

Análise dos efeitos dinâmicos introduzidos por atividades humanas em lajes nervuradas unidirecionais de concreto

Analysis of dynamic effects induced by human activities in one-way joist concrete slabs

Análisis de los efectos dinámicos introducidos por actividades humanas en losas nervadas unidireccionales de hormigón

Analyse des effets dynamiques introduits par des activités humaines en plaques nervurées unidirectionnelles de béton

Mario Esmeraldo dos Santos
mario_esmeraldo@yahoo.com.br
Universidade de Fortaleza

Eduardo Cesar Cordeiro Leite
eduardo.leite@unifor.com.br
Universidade de Fortaleza

Resumo

No mercado cada vez mais competitivo da engenharia de estruturas, a busca por leveza, física e visual, tornou-se uma obrigação substancial para os profissionais que atuam na área, tanto por questões econômicas como por requisitos da arquitetura contemporânea. As lajes nervuradas unidirecionais de concreto, especialmente as protendidas, vêm ao encontro dessa necessidade, pois unem baixo consumo de concreto e esbeltez. Entretanto, sabe-se que o índice de esbeltez, quando somado ao caráter unidirecional, aumenta, significativamente, a probabilidade do aparecimento de vibrações desagradáveis aos usuários, de maneira que, em alguns casos, as verificações dinâmicas passam a ser determinantes no dimensionamento desses elementos. Baseando-se em tais considerações, esse trabalho se propõe a fazer, por três métodos distintos, uma análise da resposta dinâmica de diversas seções transversais e vãos de lajes unidirecionais de concreto submetidas a atividades humanas. Como ferramenta, para viabilização dessa análise, foi desenvolvido pelos autores, em *Visual C#*, um *software* para *Microsoft Windows* denominado Dinâmico (Versão 1.1). Os resultados obtidos foram organizados graficamente em função do índice de esbeltez, comparados, validados e, por fim, classificados em termos de relevância estrutural.

Palavras-chave: Dinâmica. Vibrações. Lajes nervuradas unidirecionais de concreto. Software.

Abstract

In the increasingly competitive structural engineering market, the pursuit for lightness, both physical and visual, has become a substantial obligation for the professionals working in this area, either due to economic reasons or due to contemporary architecture demands. The one-way joist concrete slabs, specially the prestressed ones, suit well to these requirements, since they combine low concrete consumption and slenderness. However, it is well known that the combination of slenderness and one-way behaving increases significantly the probability of unpleasant vibrations to the users, so that the design of these elements might be, in some cases, affected by these dynamic vibrations. Based on these considerations, this paper proposes to analyze, using three distinct methods, the dynamic response of several one-way joist concrete slabs cross sections and spans subjected to human activities. As a tool to make this analysis feasible, *DINÂMICO* (Version 1.1), a *Microsoft Windows* Software, was developed by the authors, using *Visual C#*. The results were graphically arranged according to the slenderness, compared, certified, and then, classified in terms of structural relevance.

Keywords: Dynamics. Vibrations. One-way joist concrete slabs. Software

Resumen

En el mercado, cada día más competitivo, de la ingeniería de estructuras, la búsqueda por suavidad física y visual se tornó una obligación importante para los profesionales en este ámbito de actuación, tanto por cuestiones económicas como por la demanda de la arquitectura contemporánea. Las losas nervadas unidireccionales de hormigón, especialmente las pretensadas, vienen al encuentro de esta necesidad, pues unen bajo consumo de hormigón con belleza. Sin embargo, se sabe que la suma de la belleza con el carácter unidireccional aumenta, significativamente, la probabilidad del surgimiento de vibraciones desagradables a los usuarios, de manera que, en algunos casos, las verificaciones dinámicas pasan a ser determinantes en el dimensionamiento de estos elementos. Con base en tales consideraciones,

este trabajo propone hacer, por tres métodos distintos, un análisis de la respuesta dinámica de diversas secciones transversales y vanos de losas unidireccionales de hormigón sometidos a acciones humanas. Como herramienta para viabilidad de este análisis, fue desarrollado por los autores, en *Visual C#*, un software para *Microsoft Windows* denominado DINÁMICO (Versión 1.1). Los resultados obtenidos fueron ordenados gráficamente en función de la belleza, comparados, validados y, por fin, clasificados en términos de importancia estructural.

Palabras-clave: Dinámica. Vibraciones. Losas nervadas unidireccionales de hormigón. Software.

Résumé

Dans le marché de l'ingénierie de structures, qui est à chaque moment plus compétitif, de la recherche pour la légèreté, soit visuelle ou physique, s'est devenue une obligation substantielle pour des professionnels qui travaillent dans ce domaine, soit par des questions économiques, soit par des exigences de l'architecture contemporaine. Les plaques nervurées unidirectionnelles de béton, en particulier celles qui sont allongées, répondent à ce marché, car elles combinent une faible consommation de béton et de la minceur. Néanmoins, on sait que de la minceur ajoutée au caractère unidirectionnel augmente, significativement, la probabilité de vibrations désagréables aux utilisateurs, de sorte que, dans certains cas, les vérifications dynamiques passent à être déterminantes dans le mesurage de ces éléments. En se basant sur telles considérations, ce travail se propose à faire, par trois méthodes distinctes, une analyse de la réponse dynamique de diverses sections transversales et de travées de plaques unidirectionnelles de béton soumises aux activités humaines. Comme outil, pour viabilisation de cette analyse, il a été développé par les auteurs, en *Visual C#*, un logiciel pour *Microsoft Windows*, nommé DYNAMIQUE (Version 1.1). Les résultats obtenus ont été organisés graphiquement en fonction de la minceur. Ils ont aussi été comparés, validés et, finalement, classés en termes d'importance structurelle.

Mots-clés: Dynamique. Vibrations. Plaques nervurées unidirectionnelles de béton. Software.

1 Introdução

Dentro do contexto geral do projeto estrutural de uma edificação, usualmente, as lajes respondem pela maior parte do consumo de insumos, fazendo com que a busca por soluções leves e econômicas para esses elementos seja um fator primordial para obtenção de bons resultados. Esse fator, somado aos requisitos arquitetônicos contemporâneos e à evolução dos materiais e dos sistemas modularizados para fôrmas, fomentou a disseminação da utilização das lajes unidirecionais de concreto armado ou protendido. Entretanto, o caráter unidirecional combinado à adoção de seções esbeltas, protendidas em boa parte das vezes, pode favorecer o aparecimento de vibrações desagradáveis aos usuários, mesmo quando todas as especificações normativas referentes aos limites de deformação forem atendidas.

Para evitar problemas dessa natureza, a ABNT NBR 6118:2014, que trata de “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento”, em seu item 23.3, intitulado “Estado-limite de vibrações excessivas”, recomenda afastar o máximo possível a frequência natural da estrutura da frequência crítica solicitante, que depende diretamente da utilização da edificação. Além disso, para estruturas submetidas a vibrações verticais introduzidas pela ação de pessoas, já possui valores pré-estabelecidos divididos por caso de utilização. Ela também deixa em aberto a possibilidade de que, em casos especiais, quando essa prescrição não puder ser atendida, pode ser feita uma análise dinâmica mais acurada, conforme estabelecido em Normas Internacionais enquanto não existir Norma Brasileira específica.

Partindo desse enquadramento, esse trabalho tem como objetivo fazer, por três métodos distintos, um estudo comparativo entre as respostas dinâmicas de seções transversais usuais de lajes unidirecionais de concreto submetidas a variações de vão e a diferentes tipos de ocupação/atividades humanas. Com base nos dados obtidos neste estudo, pretende-se validar os métodos e concluir sobre a relevância das análises dinâmicas no dimensionamento de seções de lajes unidirecionais.

Além do método proposto pela ABNT NBR 6118:2014, definido por Bachmann et al. (1995) como sintonização da estrutura, foram utilizados dois métodos fundamentados na verificação da aceitabilidade sensorial dos picos de aceleração gerados pelas atividades humanas, sendo um baseado na análise de Fourier e o outro, em Aalami (2014).

Para viabilização dessa análise, foi desenvolvido pelos autores, utilizando a linguagem de programação *Visual C#*, um software para *Microsoft Windows* denominado Dinâmico (Versão 1.1) (Fig. 1), cuja saída de dados permite ao usuário obter conclusões baseando-se nos três métodos citados.

Figura 1 – Tela de identificação do *software* Dinâmico (Versão 1.0) acessada a partir do botão “Sobre”.



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

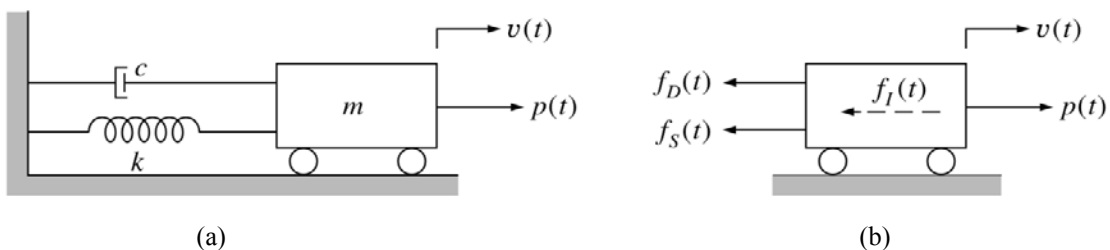
2 Revisão bibliográfica

2.1 Vibrações nas estruturas: Conceitos básicos

2.1.1 Vibrações livres

As propriedades físicas essenciais para qualquer análise linear de um sistema estrutural sujeito a uma carga dinâmica são: massa, rigidez e capacidade de dispersão da energia mecânica, ou seja, amortecimento. Num modelo de um grau de liberdade, cada uma dessas propriedades é assumida como sendo concentrada num único elemento físico. Um exemplo clássico desse tipo de sistema pode ser visto na figura 2a, em que a massa m está incluída no bloco rígido que, por estar apoiado sobre roldanas, pode executar apenas movimentos de translação horizontal. Assim, a coordenada $v(t)$ define completamente a posição do mesmo. A resistência elástica ao deslocamento é garantida pela rigidez da mola k , enquanto o mecanismo de dissipação de energia é representado pelo amortecedor c . O carregamento externo que produz a resposta dinâmica desse sistema ao longo do tempo é a força $p(t)$ (CLOUGH et al., 1993).

Figura 2 – Sistema dinâmico de um grau de liberdade: (a) componentes básicos; (b) forças em equilíbrio.



Fonte: Clough e Penzien (1993).

A equação do movimento para o sistema anteriormente descrito pode ser formulada diretamente a partir do equilíbrio de forças atuando sobre a massa pelo princípio de d’Alembert (Fig.2b):

$$f_I(t) + f_D(t) + f_S(t) = p(t) \quad (1)$$

Como pode ser visto abaixo, cada uma das forças representadas do lado esquerdo dessa equação é função do deslocamento $v(t)$ ou de uma de suas derivadas.

