Fig. 3), cujo valor, sugerido pela NBR 6120 (ABNT, 1980), é de 5 kN/m²; e a segunda consiste em uma carga concentrada aplicada no centro da laje, cujo valor é a amplitude da carga dinâmica.

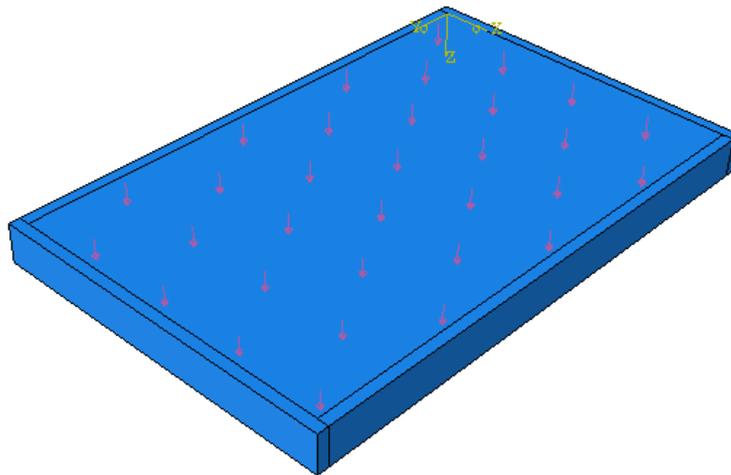


Figura 3: Carga distribuída sobre a laje

A carga acidental dinâmica representa uma pessoa pulando no centro da laje. Essa carga é modelada segundo a função Hanning que, segundo Faisca (2003), foi a que melhor representou o carregamento experimental, tanto para os valores no domínio do tempo quanto no da frequência. A força dinâmica é então dada por:

$$F(t) = CD \left\{ K_p P \left[0,5 - 0,5 \cos \left(\frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\} \quad \text{para } t \leq T_c \quad (2)$$

$$F(t) = 0 \quad \text{para } T_c \leq t \leq T \quad (3)$$

Onde:

$F(t)$: função da força do carregamento dinâmico no tempo (N);

CD : coeficiente de defasagem;

K_p : coeficiente de impacto;

P : peso da pessoa (N);

T : tempo da atividade (s);

T_c : período de contato (s);

t : tempo (s)

Os valores dos parâmetros da Eq. (2) são mostrados na Tabela 2 e sua representação gráfica é visualizada na Fig. 4.

Tabela 2: Características da função carregamento para este trabalho

CD	K_p (s)	P (N)	T (s)	T_c (s)
1	2,78	800	5	0,25

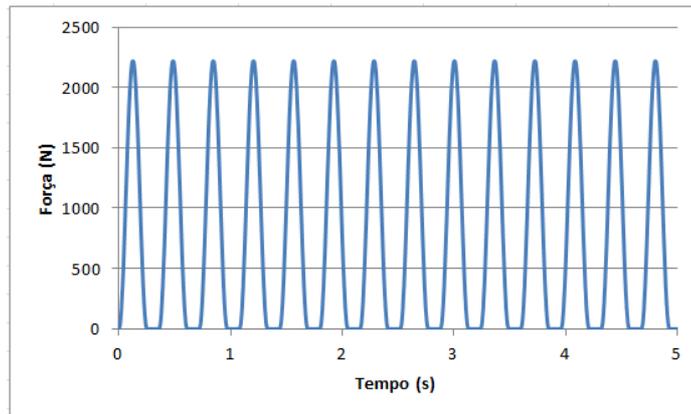


Figura 4: Carregamento dinâmico de 5 segundos.

E por fim, o valor da carga acidental estática concentrada no centro da laje é 2.215 N, que corresponde ao pico da carga dinâmica.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

A modelagem da laje nervurada foi realizada pelos conceitos dos Métodos dos Elementos Finitos (MEF), utilizando o software Abaqus (Simulia, 2007). O Abaqus é um software comercial para análise por elementos finitos.

O MEF é um método de análise de modelos matemáticos, que utiliza técnicas de discretização para fornecer valores aproximados. Esse método consiste em transformar o contínuo em discreto.

Na modelagem da laje nervurada e da viga de bordo, nos três modelos, foi utilizado o elemento sólido tridimensional, C3D20R, com 20 nós e seis graus de liberdade (três translações e três rotações). O número de elementos de cada modelo pode ser visualizado na Tabela 3. Procura-se com este elemento modelar o mais fiel possível à estrutura e obter naturalmente a excentricidade natural da estrutura (ver Fig. 5). Nas análises foi considerado o comportamento elástico-linear do concreto.

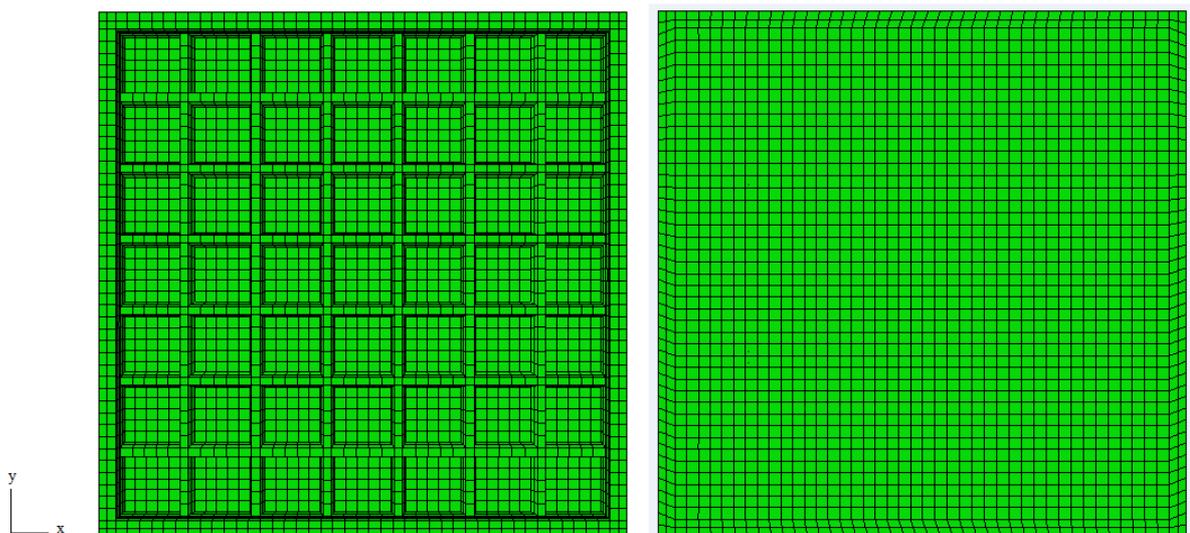


Figura 5: Malha para o modelo A.

