



ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO E AVALIAÇÃO DE CONFORTO HUMANO DE PISOS DE CONCRETO ARMADO DE EDIFICAÇÕES SUBMETIDAS A AÇÕES HUMANAS RÍTMICAS

Deyvson Souza Rocha

deyvsonsr14@gmail.com

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/FEN/UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

José Guilherme Santos da Silva

Rodrigo Bird Burgos

jgss@uerj.br

rburgos@eng.uerj.br

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo. Esta investigação objetiva o estudo da resposta dinâmica de pisos de concreto armado, sob o ponto de vista de conforto humano. O modelo estrutural analisado consiste em um piso de concreto armado destinado a uma academia de ginástica e submetido à prática de atividades aeróbicas. O piso é composto por três vãos de 9m, em planta, na direção vertical, dois vãos de 6m e um de 8m, respectivamente, em planta, na direção horizontal, perfazendo uma área total de 540m². Considera-se, também, a influência da rigidez dos pilares que apresentam altura de 4m ($H=4,0m$). Com referência à modelagem numérica, são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do emprego do programa computacional ANSYS. A modelagem teórica do carregamento dinâmico foi realizada com base em formulações matemáticas distintas, de acordo com trabalhos de pesquisa desenvolvidos sobre o tema. Para a avaliação dos resultados, os valores das acelerações foram obtidos de três formas distintas: em função dos valores de pico (valores máximos), em valor quadrático médio (RMS) e considerando-se os valores de dose de vibração (VDV). Os resultados obtidos mostraram que os limites recomendados foram ultrapassados em diversas situações de projeto, mostrando que as atividades humanas rítmicas podem ocasionar prejuízo ao conforto humano dos usuários de pisos de edificações.

Palavras-chave: Pisos de concreto armado, Análise dinâmica de estruturas, Atividades humanas rítmicas.

1 INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos e desenvolvimento de novas técnicas construtivas e softwares estruturais, que garantem maior precisão no dimensionamento e melhor compreensão da forma de trabalho das estruturas, há a tendência dos engenheiros estruturais a modelar estruturas com seções transversais mais esbeltas e com maiores vãos, inclusive de forma a atender as construtoras que exigem o máximo aproveitamento dos materiais gerando a maior economia possível.

O engenheiro civil deve possuir conhecimento sobre a finalidade da estrutura dimensionada, e a natureza do carregamento atuante, de forma que possa caracterizar o carregamento como estático ou dinâmico.

O carregamento é considerado estático quando é aplicado gradativamente e sem grandes variações de intensidade ao longo do tempo, podendo ser considerado em cada instante como estático e sendo possível conhecer os deslocamentos da estrutura e seus respectivos esforços internos. A partir do conhecimento da rigidez da estrutura e suas condições de apoio, podemos obter os resultados desejados através das equações conhecidas da resistência dos materiais.

O carregamento dinâmico varia rapidamente ao longo do tempo provocando movimentos bruscos na estrutura, tirando-a de seu equilíbrio puramente estático, ocasionado em algumas estruturas um comportamento não linear. Quando uma estrutura está submetida a deslocamentos que variam com o tempo, estão associados a ela velocidades e acelerações, a estrutura vibra e este comportamento pode gerar desconforto para os ocupantes do ambiente.

A engenharia civil tem procurado obter um controle efetivo da vibração em pisos de concreto armado de forma a garantir o conforto dos usuários destas estruturas. As vibrações podem ser provenientes de equipamentos eletrônicos, ou diretamente pelo movimento humano, tais como dançar, caminhar, correr, saltar, entre outras atividades.

O não atendimento dos critérios da NBR 6118 (2014), no que tange os estados limites de serviço, pode ocasionar graves problemas de vibração excessiva e, em casos mais graves, o colapso da estrutura.

Os estados limites de serviço estão relacionados à durabilidade, aparência e conforto dos usuários. A presença de fissuras, grandes flechas nas vigas e lajes e vibrações excessivas são possíveis problemas que devem ser verificados. Em muitos casos torna-se necessário o redimensionamento da estrutura de modo a atender estes critérios.

A resposta dinâmica dos pisos contempla uma análise crítica acerca dos valores das acelerações, sendo os resultados obtidos confrontados e comparados com os limites propostos por recomendações normativas, sob o ponto de vista do conforto humano de acordo com a atividade fim da estrutura.