A força inercial, pela segunda lei de Newton, é um produto da massa pela aceleração:

$$f_I(t) = m \ddot{v}(t) \quad (2)$$

Já a força de amortecimento é um produto da constante de amortecimento pela velocidade:

$$f_D(t) = c \dot{v}(t) \quad (3)$$

Por fim, a força elástica é um produto da rigidez da mola pelo deslocamento:

$$f_S(t) = k v(t) \quad (4)$$

Substituindo as equações (2), (3) e (4) na (1), chegamos à equação clássica que rege os problemas dinâmicos:

$$m \ddot{v}(t) + c \dot{v}(t) + kv(t) = p(t) \quad (5)$$

Adotando agora $p(t) = 0$, passamos a ter a representação de um sistema com vibração livre amortecida de um grau de liberdade:

$$m \ddot{v}(t) + c \dot{v}(t) + kv(t) = 0 \quad (6)$$

Se considerarmos $c = 0$, a frequência natural circular não-amortecida ω pode ser definida como:

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad (rad/s) \quad (7)$$

Para converter a frequência natural circular em frequência natural cíclica, basta dividir a mesma por 2π :

$$f = \omega/2\pi \quad (Hz) \quad (8)$$

O inverso da equação (8) é definido como período de vibração livre e é expresso em segundos:

$$T = 1/f = 2\pi/\omega \quad (s) \quad (9)$$

De forma resumida, podemos dizer que a frequência representa o número de vezes que a estrutura repetirá o movimento em cada segundo. Já o período é o intervalo de tempo entre essas repetições. Tanto a frequência como o período são propriedades da estrutura definidas como “naturais” (BRASIL et al., 2013).

Considerando agora a presença do amortecimento ($c > 0$), como é necessário nas estruturas reais, passa-se a ter, no problema, a grandeza adimensional denominada “taxa de amortecimento”, ξ :

$$\xi = c/2m\omega \quad \therefore \quad c = 2m\xi\omega \quad (10)$$

Dividindo os membros da equação (5) pela massa m e, posteriormente, substituindo nela as equações (7) e (10), temos:

$$\ddot{v}(t) + 2\xi\omega \dot{v}(t) + \omega^2 v(t) = 0 \quad (11)$$

A resolução dessa equação diferencial ordinária conduz à equação que define a amplitude do movimento ao longo do tempo:

$$v(t) = e^{-\xi\omega t} \rho \cos(\omega_D t + \theta) \quad (12)$$

Com frequência amortecida de vibração ω_D dada por:

$$\omega_D = \omega \sqrt{1 - \xi^2} \quad (rad/s) \quad (13)$$

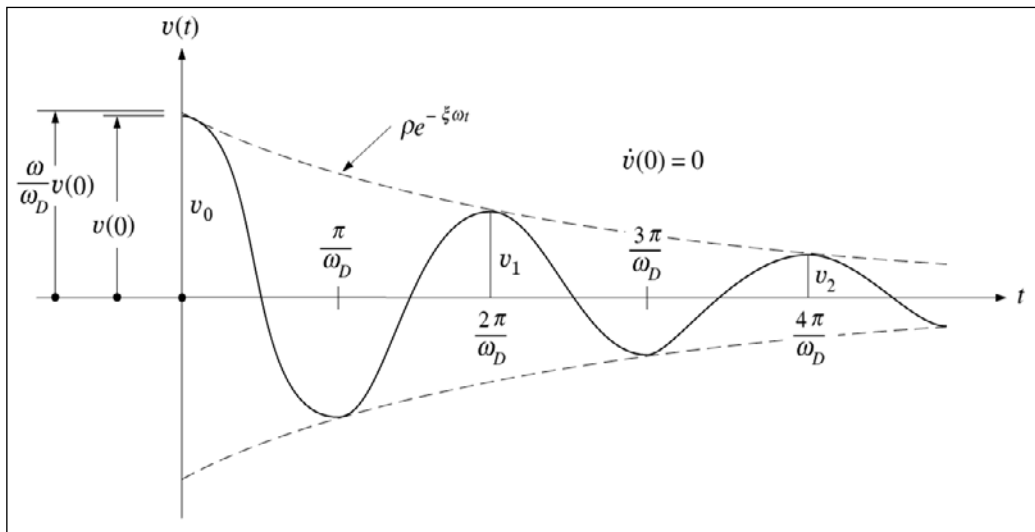
Já o ρ e o correspondem, respectivamente, à amplitude máxima de vibração e ao ângulo fase obtidos no instante $t = 0$:

$$\rho = \sqrt{v(0)^2 + \left(\frac{v(0) + \dot{v}(0)\xi\omega}{\omega_D} \right)^2} \quad (14)$$

$$\theta = -\tan^{-1} \left(\frac{\dot{v}(0)^2 + v(0)\xi\omega}{\omega_D v(0)} \right) \quad (15)$$

A figura 3 mostra a representação gráfica desse conjunto de equações. Nela, percebe-se que a amplitude diminui rapidamente devido à exponencial negativa que multiplica ρ ; já sua frequência é pouca afetada, pois, no caso da dinâmica das estruturas, como pode ser visto na tabela (1), os sistemas apresentam amortecimentos subcríticos. Sendo assim: $\omega_D \approx \omega$.

Figura 3 – Resposta para vibração livre de um sistema de um grau de liberdade com amortecimento subcrítico.



Fonte: Clough e Penzien (1993).

Tabela 1 – Valores recomendados para taxa de amortecimento por ocupação.

Ocupação	Taxa de Amortecimento (ξ)
Pavimentos de concreto “nus”	0,02
Mobília e poucas divisórias	0,03
Mobília e muitas divisórias	0,05
Shoppings	0,02

Fonte: Allen e Murray (1993).

2.1.2 Vibrações forçadas

Quando a carga variável em função do tempo $p(t)$ é diferente de zero, diz-se que o sistema está sujeito a um carregamento dinâmico ou vibração forçada. Bachmann et al. (1995) classificam essas excitações em quatro categorias:

- Harmônicas - Ex.: O balanço de máquinas rotativas;
- Periódicas - Ex.: Atividades humanas: andar, correr, pular, dançar, etc.;
- Transientes - Ex.: O impacto de veículos cruzando uma ponte;
- Aleatórias - Ex.: A ação do vento e das ondas do mar.

Considerando o contexto do trabalho em questão, focaremos apenas nas duas primeiras categorias citadas.

2.1.3 Excitações harmônicas

Assumindo que o sistema da figura 2 está submetido a uma carga $p(t)$ que varia harmonicamente ao longo do tempo, de forma senoidal, com amplitude p_0 e frequência angular Ω , obtém-se:

$$m \ddot{v}(t) + c \dot{v}(t) + kv(t) = p_o \text{ sen}\Omega t \tag{16}$$

Posteriormente, após as devidas substituições:

$$\ddot{v}(t) + 2\xi\omega \dot{v}(t) + \omega^2 v(t) = (p_o/m)\text{sen}\Omega t \tag{17}$$

A resolução dessa equação conduz a um histórico de resposta que possui duas etapas ao longo do tempo. A primeira é denominada regime transiente, e é, em geral, de pouco interesse prático. A segunda, denominada regime estacionário, é representada na forma da equação (18) e corresponde a uma resposta harmônica com frequência igual à do carregamento, porém fora de fase em virtude do amortecimento.

$$v(t) = \rho \text{sen}(\Omega t - \theta). \tag{18}$$

A amplitude ρ e a fase são dados, respectivamente, por:

$$\rho = \frac{p_o}{k} D \tag{19}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{2\xi\beta}{1-\beta^2} \right) \tag{20}$$

Sendo, β a relação entre a frequência de excitação e a frequência natural (não-amortecida) ω da estrutura:

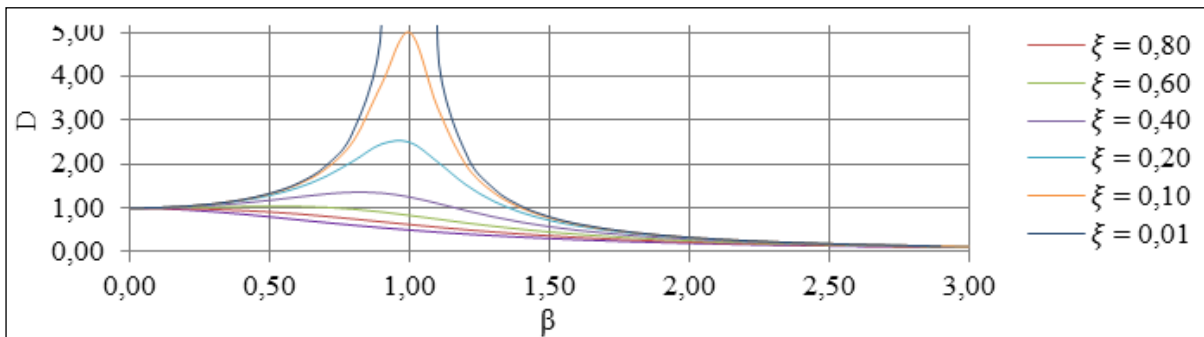
$$\beta = \Omega/\omega \tag{21}$$

Já a constante adimensional D representa o “coeficiente de amplificação dinâmica”, que é definido por:

$$D = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \tag{22}$$

A análise das equações (19), (21) e (22) nos permite perceber que, quando os valores das frequências se aproximam, caracterizando o fenômeno da ressonância, β tende a 1, fazendo com que o coeficiente de amplificação atinja seu valor máximo. Observa-se também que, quando $\beta \ll 1$, D tende a 1, isto é, a resposta dinâmica é praticamente igual à estática. Já quando $\beta \gg 1$, D tende para zero. Com isso, pode-se concluir que excitações harmônicas de alta frequência quase não afetam o sistema (BRASIL et al., 2013). Essas constatações podem ser visualizadas graficamente na figura 4.

Figura 4 – Variação do coeficiente de amplificação dinâmica com amortecimento e frequência.



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

2.1.4 Excitações periódicas

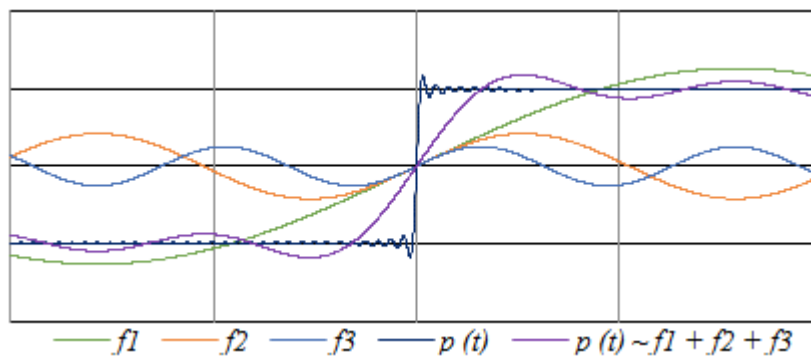
Toda excitação $F(t)$ caracterizada como periódica pode ser decomposta em uma parte constante somada a diversas (ou até infinitas) componentes harmônicas independentes. Para a maioria das aplicações práticas, essa decomposição harmônica pode ser representada através da utilização das séries de Fourier, na seguinte forma:

$$F(t) = F_o + \sum_{i=0}^n F_o \alpha_i \sin(i\Omega t - \theta_i) \quad (23)$$

Nessa expressão, a frequência de excitação é multiplicada pelo inteiro i (1, 2, 3, ...), correspondente ao indexador das componentes harmônicas. Isto faz com que as frequências dessas referidas componentes sejam múltiplas da frequência principal. Já F_o corresponde ao valor médio da força ondulatória, que é multiplicado em cada uma das parcelas da equação pelo “coeficiente de Fourier” α , que decresce ao longo dos harmônicos e está relacionado com a relevância de cada uma das componentes. Por fim, temos o também variável ângulo fase .