Tabela 3: Número de elementos dos modelos analisados

	Modelo A			Modelo B			Modelo C		
Viga (cm)	14x50	14x75	14x100	14x50	14x75	14x100	14x50	14x75	14x100
Número de elementos	4657	5689	6377	6785	8105	8958	8381	9917	10941

4 ANÁLISE DO MODELO NUMÉRICO

Neste trabalho são propostos três modelos de laje nervurada, sendo que em cada modelo são realizadas duas análises estáticas e uma dinâmica. Nas análises estáticas, o objetivo é obter os deslocamentos máximos devido às cargas de projeto. Na análise dinâmica, além de se obter os deslocamentos máximos, verifica-se os picos de aceleração (conforto) e as frequências naturais (limites de norma).

4.1 Análise das frequências

Para a análise das frequências, é realizada uma análise de vibração livre não amortecida dos três modelos de laje. Estes três modelos apresentam os quatro primeiros modos de vibração coincidentes, os quais são apresentados na Fig. 6 para o modelo C, com viga de bordo de 50 cm.

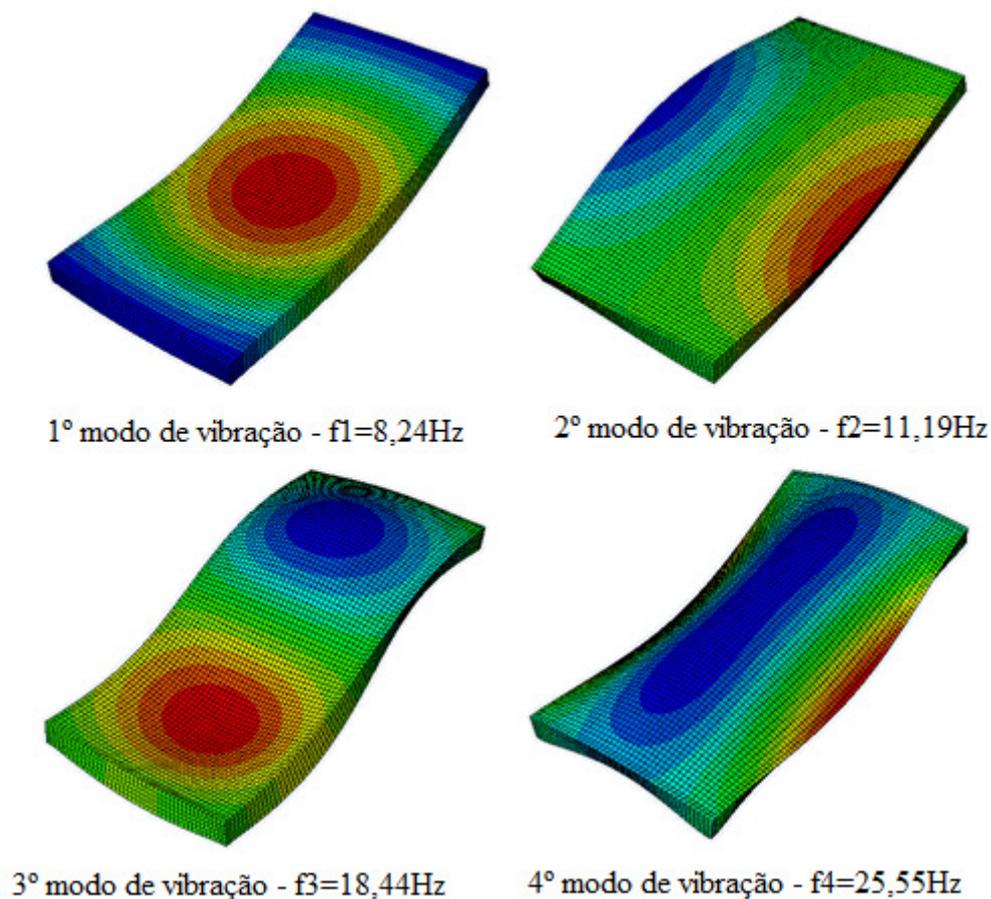


Figura 6: Modos de vibração para o modelo C

Verifica-se que os primeiro, terceiro e quarto modos de vibração são de flexão, enquanto o segundo modo é de torção. Portanto, a frequência mais baixa da laje está associada ao modo

de vibração de flexão no mesmo sentido em que o carregamento é aplicado.

A NBR 6118 (ABNT, 2003) estabelece valores para as frequências críticas, as quais são mostradas na Tabela 4. Esta norma estabelece ainda que a frequência fundamental da estrutura, com certa atividade, deve exceder em 20 % a frequência crítica ($f_1 > 1,2 f_{crit}$). Ou seja, a frequência fundamental de uma laje de academia (atividades aeróbicas) deve ser maior do que 9,6 Hz (garantia da estabilidade de desempenho no Estado Limite de Vibrações Excessivas: ELS-VE).

Tabela 4: Frequências críticas para alguns casos de estruturas (Fonte: NBR 6118, 2003)

Casos	Frequências Críticas (Hz)
Ginásio de esportes	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Escritórios	3,0 a 4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,4

Da análise dos três modelos de laje, foram obtidos os valores para as primeiras frequências naturais, como mostra a Tabela 5. A Fig. 7 mostra graficamente a tendência de evolução do valor das frequências com a altura da viga de bordo.

Tabela 5: Frequências fundamentais dos três modelos de laje, segundo a viga de borda

Viga (cm)	Modelo A			Modelo B			Modelo C		
	14x50	14x75	14x100	14x50	14x75	14x100	14x50	14x75	14x100
Frequências (Hz)	21,73	25,11	27,04	12,90	15,97	17,65	8,24	12,35	14,27

O modelo que apresentou menor frequência natural foi o modelo C, com 8,24 Hz. Valor esse muito próximo do mínimo crítico estabelecido pela norma brasileira (8 Hz), contudo está bem abaixo (14 %) do valor recomendado para o ELS-VE (9,6 Hz).