Assim sendo, este trabalho de pesquisa tem como objetivo estudar o comportamento dinâmico de um piso de concreto armado de uma academia de ginástica com salas de dança quando submetido a excitações dinâmicas oriundas de atividades humanas rítmicas. Essas atividades rítmicas são modeladas através de formulações desenvolvidas por diversos autores, de modo que represente a ação dos indivíduos atuando sobre a estrutura.

2 MODELOS PROPOSTOS DE ATIVIDADES HUMANAS RÍTMICAS

Esta pesquisa tem como foco o estudo de atividades aeróbicas praticadas sobre pisos, como ocorre comumente em academias de ginástica. Sendo assim, este capítulo se destina a apresentar os carregamentos utilizados para simular as ações dinâmicas humanas rítmicas e, posteriormente, detalhar as funções matemáticas definidas por diversos autores para a representação da atividade aeróbica.

2.1 Disposição do carregamento

O carregamento foi disposto sobre a estrutura de três maneiras distintas de modo a representar a prática da atividade, sempre respeitando o valor de $0,20 \text{ kN/m}^2$ preconizado por alguns guias, como o AISC (2016), para atividade aeróbica.

A Fig. 1 apresenta o piso descrevendo a finalidade a qual cada parte deste foi projetada. O primeiro arranjo de carregamento é ilustrado na Fig. 2, e representa a situação de uso comum do piso segundo o projeto, com um total de 26 pessoas praticando a atividade. Destaca-se a presença de dois indivíduos a frente dos demais com o intuito de simular os instrutores da prática.

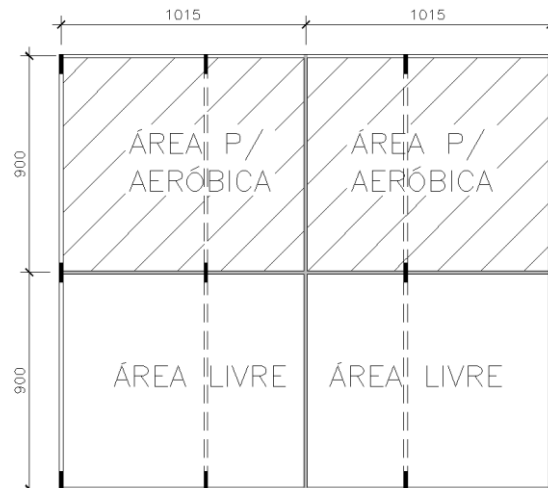


Figura 1. Áreas de uso para cada segmento do piso.

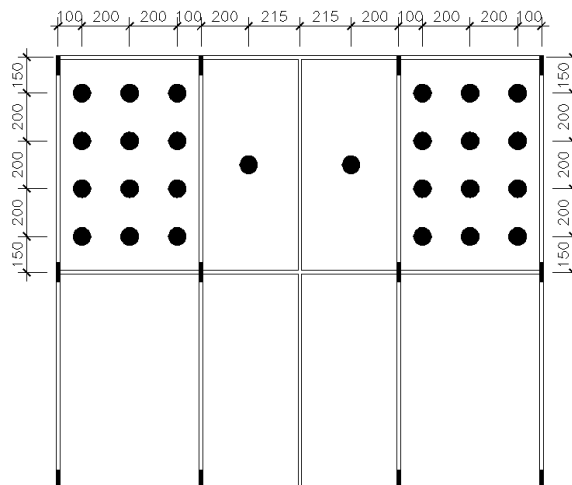


Figura 2. 1º arranjo com 26 pessoas praticando a atividade aeróbica.

O segundo arranjo representa uma alternativa para a distribuição das pessoas sobre o piso, readequando o projeto e utilizando-se de outra área para a prática de dança aeróbica. Também foi proposto um aumento considerável no número dos praticantes da atividade, de forma a analisar uma excepcionalidade no uso da estrutura. A Fig. 3 ilustra o segundo arranjo, onde mais da metade do piso será utilizada por um total de 42 pessoas realizando a atividade.