Um exemplo clássico da aplicação das séries de Fourier pode ser visto na figura 5. Nela, uma onda periódica quadrada $p(t)$ é comparada com a soma de suas três primeiras componentes harmônicas ($f1, f2$ e $f3$), mostrando que a aproximação obtida já captura o formato da onda quadrada. Obviamente, à medida que se aumenta o número de harmônicos, a aproximação se torna cada vez melhor (BRASIL et al., 2013).

Figura 5 – Composição de uma onda quadrada utilizando as séries de Fourier.



Fonte: Brasil et al (2013).

2.1.5 Sistemas contínuos e sua equivalência com os sistemas de um grau de liberdade

As frequências naturais de vigas e lajes, elementos caracterizados como sistemas contínuos, podem ser obtidas a partir de um sistema equivalente de um grau de liberdade semelhante ao que foi apresentado anteriormente. Como no trabalho em questão nos limitaremos à análise de lajes nervuradas unidirecionais, apresentaremos apenas a formulação referente às vigas bi-apoiadas, pois é suficiente para representar analogamente esse sistema estrutural.

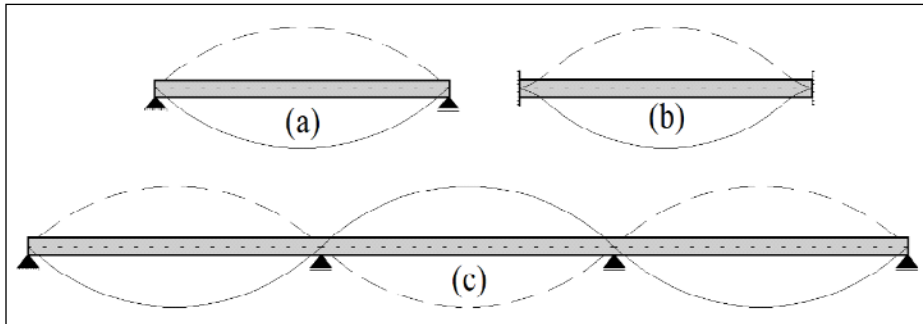
$$\omega = \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \quad (rad/s) \quad (24)$$

Componentes da equação: E – Módulo de elasticidade dinâmico do concreto (N/m²); I – Inércia da seção considerada (m⁴); m – Massa linear do sistema (kgf/m); L – Vão (m).

Segundo Aalami (2014), a existência de continuidade entre vãos não interfere de forma significativa na frequência natural da estrutura, pois, como pode ser visto na figura 6, o primeiro modo de vibração das vigas contínuas se assemelha bastante ao das vigas simplesmente apoiadas. Ele também recomenda que nas análises de vibração sejam adotados incrementos da ordem de 20 a 25% sobre o módulo de elasticidade estático.

Vale aqui também destacar que, segundo Clough e Penzien (1993), a protensão, utilizada para controle das deformações e/ou da fissuração da laje e indispensável para a viabilização de seções mais esbeltas, não influencia no comportamento dinâmico da estrutura. Isto é justificado pelo fato de os cabos estarem intimamente ligados ao concreto, acompanhando assim todas as deformações e, conseqüentemente, não gerando excentricidades adicionais em relação ao centro geométrico da peça. Essa consideração se aplica a ambos os tipos de protensão: aderente e não-aderente.

Figura 6 – Primeiro modo de vibração de vigas: (a) simplesmente apoiadas, (b) engastadas e (c) contínuas.



Fonte: Aalami (2014).

A consideração da deslocabilidade dos apoios das referidas lajes pode ser feita com base na aproximação de Dunkerley, em que as frequências naturais da laje (f_1) e do apoio (f_2) são associadas como molas em série para se obter a frequência natural do conjunto (f).

$$f = (f_1^{-2} + f_2^{-2})^{-1/2} \text{ (Hz)} \tag{25}$$

2.2 Efeitos dinâmicos gerados por atividades humanas

Os movimentos rítmicos do corpo humano (andar, correr, pular, dançar, etc.) são potencialmente capazes de causar vibrações desagradáveis aos usuários de uma edificação, porém a percepção e o seu nível de aceitabilidade podem variar de acordo com as características sensoriais dos receptores. Considerando a natureza periódica desses carregamentos e, com isso, o fato de poderem ser decompostos em séries harmônicas, deduz-se que estruturas com frequências fundamentais próximas das frequências das atividades humanas podem entrar em ressonância e, conseqüentemente, ficarem sujeitas aos efeitos desagradáveis das amplificações dinâmicas.

Bachmann et al. (1995) propõem uma tabela que correlaciona diversos tipos de atividades humanas com suas frequências básicas, coeficientes de Fourier e ângulos fase correspondentes aos três primeiros harmônicos de cada uma delas. Além disso, sugere a ocupação (pessoas/m²) a ser considerada na análise.

De posse dessas informações, é possível compor a função periódica de qualquer uma das referidas atividades através da utilização da equação (23).

Tabela 2 – Valores sugeridos para os coeficientes de força dinâmica por tipo de atividade.

Nome	Faixa de Frequência (Hz)		Coeficiente de Fourier e atraso de fase					Pessoas/m ²
			α_1	α_2	ϕ_2	α_3	ϕ_3	
Andar	Vertical	2.0	0.4	0.1	p/2	0.1	p/2	≈ 1
		2.4	0.5					
	Para frente	2.0	0.2	0.1				
	Lateral	2.0	$\alpha_{1/2} = 0.1$	$\alpha_{3/2} = 0.1$				
Correr		2.0 a 3.0	1.6	0.7		0.2		-
Pular	Normal	2.0	1.8	1.3	(*)	0.7	(*)	Ginástica ~ 0.25 (em casos extremos ~ ≤ 0.50)
		3.0	1.7	1.1	(*)	0.5	(*)	
	Alto	2.0	1.9	1.6	(*)	1.1	(*)	
		3.0	1.8	1.3	(*)	0.8	(*)	
Dançar		2.0 a 3.0	0.5	0.15		0.1		≈ 4 (em casos extremos: ≈ ≤ 6)
Bater Palmas em Pé e Pulando		1.6	0.17	0.10		0.04		Sem assento fixo ≈ 4
		2.4	0.38	0.12		0.02		(em casos extremos ≈ ≤ 6) Com assento fixo ≈ 2 a 3

Fonte: Bachmann et al. (1995).

Apesar das proposições feitas pela tabela (2), um dos problemas mais complexos envolvidos nesse tópico é a estimativa da medida real na qual os seres humanos podem sincronizar seus movimentos. Estima-se que a superposição de excitações involuntárias devidas a “*n*” indivíduos é proporcional à raiz quadrada de “*n*” e não a “*n*” (STOLOVAS, 2009).

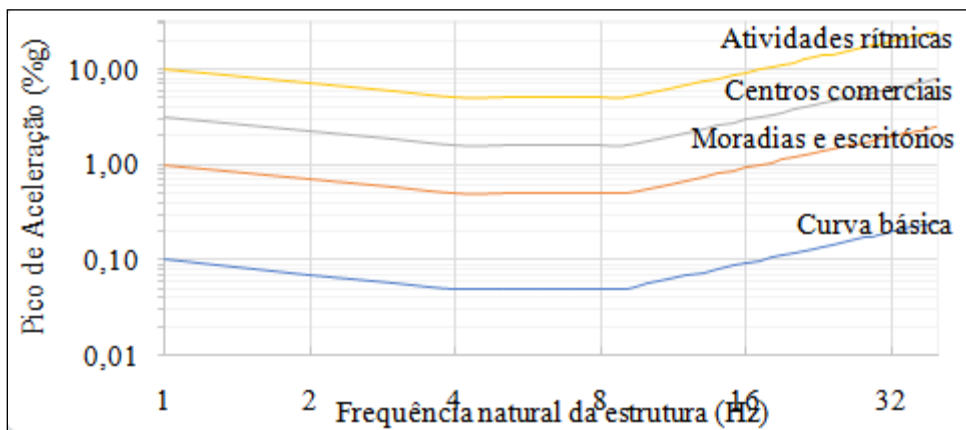
2.3 Verificações do conforto dinâmico

As normas técnicas geralmente definem a faixa de frequência com potencial de afetar o conforto humano como sendo entre 1 e 80Hz, porém entre 1 e 10Hz há uma maior tendência natural para percepção das variações das acelerações.

Como já citado anteriormente, este trabalho focou em três métodos distintos para verificação do conforto dinâmico. O primeiro deles, método da “sintonização da estrutura”, propõe valores para limitação da frequência natural estrutural em função da atividade a que será submetida. Já os demais, “verificação dos picos de aceleração vinculados a análise de Fourier” e “verificação dos picos de aceleração por Aalami (2014)”, fundamentam-se na verificação do atendimento dos limites pré-estabelecidos para os picos de aceleração dinâmica pela ISO 2631-2.

Em todos os métodos, esses limites variam em função da atividade analisada, de maneira que quanto maior a intensidade ou a probabilidade da ocorrência de sincronização de movimentos humanos, maior será o valor da frequência ou do pico de aceleração definidos como limite. Isto pode ser percebido através da análise do gráfico da figura 6, em que fica evidenciado que pavimentos destinados à prática de atividades rítmicas possuem um limite de aceleração 10 vezes maior do que o fixado para moradias e escritórios.

Figura 6 – Valores aceitáveis de aceleração pico em %g deduzidos a partir da ISO 2631-2.



Fonte: Stolovas (2009).

2.3.1 Sintonização da estrutura

Como já citado, a ABNT NBR 6118:2014 propõe o método da sintonização da estrutura como opção básica para se evitar problemas relacionados à vibração. Esse método consiste, basicamente, em afastar o máximo possível a frequência natural da estrutura das frequências dos harmônicos superiores da atividade humana analisada (Tab. 3). Para isso, a seguinte condição deve ser satisfeita: $f \geq 1,2 f_{crit}$.

Tabela 3 – Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação 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: ABNT NBR 6118:2014.

2.3.2 Verificação dos picos de aceleração vinculados à análise de Fourier

Esse método, sugerido em Bachmann et al. (1995) e em outros trabalhos consagrados, engloba todos os conceitos já apresentados, pois vincula a frequência natural da estrutura f ao coeficiente de Fourier α do harmônico considerado na análise e à amplificação dinâmica D obtida com a Equação (22). Tudo isso é multiplicado pela deformação equivalente estática causada pela carga definida como dinâmica, resultando, então, no pico de aceleração a ser considerado.

$$\frac{\alpha}{g} = \frac{4 \pi^2 f^2 y \alpha D}{g} \quad (\%) \quad (26)$$

Componentes da equação: f – Frequência natural da estrutura (Hz); y – Deformação estática equivalente ao carregamento dinâmico (m); α – Coeficiente de Fourier do harmônico considerado na análise; D – “Coeficiente de amplificação dinâmica”; g – Aceleração gravitacional (m/s^2).

Para obtenção de respostas de maior relevância estrutural, é recomendável a consideração da garantia de existência de ressonância na análise, ou seja, $\approx f$. Com isso, como se pode deduzir a partir das equações (22) e (26), a resposta dinâmica dependerá, significativamente, do grau de amortecimento ξ da estrutura.

Por fim, de posse da frequência natural da estrutura e do resultado obtido a partir da equação (26), a verificação do conforto dinâmico pode ser feita com o auxílio do gráfico da figura 6.