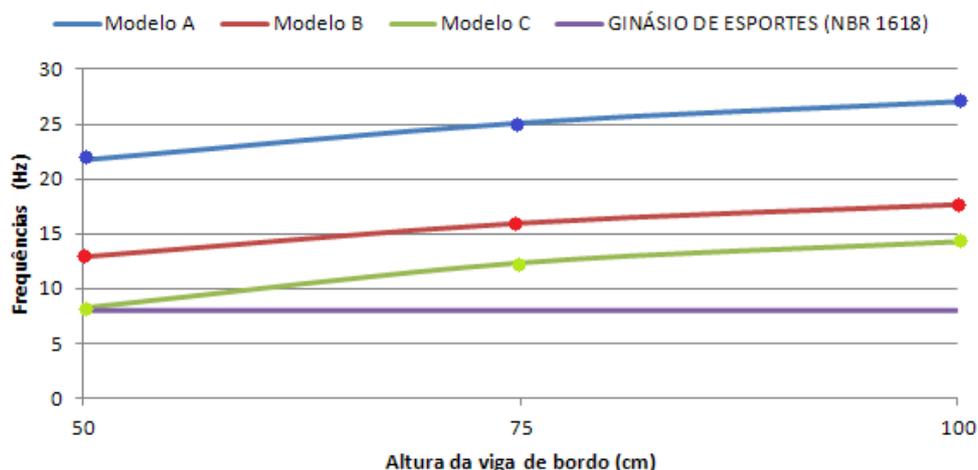


Figura 7: Variação das frequências naturais em função da altura da viga de bordo.

Observa-se da Fig. 7 que quanto maior é a inércia da viga de bordo, maior será o valor da primeira frequência natural da laje nervurada. Além disso, também é notório que quanto maior a relação entre vãos, maiores são as frequências naturais.

O carregamento dinâmico proposto tem uma frequência de 2,78 Hz e, como a menor frequência natural obtida é de 8,24 Hz, esta laje não apresenta risco de ressonância.

O modelo C, com viga de bordo de 50 cm, é também analisado para diferentes valores de resistência característica à compressão (f_{ck}) do concreto aos 28 dias. Ou seja, são considerados três valores diferentes para o módulo de elasticidade longitudinal secante (E_{sc}), que são: $2,13 \times 10^7$ kN/m², $2,38 \times 10^7$ kN/m² e $2,61 \times 10^7$ kN/m², respectivamente. A primeira frequência para cada f_{ck} é mostrada na Tabela 6 e a evolução desta com o f_{ck} é mostrada na Fig. 8.

Tabela 6: Frequências naturais para o modelo C, segundo o f_{ck}

f_{ck} (MPa)	20	25	30	35
f_0 (Hz)	7,14	7,52	7,92	8,24

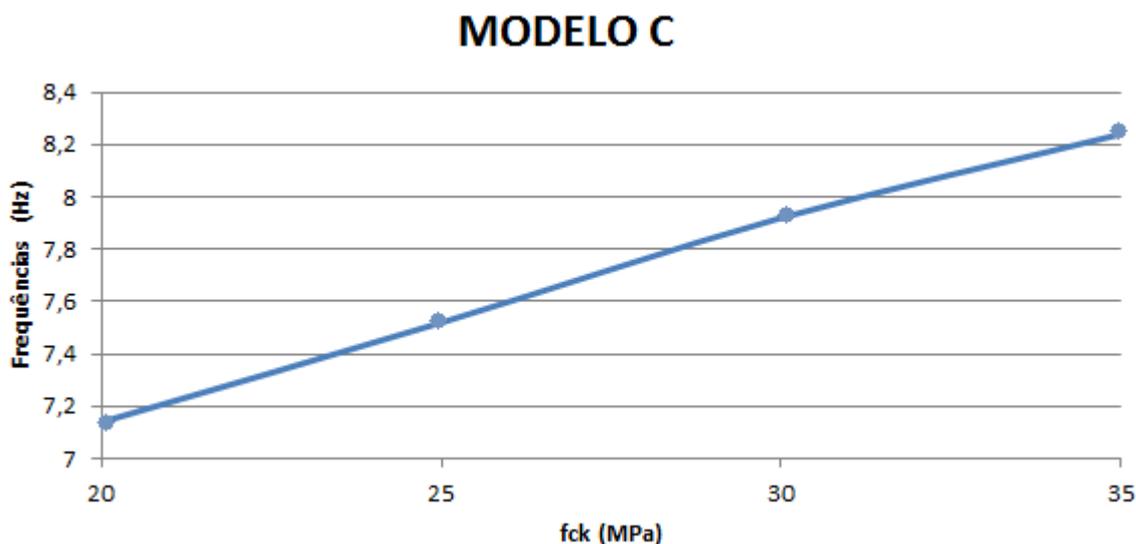


Figura 8: Relação entre frequência x f_{ck} .

Pela análise do gráfico da Fig. 8, fica evidenciado a relação quase linear entre a resistência característica à compressão do concreto e a primeira frequência natural da estrutura. Isso significa que, para as características da laje em análise, se a resistência característica à compressão ficar abaixo de 32 MPa, a laje ficará com a primeira frequência natural abaixo do especificado pela NBR 6118 (ABNT, 2003). Se o f_{ck} for acima de 35 MPa, a primeira frequência será maior do que 8,24 Hz, aproximando-se do valor de 9,6 Hz.

4.2 Análise dos deslocamentos

A NBR 6118 (ABNT, 2003) estabelece valores limites de deslocamentos a fim de evitar deformações excessivas da estrutura. Um dos grupos básicos definidos por ela é o da aceitabilidade sensorial, caracterizado pelo efeito visual desagradável e vibrações indesejáveis. O deslocamento vertical limite para o efeito visual desagradável é de $L/250$, onde L é relativo ao menor vão da laje; e para as vibrações indesejáveis é $L/350$. O primeiro é relativo ao deslocamento total da estrutura e o segundo refere-se ao deslocamento proporcionado somente pela carga acidental. Neste trabalho, os deslocamentos máximos dos três modelos são comparados com o valor limite para o efeito visual desagradável (1,712 cm).