2.3.3 Verificação dos picos de aceleração por Aalami (2014)

Aalami (2014) sugere que, mesmo para pavimentos de concreto, a obtenção dos picos de aceleração seja feita com base na recomendação do AISC/CISC (1997), que também relaciona frequência natural, força de excitação e amortecimento, porém de forma diferente da apresentada na equação (26).

Componentes da equação: P_o – Carga dinâmica (kN); f – Frequência natural da estrutura (Hz); ξ - Taxa de amortecimento conforme tabela 1; W – Peso próprio total do trecho analisado somado à carga do revestimento (kN).

$$\frac{\alpha}{g} = \frac{P_o e^{-0,35 f}}{\xi W} \quad (\%) \quad (27)$$

As cargas dinâmicas P_o a serem adotadas são definidas pela tabela 4, excetuando-se a referente à atividade “andar”, que é obtida a partir da equação (28), em que ω corresponde a frequência de excitação.

$$P_o = 0,50\omega - 0,45 \quad (kN) \quad (28)$$

Tabela 4 – Valores de carga dinâmica por tipo de atividade.

Atividade	Frequência (Hz)	Peso dos Participantes (kN/m ²)	Fator Dinâmico	Carga Dinâmica (kN/m ²)
Dançar	1.5 a 3.0	0,531	0,50	0,266
Concertos animados ou eventos esportivos	1.5 a 3.0	1,440	0,25	0,359
Aeróbica	2.0 a 4.0	0,172	1,50	0,258

Obs.: Peso médio por pessoa: 80 kgf

Fonte: Aalami (2014).

2.4 Software dinâmico (Versão 1.1)

O *software* Dinâmico (Versão 1.1), utilizado como ferramenta para viabilização das verificações desse trabalho, foi desenvolvido pelos autores no *Microsoft Visual Studio 2017*, em linguagem de programação C# (*CSharp*). Seu algoritmo é composto por, aproximadamente, 2500 linhas de código, as quais são subdivididas em classes com escopos bem definidos, seguindo o conceito básico de programação orientada a objetos.

A validação dos resultados foi feita através de uma criteriosa comparação com os obtidos a partir de *softwares* já consagrados no mercado, como o *CAD-TQS V17* e o *ADAPT Floor Pro 2016*. As diferenças verificadas no cálculo da

Análise dos efeitos dinâmicos introduzidos por atividades humanas em lajes nervuradas unidirecionais de concreto

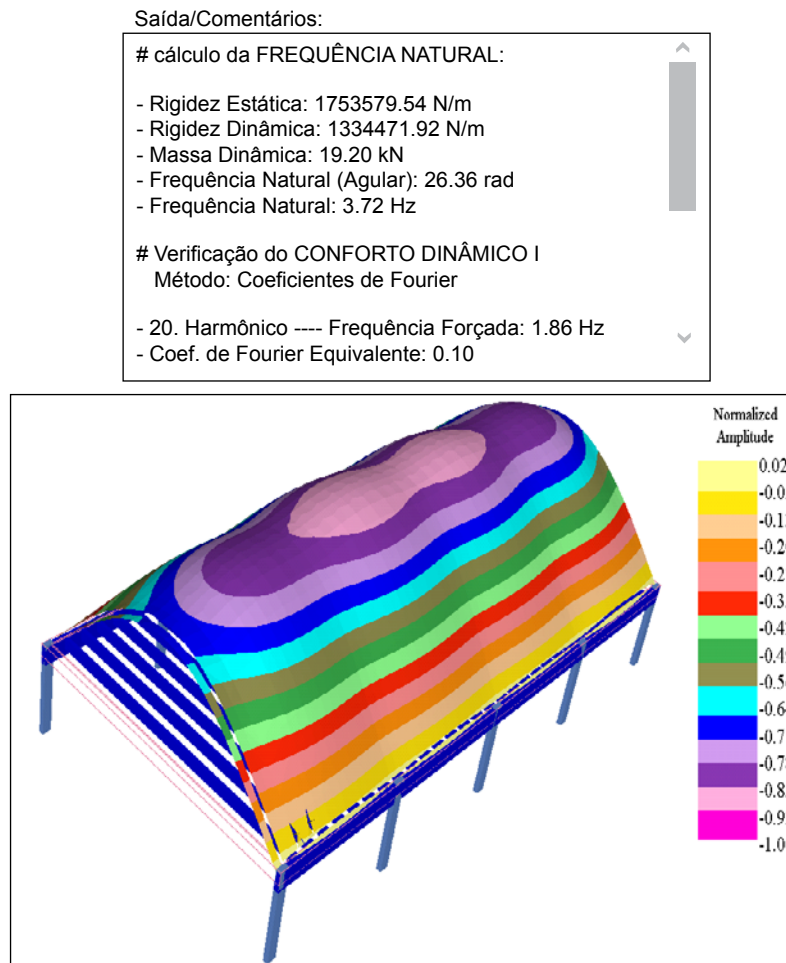
frequência natural de estruturas com dimensões usuais foram da ordem de 5 a 9%, podendo assim ser consideradas como pouco relevantes. A tabela (5) e a figura 7 apresentam uma dessas comparações.

Tabela 5 – Comparativo entre saídas de dados do Dinâmico, CAD-TQS V17 e ADAPT Floor Pro 2016.

Frequência natural (Hz)		
Dinâmico (Versão 1.1)	CAD-TQS V17	ADAPT Floor Pro 2016
3.72	3.781	4.06

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Figura 7 – Comparativo entre saídas de dados do Dinâmico, CAD-TQS V17 e ADAPT Floor Pro 2016.



Vibrations_1: Mode_1, Frequency = 4.06 Hz, T = 0.2460sec
 Z-Translation:(1 Contour = 0.068);
 Maximum Value = 1.860e-002 @ (1.223 14.029 2.800)m;
 Minimum Value = -1.000e+000 @ (10.623 7.929 2.975)m;

Modos de Vibração

Modo de Vibração	Períodos (s)	Frequência (Hz)
01	.264	3.781
02	.260	3.841
03	.252	3.961

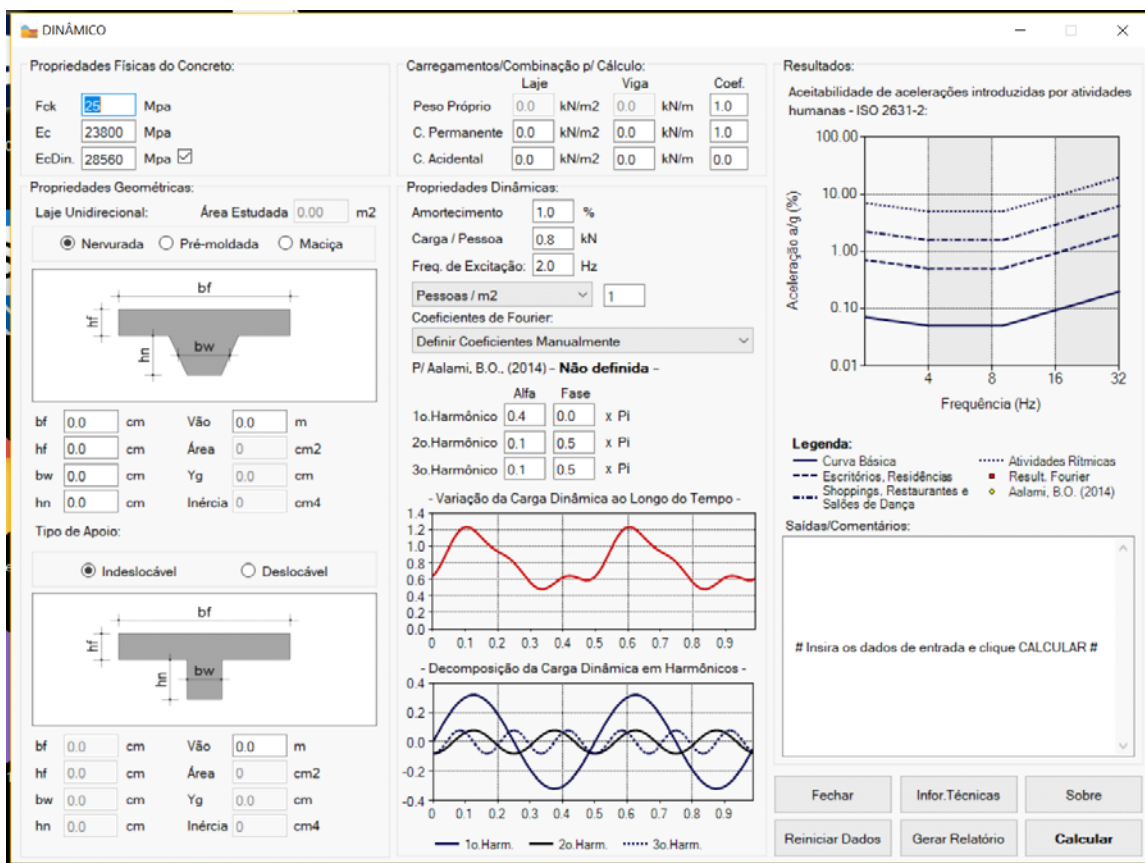
Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

A interface utilizada para entrada e saída de dados é bastante intuitiva e os cálculos obedecem, rigorosamente, os critérios expostos até aqui, inclusive possibilitando uma análise fundamentada nos três métodos já descritos (Fig. 8).

No que se refere aos carregamentos periódicos, o programa os decompõe graficamente nas três primeiras e, conseqüentemente, mais relevantes componentes harmônicas. No total, existem 16 tipos de atividades humanas pré-configuradas, além da opção de definição manual dos coeficientes de Fourier. Para garantia da análise comparativa entre os dois métodos em que se baseia a análise dos picos de aceleração, cada uma dessas atividades possui uma da tabela (4) como equivalente.

Após a entrada de dados e o processamento, os resultados são plotados no gráfico da ISO 2631-2 e textualmente na caixa “saídas/comentários”, e podem ser salvos ou utilizados como memoriais de cálculo.

Figura 8 – Interface do Software Dinâmico (Versão 1.1): Coluna esquerda: Entrada de dados referentes às propriedades físicas e geométricas da estrutura; Coluna central: Entrada de dados referentes aos carregamentos estáticos, dinâmicos, propriedades dinâmicas e gráficos das atividades; Coluna direita: Saída de dados.



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

3 Metodologia

Fazendo-se uso do *software* Dinâmico (Versão 1.1) como ferramenta, foi feita uma análise da resposta dinâmica do *layout* estrutural (genérico) de laje unidirecional apresentado na figura 9 pelos três métodos descritos neste trabalho.

O referido *layout* foi submetido a variações na seção transversal da laje, no vão, no carregamento dinâmico e na forma de apoio. Essas variações culminaram em 2268 saídas de dados, com valores de frequência e picos de aceleração, além das informações sobre aceitabilidade sensorial. Tal quantidade de dados justifica o desenvolvimento do *software* e comprova a flexibilidade e agilidade do mesmo.