Os valores dos deslocamentos máximos verticais são obtidos no centro das lajes, para cada uma das análises. Os valores destes deslocamentos são mostrados na Tabela 7 e na Fig. 9.

Tabela 7: Deslocamentos máximos no centro da laje em cm.

Viga (cm)	Modelo A			Modelo B			Modelo C		
	14x50	14x75	14x100	14x50	14x75	14x100	14x50	14x75	14x100
Deslocamento devido à carga estática de 5.000N/m ²	0,19165	0,14486	0,12165	0,50996	0,35145	0,28556	1,03356	0,5579	0,42615
Deslocamento devido à carga estática de 2.215N	0,09185	0,07066	0,06015	0,2663	0,16465	0,13465	0,53525	0,2601	0,19155
Deslocamento devido à carga dinâmica	0,006113	0,004924	0,00406	0,0101	0,00797	0,006806	0,01724	0,009378	0,00840

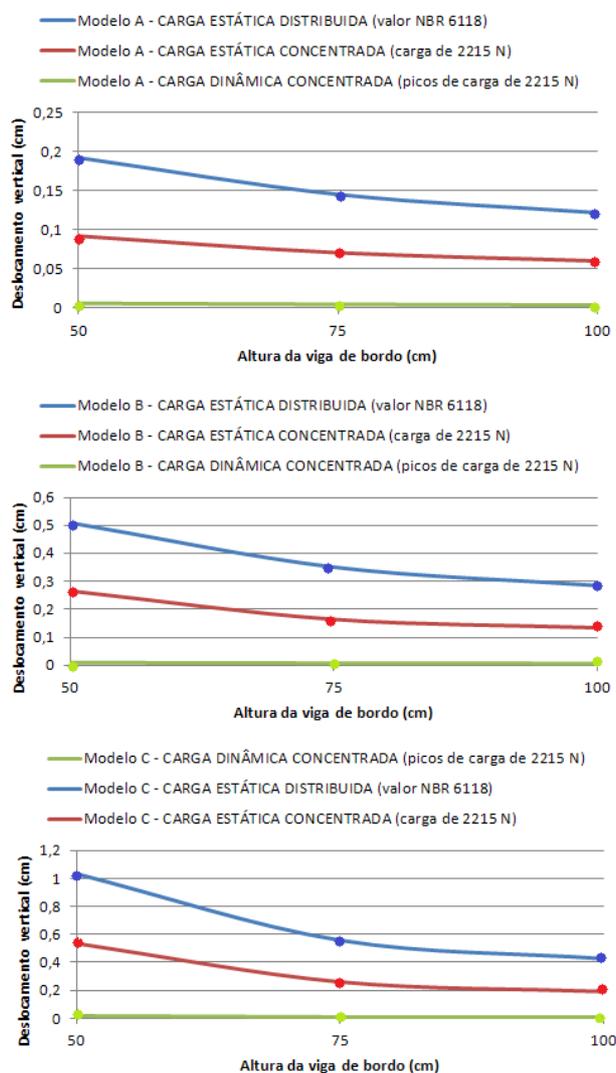


Figura 9: Variação dos deslocamentos verticais em função da altura da viga de bordo.

Verifica-se que em nenhuma das análises o deslocamento máximo permitido foi

ultrapassado. O deslocamento devido à carga acidental estática distribuída, proposta pela NBR 6120 (ABNT, 1980), fornece os maiores valores de flecha, sendo que o modelo C com viga de bordo de 50 cm foi a que sofreu a maior flecha (1,03cm). A carga estática concentrada de 2.215 N, aplicadas no centro da laje, proporciona flecha maior quando aplicada estaticamente. Essa carga refere-se a uma pessoa de 800 N pulando no centro da laje, o que significa que ao pular esta pessoa quase triplica a força aplicada na laje.

Analisando os dados das flechas das lajes, pode-se concluir que o aumento da inércia da viga de bordo confere a estrutura maior rigidez, diminuindo assim os deslocamentos máximos. Outro fato notório é que à medida que se aumenta a relação entre vãos, o deslocamento máximo aumenta (ver Fig. 9).

A carga acidental dinâmica gera nas lajes pequenas flechas. Acredita-se que seja porque esta carga refere-se a apenas uma pessoa pulando no centro da laje. O deslocamento no tempo, de cada um dos modelos, é mostrado na Fig. 10.

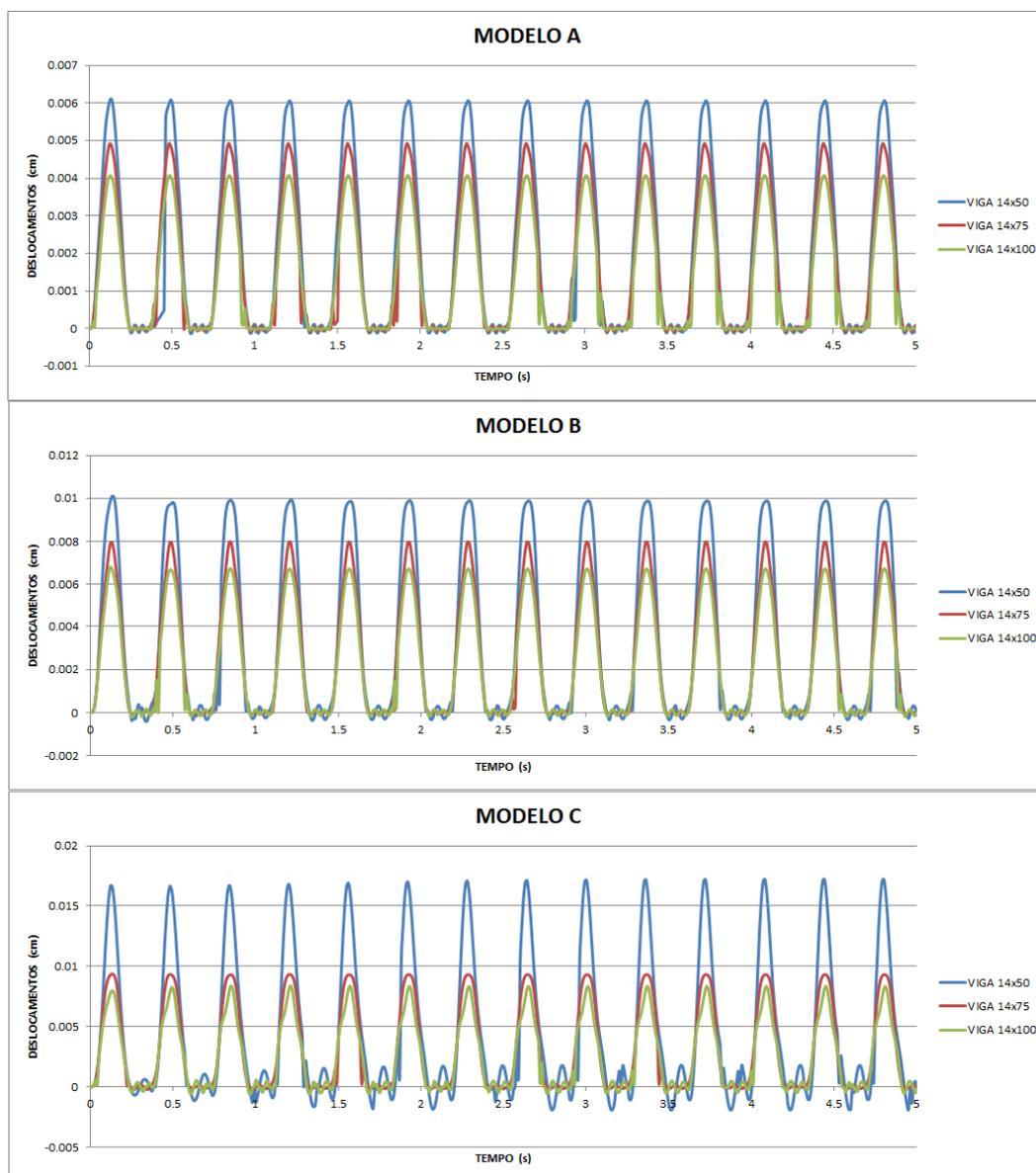


Figura 10: Deslocamento no tempo do centro da laje devido à carga acidental dinâmica.

Mais uma vez o modelo C com viga de bordo de 50 cm é a laje que sofre maiores deslocamentos, indicando que esta é mais flexível e mais susceptível a vibrações. Observa-se ainda da Fig. 10 que os deslocamentos seguem os mesmos padrões que os obtidos quando da aplicação das cargas estáticas. Isto é, quanto maior a relação entre vãos há uma tendência de maiores flechas; e quanto maior a inércia das vigas de bordo, menores são os deslocamentos verticais.

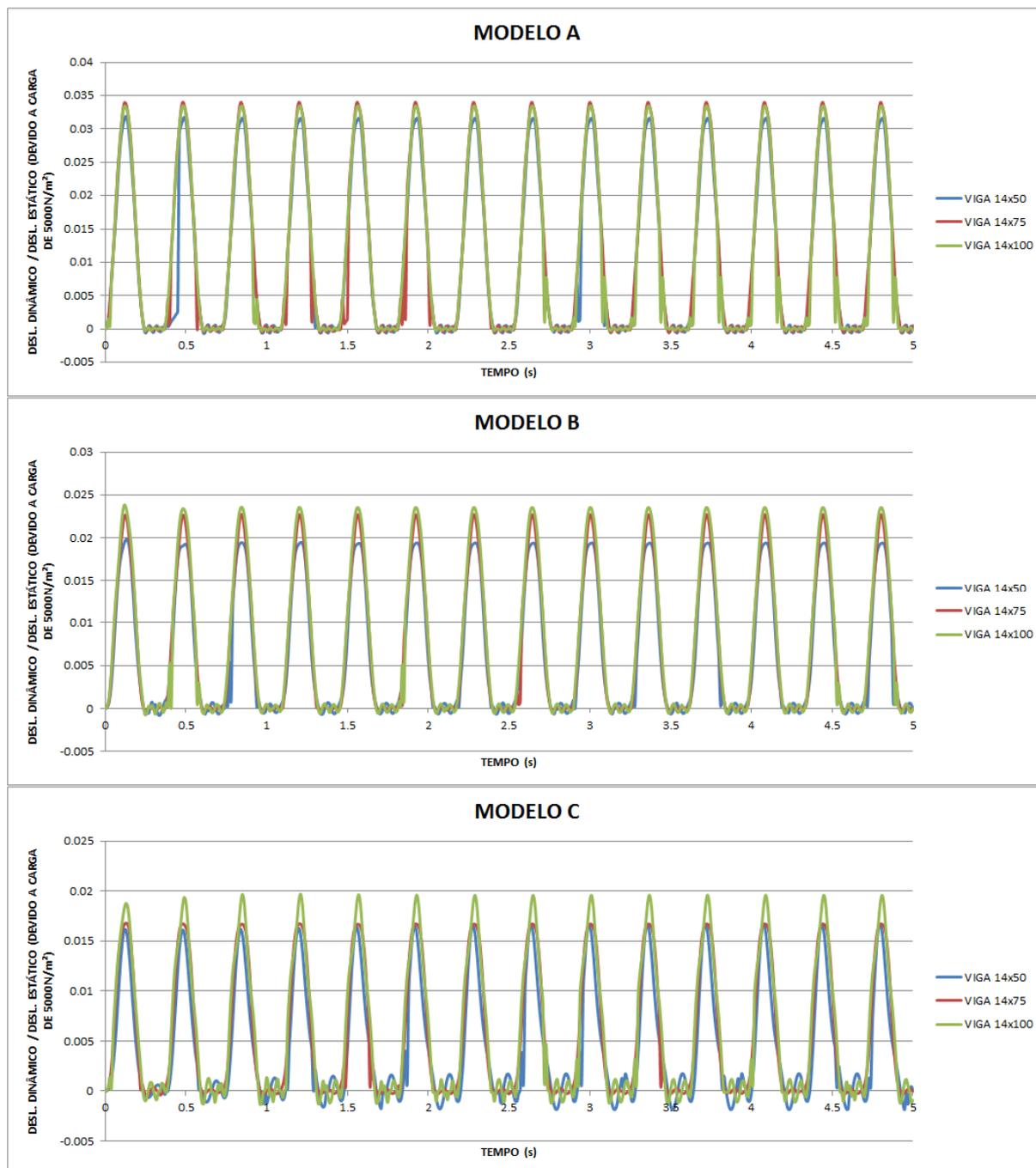


Figura 11: Relação entre deslocamento devido à carga dinâmica e estática de 5000 N/m²