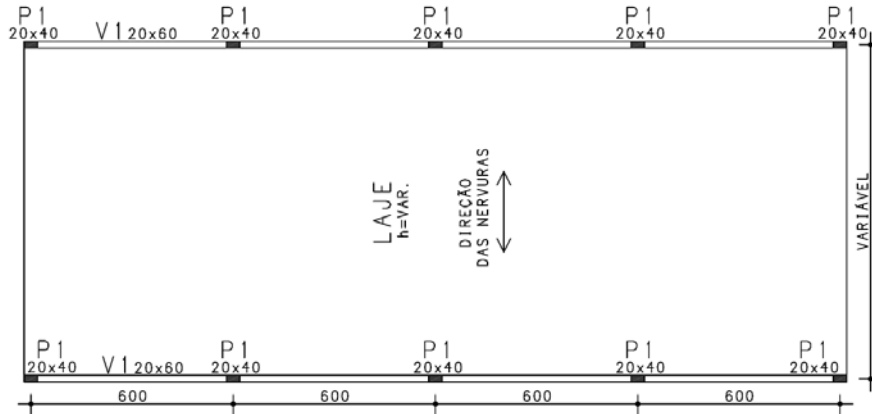
Todos esses resultados foram agrupados graficamente segundo a esbeltez para viabilizar uma análise comparativa mais eficiente, objetiva e de melhor utilização prática.

Como o método da “sintonização da estrutura” difere dos outros por não envolver a análise dos picos de aceleração e depender do valor da carga dinâmica, foi tratado de forma individualizada. Os demais serão apresentados em conjunto, possibilitando uma melhor percepção das diferenças entre eles. A divisão dos resultados por tipo de apoio, deslocável ou indeslocável, também foi adotada em todos os métodos, pois possui grande influência sobre os resultados.

Por fim, foram compostas duas tabelas que correlacionam os valores de esbeltez que garantiram o atendimento dos requisitos de aceitabilidade sensorial com cada um dos métodos e carregamentos adotados.

Os próximos subitens apresentam os critérios utilizados na escolha das propriedades físicas e geométricas, o resumo dos métodos e os carregamentos dinâmicos considerados no modelo analisado.

Figura 9 – Layout estrutural genérico utilizado nas análises dinâmicas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

3.1 Propriedades físicas e geométricas

A escolha das propriedades físicas do concreto visou ao atendimento das especificações mínimas da ABNT NBR 6118:2014 referentes à Classe de Agressividade Ambiental II para estruturas protendidas. Com isso, a resistência à compressão do concreto (F_{ck}) foi fixada em 30 Mpa e seu módulo de elasticidade dinâmico foi obtido a partir da multiplicação do módulo de elasticidade secante normativo por um fator de majoração igual a 1,20.

Como pré-requisito para escolha das seções a serem estudadas, adotou-se o atendimento às especificações da ABNT NBR 15200:2004, “Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Procedimento”, e a sua popularidade no mercado brasileiro. Convergindo para escolha das seções viabilizadas pela família de fôrmas “Caixa 80x80-Unidirecional”, do fabricante Impacto, com espessuras de lâmina de 5 e 10cm.

Observação: A existência das nervuras transversais secundárias foi desprezada.

Tabela 6 – Seções de laje nervurada a serem analisadas (Medidas em cm).

Seção genérica	Altura do molde (h)	Esp. da lâmina (hm)	Altura total (ht)	Largura da nervura			Legenda
				Inf.	Méd.	Sup.	
	20	5	25	12,5	14,0	15,4	20n5c
	20	10	30	12,5	14,0	15,4	20n10c
	25	5	30	12,5	15,3	18,0	25n5c
	25	10	35	12,5	15,3	18,0	25n10c
	30	5	35	12,5	16,2	19,9	30n5c
	30	10	40	12,5	16,2	19,9	30n10c

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Para cada uma das seções contidas na tabela (6) foram feitas 21 variações de vãos dentro da faixa de esbelteza que vai de 15 a 35. Sendo a esbelteza a grandeza adimensional definida pela razão entre o vão e a altura da laje. Também foram incluídas na análise dois tipos de apoio: indeslocável e deslocável. Para este último, considerou-se que a laje é apoiada lateralmente por vigas com 20x60cm de seção transversal e 6,0m de vão, conforme já foi apresentado na figura 9.

Por questões de otimização de espaço nas tabelas e gráficos, as identificações das seções de laje obedeceram a legenda proposta na tabela (6) acrescida de um hífen mais a inicial correspondente ao tipo de apoio. Exemplo: A legenda 20n10c-d corresponde a laje com 20cm de nervura, 10cm de capa e apoio deslocável.

3.2 Métodos de análise da resposta dinâmica

Os métodos utilizados na análise, já detalhados anteriormente, encontram-se abaixo listados com suas respectivas legendas:

- Sintonização da estrutura (SDE);
- Verificação dos picos de aceleração vinculados à análise de Fourier (VAF);
- Verificação dos picos de aceleração por Alami (2014) (VAA).

3.3 Carregamentos

Os quatro tipos de ocupação/atividades foram escolhidos e ajustados de maneira a garantir a maior correspondência possível entre os três métodos. A correlação adotada pode ser vista na tabela (7).

Tabela 7 – Tabela de correlação entre tipos de ocupação/atividades.

Legenda	SDE (Ocupação)	VAF (Atividade)	VAA (Atividade)
OA1	Escritórios	Andar na vertical - = 2,0 Hz Carga din.: 2 pessoas ⁽¹⁾⁽²⁾ /área total.	Andar Carga din.: 1 pessoa ⁽¹⁾⁽³⁾ /área total.
OA 2	Salas de dança	Dançar - = 2,5 Hz Carga din.: 4 pessoas ⁽¹⁾ /m ²	Dançar Carga din.: Conforme Tab. (4)
OA 3	Academia de ginástica	Pular alto - = 3,0 Hz Carga din.: 0,25 pessoas ⁽¹⁾ /m ²	Aeróbica Carga din.: Conforme Tab. (4)
OA 4	Sala de concerto sem cadeiras fixas	Bater palmas em pé e pulando = 2,5 Hz Carga din.: 4 pessoas ⁽¹⁾ /m ²	Concertos animados ou eventos esportivos Carga din.: Conforme Tab. (4)

⁽¹⁾ Carga/pessoa: 0,80kN;

⁽²⁾ Ocupação total estimada: 5 pessoas/área total Carga dinâmica adotada: ≈ 2 pessoas/área total;

⁽³⁾ Carga dinâmica adotada segundo recomendações de Alami (2014).

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

A “área total” citada na tabela (7) refere-se à área obtida pela multiplicação do vão L (que é variável) pela distância lateral entre pilares de apoio que, no caso em questão, foi fixada em 6,0 m (Fig. 9). Com essa premissa, o número de pessoas para OA1 passa a ser independente do vão. Desse modo, pode-se perceber que a carga dinâmica adotada para OA1 é, significativamente, inferior a proposta pela tabela (2) em ambos os métodos (VAF e VAA). Essa diferença está fundamentada na tentativa de tornar a análise mais realista, visto que a sincronização involuntária de um elevado número de pessoas é incomum.

É importante destacar que não foram considerados as cargas acidentais ou carregamentos dinâmicos no cálculo das frequências naturais, mas apenas o peso próprio da estrutura somado à esbelteza carga distribuída de 1kN/m², correspondente ao revestimento.

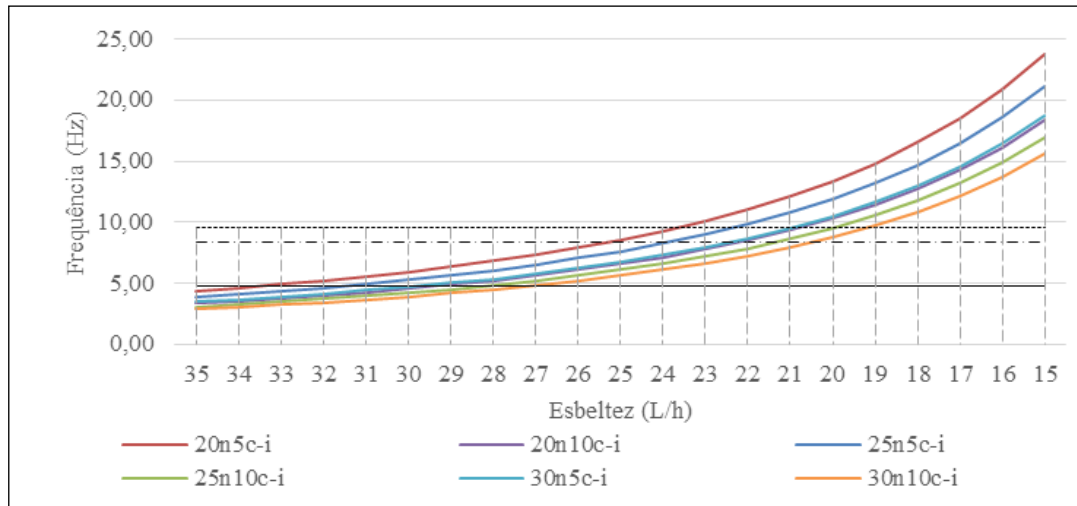
4 Resultados e discussão

4.1 Método: SDE

Como os limites de frequência estabelecidos pela ABNT NBR 6118:2014 são invariáveis e independentes da carga dinâmica, o método da SDE permite uma comparação direta do desempenho dinâmico de cada uma das seções e ocupações, ou atividades, num mesmo gráfico.

No gráfico da figura 10 observa-se que o decréscimo de esbelteza potencializa o aumento das frequências naturais da estrutura, fazendo com que um número maior de seções atenda aos limites mínimos estabelecidos por norma.

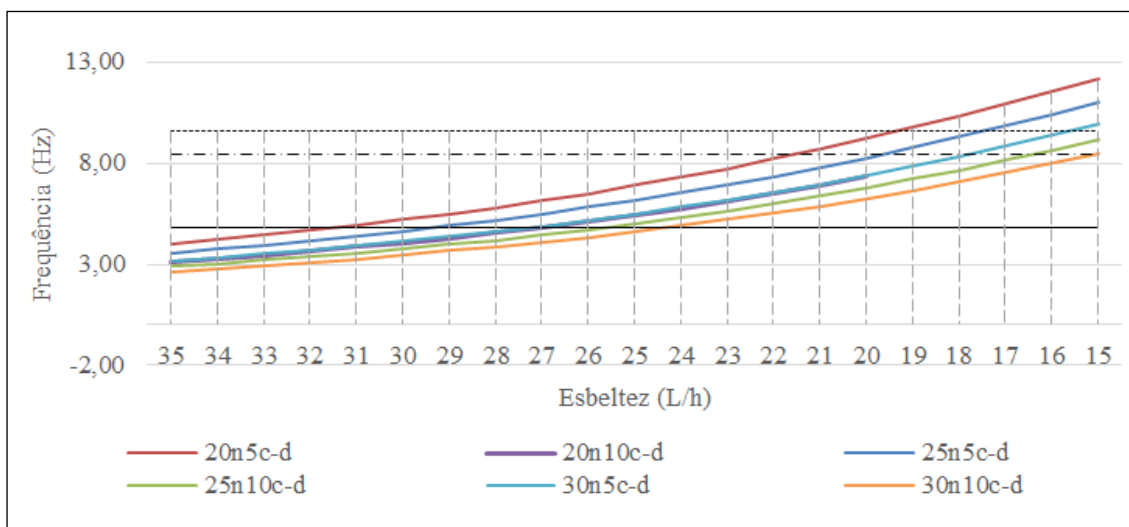
Figura 10 – Gráfico: Esbelteza x Frequência natural x Tipo de seção x Ocupação (**Apoio Indeslocável**).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Considerando agora a deslocabilidade do apoio com base na aproximação de Dunkerley, percebem-se significativas reduções na frequência natural da estrutura, principalmente para seções menos esbeltas, nas quais chegam a até 50%. Vale destacar que o maior prejuízo em direção às seções de menor esbelteza pode ser justificado pela (adotada) invariabilidade dos vãos dos apoios que, conforme pode ser visto na equação (24), são potencialmente mais influentes na frequência natural do que a massa total considerada, que reduz junto com a esbelteza. (Figura 11)