Dividindo o deslocamento devido ao carregamento dinâmico pelo deslocamento devido aos carregamentos estáticos, observa-se que os valores dos deslocamentos devido à carga

dinâmica são percentualmente equivalentes para os três tipos de viga de bordo, com pequenas variações entre eles. Estes deslocamentos são aproximadamente 3,3% do deslocamento devido à carga estática de 5.000 N/m² (ver Fig. 11), e 7% do deslocamento devido à carga estática concentrada (ver Fig. 12), ambos para o Modelo A. Curiosamente, as lajes dos modelos B e C apresentam maiores deslocamentos percentuais em comparação com os deslocamentos devido ao carregamento estático, para as lajes com vigas de bordo de 75 cm e 100 cm.

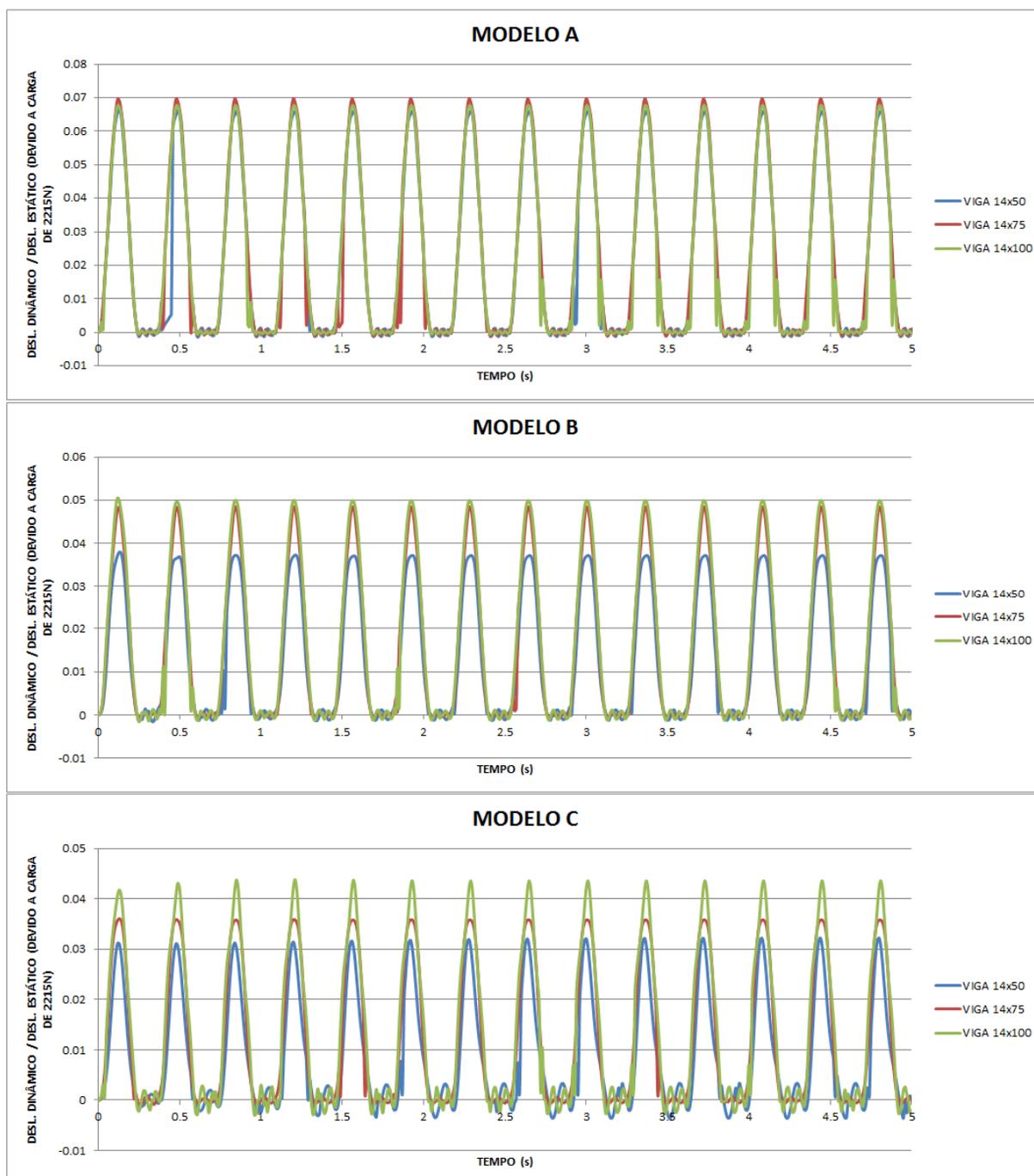


Figura 12: Relação entre deslocamento devido a carga dinâmica e estática de 2215N.

4.3 Análise do conforto humano

O corpo humano é sensível ao movimento das estruturas e, dependendo da amplitude destas vibrações, elas podem causar sensações diversas, que variam do desconforto até alterações na saúde. Os níveis de vibração que causam incômodo aos seres humanos são limitados por normas técnicas.

A norma internacional ISO 2631-1 (1989) rege que as vibrações percebidas pelo ser humano devem ser medidas por um sistema de eixos coordenados ortogonais, levando em consideração a posição do corpo (Fig. 13), sentado, em pé, ou deitado.

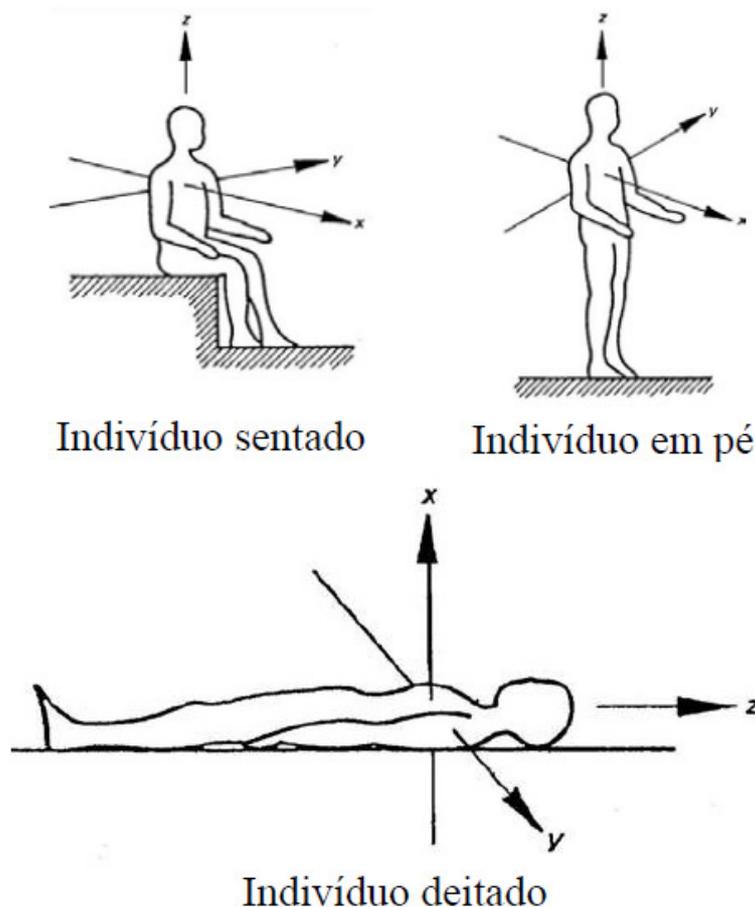


Figura 13: Eixo coordenado para vibrações mecânicas em seres humanos (Fonte: ISO 2631-1, 1989)

A sensibilidade do corpo às vibrações longitudinais (eixo z ,) é diferente da sensibilidade transversal (eixos x ou y). A sensibilidade varia com a frequência em cada direção. Indivíduos na posição em pé e vibrações na direção z apresentam maior sensibilidade na faixa de frequência de 4 a 8 Hz, que corresponde às frequências de ressonância do corpo. Na direção dos eixos x e y , as frequências naturais variam de 1 a 2 Hz. Já o indivíduo sentado apresenta frequência fundamental entre 4 a 6 Hz, para a direção z , e 1 a 3 Hz, para os eixos x e y .

Nas edificações onde podem ocorrer cargas dinâmicas acentuadas, como é o caso de uma laje de academia, a preocupação com o conforto humano deve ser recorrente. A análise do conforto humano pode ser feita a partir da aceleração que a estrutura pode gerar devido a uma carga dinâmica. Os valores limites de acelerações máximas que garantem esse conforto são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8: Limites de percepção humana para vibrações verticais de pessoas em pé (Fonte: Bachmann et al, 1997)

Descrição	Frequências entre 1 e 10 Hz para as acelerações de pico (m/s^2)
Apenas perceptível	0,034
Claramente perceptível	0,100
Perturbador / Desagradável	0,550
Intolerável	1,800

As acelerações máximas, neste trabalho, são avaliadas no centro das lajes, obtendo-se os valores mostrados na Fig. 14.