Figura 11 – Gráfico: Esbelteza x Frequência natural x Tipo de seção x Ocupação (**Apoio Deslocável**).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

4.2 Métodos: VAF e VAA

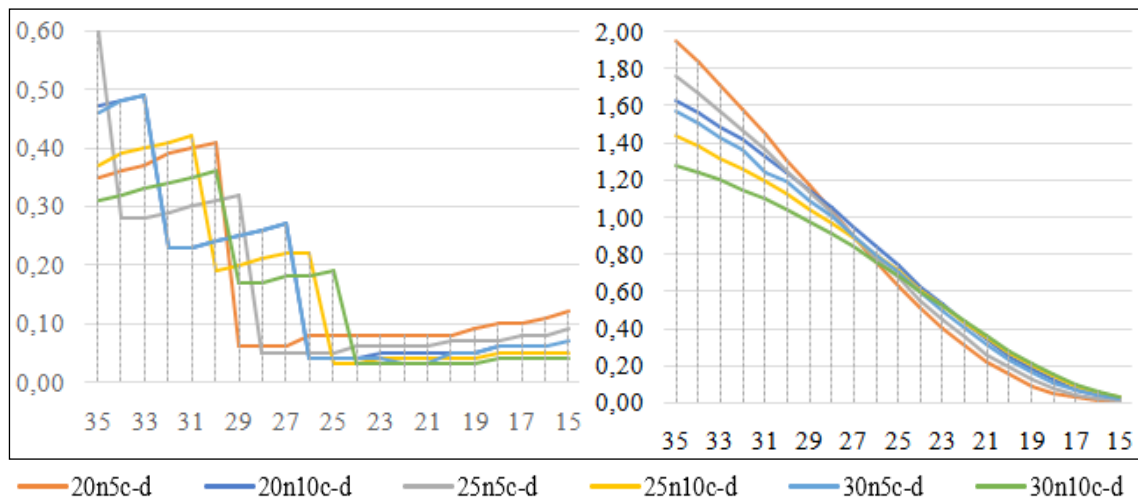
Como já citado, diferentemente do método da SDE, os métodos tratados nesse subitem não tiveram suas OA's sobrepostas nem a indicação gráfica do limite referente a aceitabilidade sensorial. Os gráficos foram subdivididos por atividade e posicionados lado a lado. Por fim, os valores médios das acelerações correspondentes a cada esbeltez foram sobrepostos por tipo de OA, possibilitando uma melhor comparação entre métodos.

4.2.1 OA1

Os gráficos à esquerda das figuras 12 e 13 mostram que a resposta dinâmica pelo método da VAF apresenta reduções bruscas dos picos de aceleração com pequenos decrementos de esbeltez. Isto evidencia a influência da variação dos coeficientes de Fourier, ou seja, quando a esbeltez garante uma frequência natural suficiente para impossibilitar a ressonância num determinado harmônico, o coeficiente do seguinte, de menor relevância, passa a ser adotado na análise e a frequência de excitação também é ajustada para garantir a ressonância quando for multiplicada pelo inteiro equivalente ao harmônico vigente. Obviamente, num problema real, deve-se prever uma margem de segurança nessa análise.

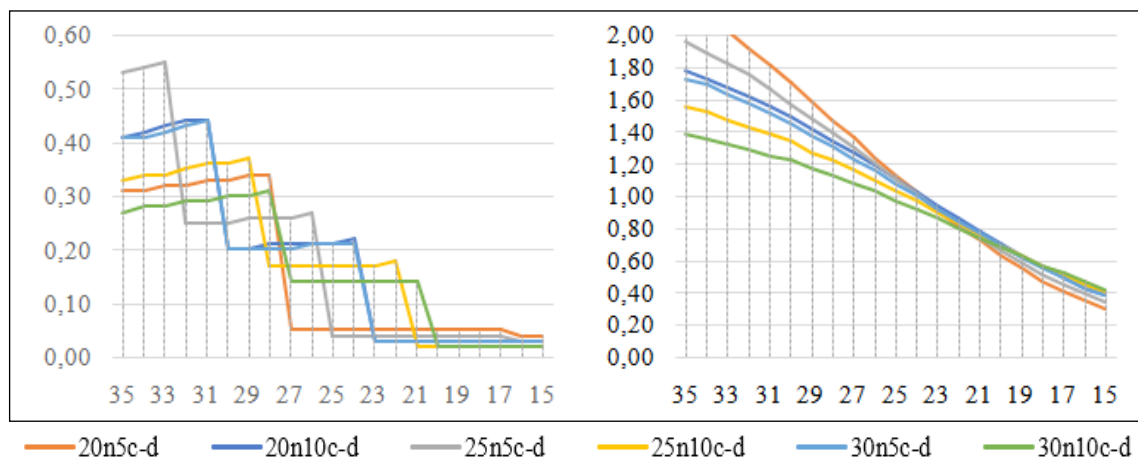
Os gráficos à direita, representantes da VAA, apresentam um comportamento mais linear, porém, como já era de se esperar, também seguem uma tendência de queda do pico de aceleração à medida que a esbeltez é reduzida.

Figura 12 – Gráfico: OA1: Esbeltez x Pico de Aceleração (%g) – VAF (dir.) e VAA (esq.) - (A. Indeslocável).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Figura 13 – Gráfico: OA1: Esbeltez x Pico de Aceleração (%g) – VAF (dir.) e VAA (esq.) - (A. Deslocável).

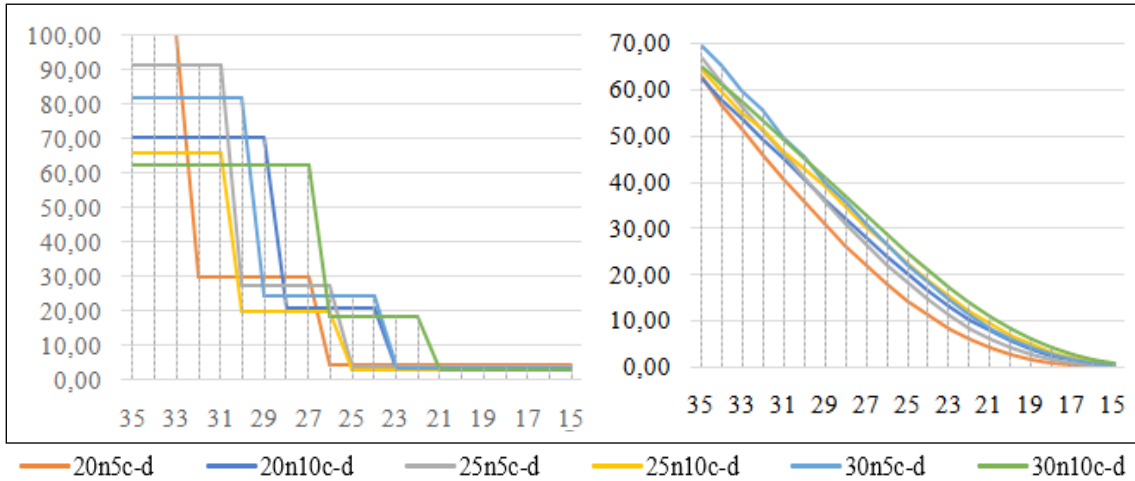


Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

4.2.2 OA2

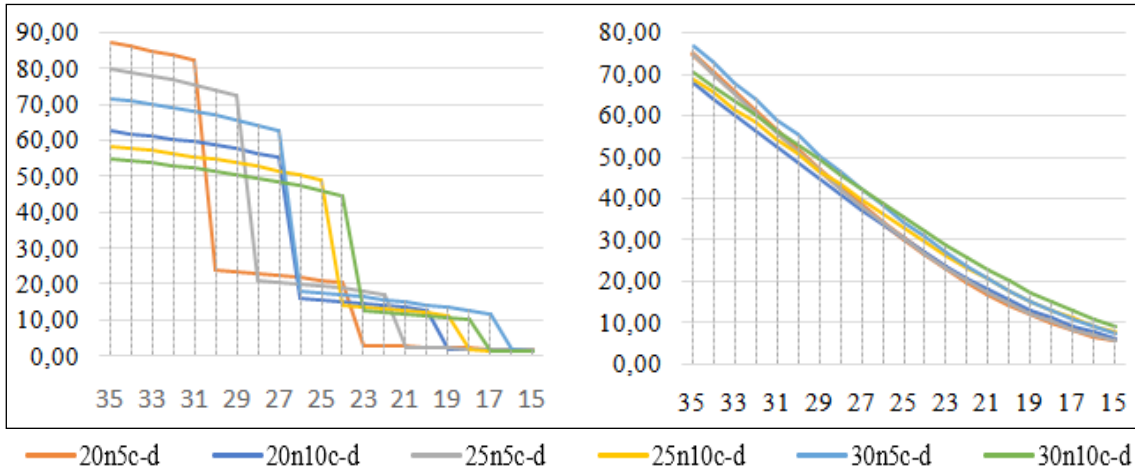
As respostas dinâmicas para a OA2 são similares à OA1, porém, nesse caso, verifica-se uma maior proximidade dos valores dos picos de aceleração obtidos pelos dois métodos. Outro ponto que chama a atenção é a pouca variabilidade da resposta dinâmica entre os diversos tipos de seções analisados por VAA. (Figuras 14 e 15).

Figura 14 – Gráfico: OA2: Esbeltez x Pico de Aceleração (%g) – VAF (dir.) e VAA (esq.) - (A. Indeslocável).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Figura 15 – Gráfico: OA2: Esbeltez x Pico de Aceleração (%g) – VAF (dir.) e VAA (esq.) - (A. Deslocável).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).4.2.3 OA3

A análise dos gráficos referentes à VAF, localizados à esquerda das figuras 16 e 17, deixa evidente a grande diferença entre os picos de aceleração do primeiro e segundo harmônico da OA em questão. Assim como em OA1 e OA2 esse “abismo” pode ser atribuído à variação do coeficiente de Fourier atrelada ao fato do Dinâmico (Versão 1.1) sempre buscar a ressonância entre a frequência de excitação e a frequência natural da estrutura.

Outro ponto que chama a atenção é a similaridade entre as respostas dinâmicas de OA2 e OA3 quando analisadas por VAA. Isto pode ser atribuído a diferença entre valores sugeridos para a carga dinâmica dessas duas atividades, que não chega a 3%, conforme pode ser visto na tabela (4).

Figura 16 – Gráfico: OA3: Esbeltez x Pico de Aceleração (%g) – VAF (dir.) e VAA (esq.) - (A. Indeslocável).

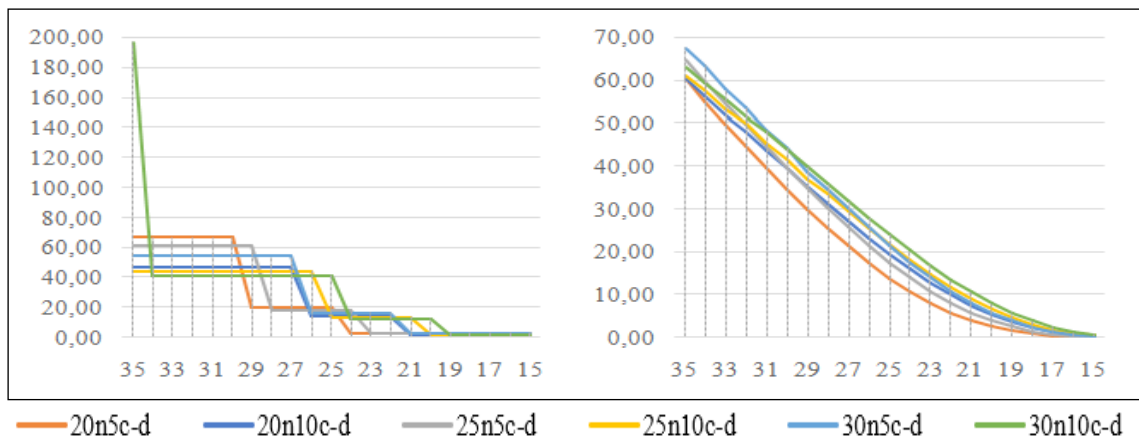
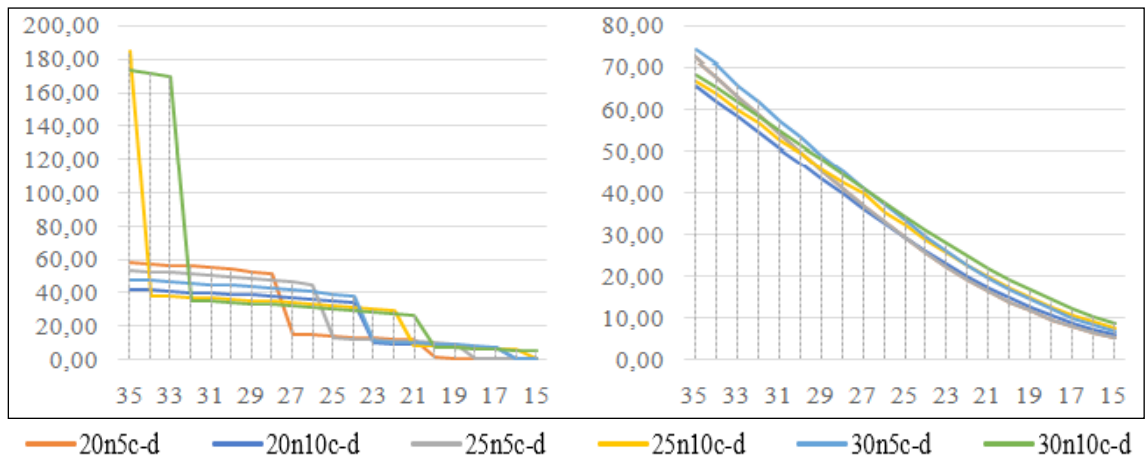


Figura 17 – Gráfico: OA3: Esbeltez x Pico de Aceleração (%g) – VAF (dir.) e VAA (esq.) - (A. Deslocável).



4.2.4 OA4

Dentre todas as análises apresentadas, essa pode ser considerada a com menor grau de correlação direta entre os dois métodos em questão, pois, como pode ser visto na tabela (7), enquanto um refere-se diretamente à descrição de um tipo de atividade humana (“bater palmas em pé e pulando”) o outro descreve um tipo de evento bastante genérico (“concertos animados ou eventos esportivos”), atribuindo assim uma grande subjetividade à comparação. Apesar disso, considerando-se os resultados listados anteriormente, pode-se dizer que as ordens de grandeza dos valores dos picos de aceleração apresentam uma boa aproximação.

Assim como em OA2 e OA3, também foi verificada uma grande similaridade entre as respostas dinâmicas das seções avaliadas por VAA. (Figuras 18 e 19).

Figura 18 – Gráfico: OA4: Esbeltez x Pico de Aceleração (%g) – VAF (dir.) e VAA (esq.) - (A. Indeslocável).

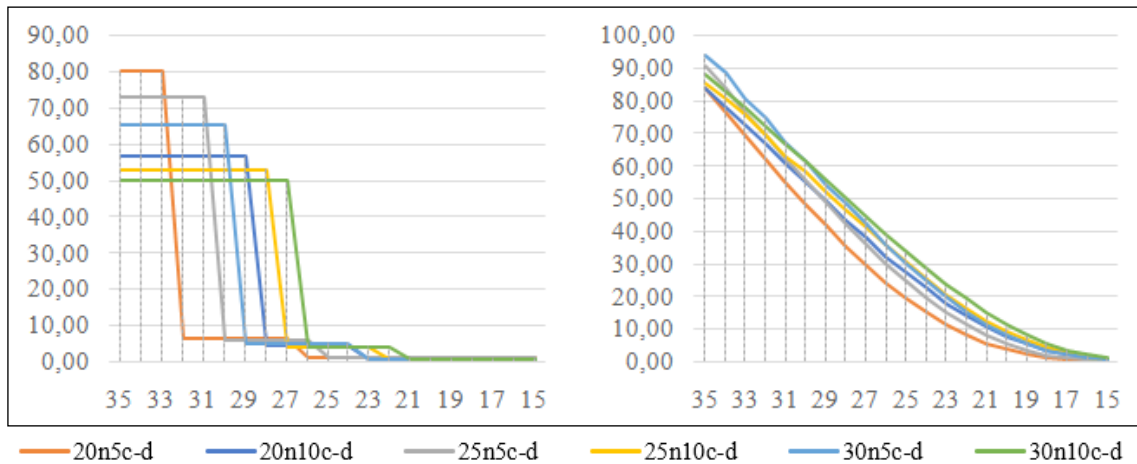
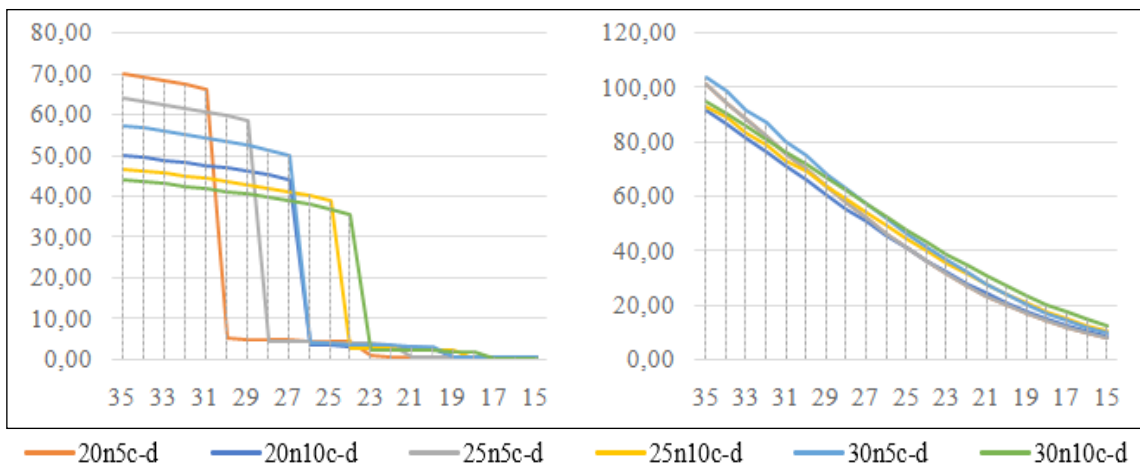


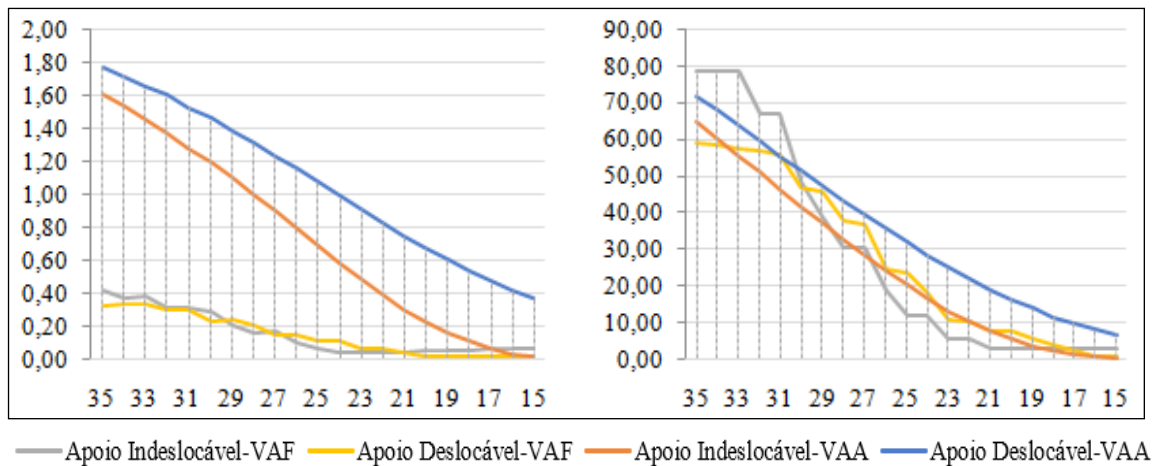
Figura 19 – Gráfico: OA1: Esbeltez x Pico de Aceleração (%g) – VAF (dir.) e VAA (esq.) - (A. Deslocável).



4.2.4 Comparativo entre médias

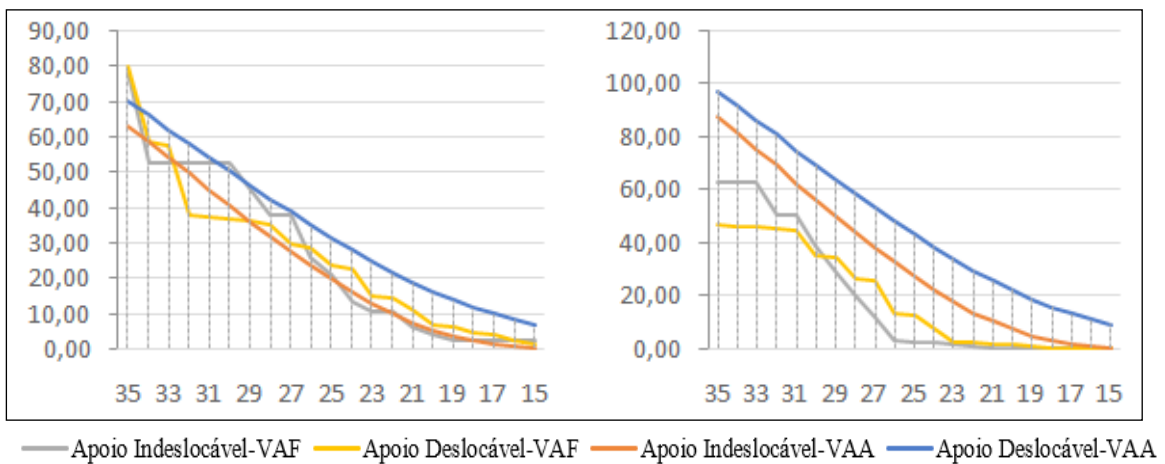
As figuras 20 e 21 apresentam os gráficos comparativos entre as médias dos picos de aceleração das seções obtidos em cada um dos métodos e tipos de apoio. Essa forma de agrupamento evidenciou as diferenças entre métodos e os efeitos da deslocabilidade dos apoios sobre a resposta dinâmica da estrutura.