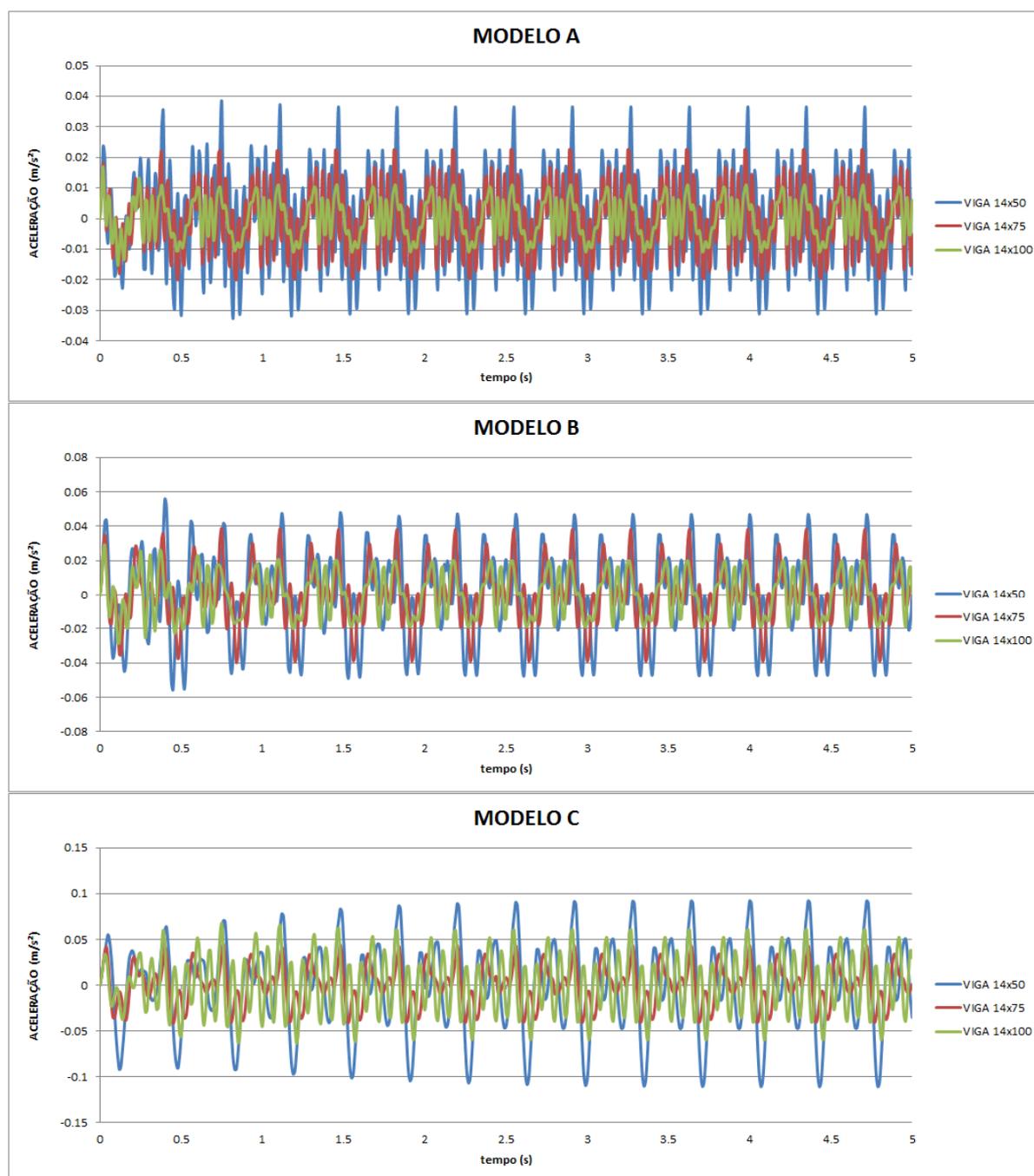


Figura 14: Relação entre aceleração e tempo.

O maior pico de aceleração é desenvolvido pelo modelo C, para viga de bordo de 50 cm cujo valor é $0,12 \text{ m/s}^2$, como era de se esperar, já que este modelo apresenta frequências mais baixas. Os modelos A e B apresentam valores máximos de aceleração abaixo de $0,04 \text{ m/s}^2$ e $0,06 \text{ m/s}^2$, respectivamente. Com base na Tabela 8, observa-se que, apenas, o modelo C, com viga de bordo de 50 cm, ultrapassa o limite do claramente perceptível, porém estando bem longe do desagradável. É necessário lembrar que esta aceleração ocorre para uma única pessoa pulando.

Nas lajes há uma tendência de que, quanto maior a relação entre vãos e menor a inércia das vigas de bordo, maiores são os picos de aceleração que a estrutura poderá estar sujeita.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho procura avaliar a influência da relação entre vãos de lajes nervuradas, a altura da viga de borda, em laje nervurada devido à ação de pular sobre ela. Para tal, três modelos de laje foram analisados usando o método dos elementos finitos, usando o programa comercial Abaqus (Simulia, 2007). Os modelos em estudo tiveram como base o projeto real de uma laje nervurada destinada a uma academia de ginástica.

Das análises apresentadas, percebe-se que a inércia das vigas de bordo e a relação entre vãos influenciam diretamente nas respostas estática e dinâmica do sistema. Em relação às frequências naturais, verifica-se que há uma tendência destas serem reduzidas conforme aumenta a relação entre vãos de laje. E, ainda, quanto maior a inércia da viga de bordo, maiores são estas frequências. Foi possível observar que a resistência característica à compressão do concreto tem uma relação quase linear com frequência da laje. Ou seja, se a resistência característica à compressão do concreto é reduzida, a laje pode apresentar frequência natural abaixo da frequência crítica estabelecida pela NBR 6118 (ABNT, 2003). Pode-se concluir, portanto, que a laje original (Modelo A) atende ao prescrito pela norma, inclusive em relação ao ELS-VE, independente da altura da viga de bordo.

De uma forma geral, as lajes apresentam um bom comportamento no que diz respeito às flechas, pois os deslocamentos verticais dos três modelos não ultrapassam o deslocamento limite prescrito pela NBR 6118 (ABNT, 2003). Observa-se que quanto maior a rigidez das vigas de bordo, menor é o deslocamento no centro da laje; e que quanto maior a relação entre vãos maior é a flecha. Verifica-se também que a análise considerando a carga acidental distribuída sobre a laje proporciona maiores flechas.

No tocante ao conforto humano, o modelo C, com viga de bordo de 50 cm, apresenta os maiores picos de aceleração, estando próxima a faixa de vibração de claramente perceptível, necessitando de atenção especial. Contudo, a laje original não provoca desconforto quando há uma pessoa pulando.

Vale ressaltar que este trabalho é um estudo inicial e que, no futuro, serão realizadas análises considerando grupos de pessoas realizando atividades de aeróbicas sobre a laje nervurada, o que se considera seja mais representativo do que acontece em uma academia de ginástica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pela Agência de Fomento à Pesquisa do país CNPq.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6118: *Projetos de estruturas de*

- concreto: Procedimentos*. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6120: *Cargas para cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro, 1980.
- Araújo, J.M. Considerações sobre a rigidez à torção das lajes nervuradas de concreto armado. *Revista Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n 7:1-8, 2005.
- Bachmann, H., Ammann, W.J., Deischl, F., Eisenmann, J., Floegl, I., Hirsch, G.H., Klein, G.H., Lande, G.J., Mahrenholtz, O., Natke, H.G., Nussbaumer, H., Pretlove, A., Rainer, J.H., Saemann, E., and Steinbeisser, L. *Vibration problems in structures. Practical guidelines*. Birkhauser, 1997.
- Bocchi Jr, C.F. *Lajes nervuradas de concreto armado: projeto e execução*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 1995.
- Coelho, E.L., Sousa, R.M., and Greco, B.H. Estudo Comparativo Entre Sistema Estrutural com Lajes Maciças, Nervuradas e Lajes Lisas. *Nono Simpósio de Mecânica Computacional*, 1-10, 2010.
- Dias, R.H. *Análise numérica de pavimentos de edifícios em lajes nervuradas*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2003.
- Faisca, R. G. *Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas*. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003
- ISO - International Standard Organization. ISO 2631-1: *Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 1: General requirements*, Suíça, 1989.
- PED - Pesquisa de Emprego e Desemprego. *Pesquisa de emprego e desemprego na região metropolitana de Fortaleza*. Ano 3 – número especial, 2010.
- Silva, M.A.F. *Projeto e construção de lajes nervuradas de concreto armado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil, 2005.
- Silva, N.M.T.F. *Análise estática e dinâmica de lajes nervuradas de concreto armado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- Simulia, 2007. ABAQUS user's manual. Version 6.7.
- Stramandinoli, J.S.B. *Contribuições à análise de lajes nervuradas por analogia de grelha*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2003.