Figura 20 – Gráfico: Média das seções: Esbeltez x Pico de Aceleração (%g) – AO1 (dir.) e AO2 (esq.).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Figura 21 – Gráfico: Média das seções: Esbeltez x Pico de Aceleração (%g) – AO3 (dir.) e AO4 (esq.).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Nas quatro atividades analisadas por VAA, houve incremento dos picos de aceleração em virtude da redução da frequência natural da estrutura oriunda da flexibilização dos apoios, porém essa linearidade de resultados não se verifica em VAF, o que também pode ser justificado pelos ajustes da frequência de excitação necessários para garantia da ressonância.

A análise dos gráficos também ressalta a similaridade entre os resultados obtidos para OA2 e OA3. Já para as demais, ficaram evidenciadas relevantes diferenças, principalmente na OA1. Entretanto, como se pode perceber através das composições feitas na tabela (7), esse evento coincide com os itens cuja correspondência é dotada de maior subjetividade.

4.3 Verificação da aceitabilidade sensorial e comparativo geral

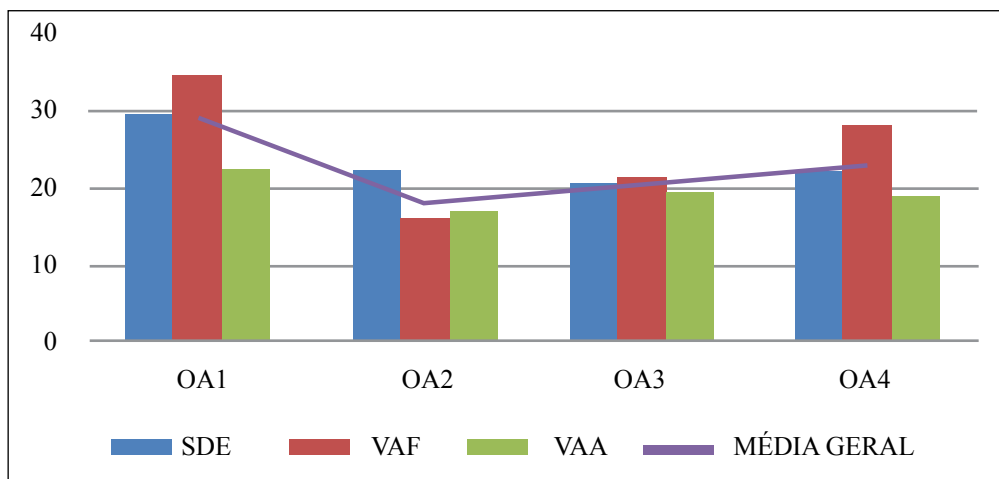
As tabelas (8) e (9) e seus respectivos gráficos equivalentes, figuras 22 e 23, apresentam a listagem dos valores de esbeltez que atendem aos requisitos de aceitabilidade sensorial para cada um dos métodos, OA's e seções, diferenciando-se apenas pelo tipo de apoio.

Tabela 8 – Aceitabilidade sensorial: Método x Seção x OA x Esbeltez (**A. Indeslocável**).

SEÇÃO DE LAJE	SDE				VAF				VAA			
	OA1	OA 2	OA3	OA4	OA1	OA2	OA3	OA4	OA1	OA2	OA3	OA4
20n5c-i	33	25	23	25	35	16	24	26	24	20	22	21
20n10c-i	29	22	20	22	35	17	20	30	19	13	17	16
25n5c-i	31	23	22	23	34	16	23	30	24	19	21	20
25n10c-i	28	21	19	21	35	17	20	27	23	17	19	19
30n5c-i	29	22	20	22	35	15	21	29	23	18	20	19
30n10c-i	27	20	19	20	35	16	19	26	23	16	19	18
MÉDIA GERAL	30	22	21	22	35	16	21	28	23	17	20	19

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Figura 22 – Gráfico: Método x Seção x OA x Esbeltez (**Apoio Indeslocável**).



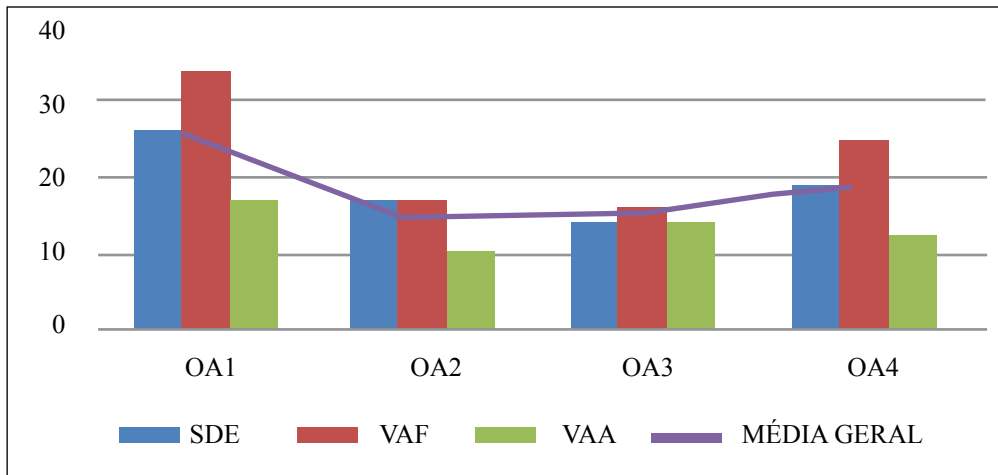
Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Tabela 9 – Aceitabilidade sensorial: Método x Seção x OA x Esbeltez (**Apoio Deslocável**).

TIPO DE LAJE	SDE				VAF				VAA			
	OA1	OA2	OA3	OA4	OA1	OA2	OA3	OA4	OA1	OA2	OA3	OA4
20n5c-d	31	21	19	21	35	17	20	30	19	13	17	16
20n10c-d	27	17	15	28	35	19	16	26	17	10	15	13
25n5c-d	29	19	17	19	35	17	18	28	18	11	15	14
25n10c-d	25	16	14	16	35	18	15	24	17	13	14	12
30n5c-d	27	17	15	17	35	16	16	26	17	10	14	13
30n10c-d	24	15	12	15	35	17	14	20	16	8	11	11
MÉDIA GERAL	27	18	15	19	35	17	17	26	17	11	14	13

Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Figura 23 – Gráfico: Método x Seção x OA x Esbeltez (Apoio Deslocável).



Fonte: Elaborado pelos autores (2017).

Observação: Os números indicados em vermelho correspondem aos valores de esbeltez que ficaram fora do intervalo delimitado no item “Metodologia”, mas mesmo assim foram incluídos para se evitar lacunas nas tabelas.

A partir desse agrupamento de dados, pode-se perceber uma grande proximidade entre a linha que representa a “média geral” e o topo da coluna azul, correspondente ao método SDE. Essa última constatação independe do tipo de carga dinâmica ou configuração de apoio.

Outro ponto que chama a atenção é a reduzida esbeltez requerida para o atendimento do conforto dinâmico em pavimentos sujeitos a eventos com maior tendência a ocorrência de sincronização dos movimentos humanos, principalmente no método VAA, que apresentou resultados mais conservadores no geral.

5 Conclusão

Após esse extenso estudo, concluiu-se que a análise dinâmica pode vir a ser determinante no dimensionamento de lajes unidirecionais de concreto, principalmente para elementos com esbeltez próxima a 30, ou submetidos a carregamentos dinâmicos gerados pela sincronização de movimentos humanos de grande intensidade ou densidade ocupacional. Também ficou evidenciada a influência da rigidez do apoio no resultado da análise, mostrando que o estudo individualizado da laje não é suficiente para a garantia do atendimento do Estado-limite de vibrações excessivas. Pode-se supor também que um tratamento bidirecional das nervuras pode vir a ser economicamente mais vantajoso para os casos nos quais esse estudo conduziu a menores valores de esbeltez.

Os resultados encontrados com base nos três métodos possuem aproximações aceitáveis, porém fica evidenciada a proximidade do valor obtido através do método da sintonização da estrutura, proposto pela ABNT NBR 6118:2014, e a média geral obtida entre todos os métodos, mostrando que o simples controle da frequência natural da estrutural já pode conduzir a resultados bastante satisfatórios. Entretanto, em casos específicos, em que há um conhecimento mais detalhado sobre as particularidades do carregamento dinâmico, a verificação dos picos de aceleração baseada na análise de Fourier pode dar mais especificidade ao estudo, viabilizando elevações no valor da esbeltez.

Mesmo se destacando como a análise mais conservadora, a verificação dos picos de aceleração por Aalami (2014) também se mostra uma opção viável, principalmente pela clareza e linearidade dos resultados, o que colabora bastante para mensuração mais rápida do incremento de seção necessário para atingir o conforto dinâmico.

Vale ressaltar ainda que os parâmetros arbitrados nesse trabalho como invariáveis, como a taxa de amortecimento e frequências de excitação, por exemplo, podem influenciar decisivamente nos resultados, especialmente nos métodos vinculados à análise dos picos de aceleração.

O *software* Dinâmico (Versão 1.1) mostrou-se uma ferramenta simples, prática e bastante ágil, suprimindo todas as necessidades requeridas pelo estudo.

Por fim, é importante destacar que o não atendimento ou consideração dos requisitos dinâmicos pode não comprometer a funcionalidade estrutural, visto que a intensidade dos efeitos da ressonância está intimamente ligada a características de difícil mensuração prática. Entretanto, estudos fundamentados nos métodos aqui apresentados reduzem, significativamente, a probabilidade da ocorrência de vibrações desagradáveis aos usuários.

A título de sugestão, futuros trabalhos poderão traçar um comparativo entre as repostas dinâmicas de seções transversais usuais de lajes bidirecionais de concreto armado submetidas a atividades humanas ou avaliar a influência da variação do posicionamento das cargas dinâmicas ao longo do pavimento.

Referências

- AALAMI, Bijan O. **Vibration design of concrete floors**. Redwood City: ADAPT Corporation, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012.
- BACHMANN, Hugo et al. **Vibration problems in structures: practical guidelines**. Basel: Birkhäuser, 1995.
- BRASIL, R. M. L. R. F et al. **Introdução a dinâmica das estruturas para engenharia civil**. São Paulo: Blucher, 2013.
- CLOUGH, Ray W.; PENZIEN, Joseph. **Dynamics of structures**. Berkeley: Computers & Structures, 2003.
- MAST, Robert F. Vibration of precast prestressed concrete floors. **PCI Jornal**, Washington, nov/dec., 2001, p.76-86.
- MURRAY, Thomas M.; ALLEN, David E.; UNGAR, Eric E. **Floor vibrations: due to human activity**. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2003.
- SAADE, Joel. **C#**: Guia do programador. São Paulo: Novatec, 2010.
- STOLOVAS, Sergio. **Dinâmica aplicada em estruturas de concreto armado**. São Paulo: Curso TQS Informática, 2007.

Sobre os autores

Mario Esmeraldo dos Santos

Engenheiro Civil, Universidade Federal do Ceará – UFC. Pós-graduando em Estrutura de Concreto nas Edificações, Universidade de Fortaleza - Unifor.

Eduardo César Cordeiro Leite

Engenheiro Civil, Universidade de Fortaleza – Unifor. Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC. Especialista em Análise de Sistemas, Universidade de Fortaleza – Unifor. Doutor em Estruturas, Universidade de Stuttgart - Alemanha. Professor Adjunto 1 da Universidade de Fortaleza - Unifor.

Recebido em: 23/03/2018

Avaliado em: 05/04/2018

Aceito em: 10/04/2018