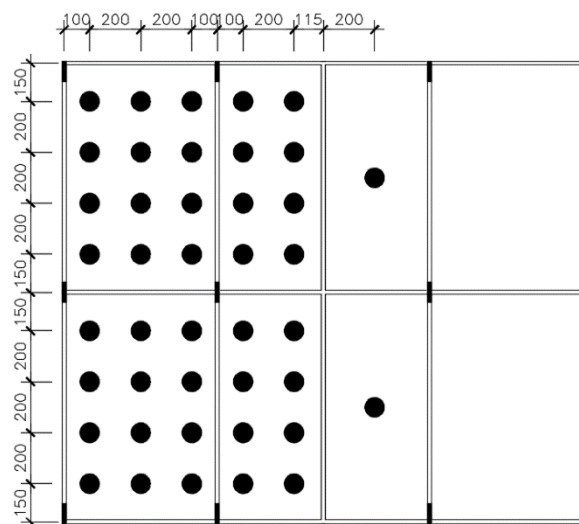


Figura 3. 2º arranjo com 42 pessoas praticando a atividade aeróbica.

Para o terceiro arranjo foi proposto manter as áreas onde será realizada a atividade, porém considerando-se ainda a excepcionalidade do aumento no número de participantes e o uso de mais da metade do piso. A Fig. 4 apresenta a distribuição dos indivíduos desta alternativa, com 43 pessoas praticando a atividade. Nota-se, ainda, a inclusão de mais um indivíduo destacado dos demais, contabilizando um total de 3 instrutores para esta alternativa.

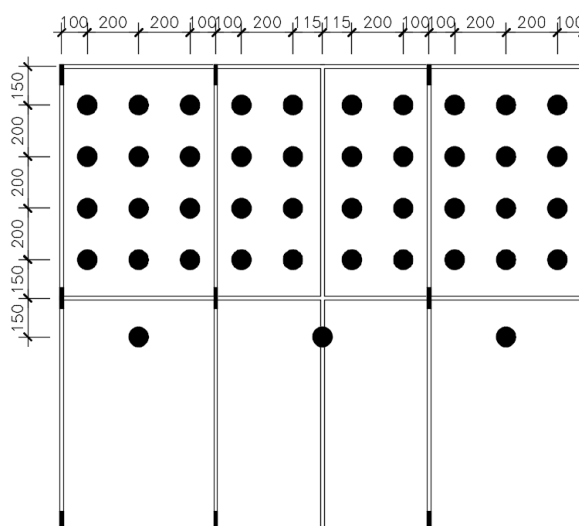


Figura 4. 3º arranjo com 43 pessoas praticando a atividade aeróbica.

2.2 Modelo de carregamento proposto pelo guia do AISC (2016)

Esta formulação de carregamento objetiva representar a prática da atividade aeróbica realizada por grupos em academias de ginástica, de forma a possibilitar a sua aplicação nos modelos em elementos finitos.

O manual do AISC (2016) propõe a representação da atividade humana através do uso de uma série de Fourier, que consiste no somatório das parcelas de força correspondentes de cada harmônico do carregamento rítmico. A Eq. (1) apresenta o modelo proposto pelo AISC (2016) para a representação do carregamento.

$$P(t) = \sum_{i=1}^N w_p \alpha_i \sin(2\pi i f_{\text{step}} t - \phi_i) \quad (1)$$

Onde a variável $P(t)$ corresponde à força representativa da atividade humana ao longo do tempo em (N/m^2), w_p representa o peso dos praticantes da atividade por unidade de área em (N/m^2), i é o múltiplo harmônico da frequência do passo, a variável α_i representa o coeficiente de Fourier associado ao i -ésimo harmônico da atividade, f_p corresponde a frequência do passo da atividade na unidade de (rad/s), t é o tempo em (s) e ϕ_i é o ângulo de fase da função em (rad).

Para o uso da função de carregamento do AISC (2016) foi considerada uma frequência de passo igual a 2,27 Hz afim de que o terceiro harmônico da excitação coincida com a frequência fundamental do piso. Foi adotada também uma força vertical de 800 N e um valor de 0,002 s para o passo da função. A Tabela 1 apresenta os valores do coeficiente dinâmico da componente de força para cada harmônico utilizado na função de carregamento. A Fig. 5 apresenta o gráfico da função de carregamento do AISC (2016) em função do tempo.

Tabela 1. Coeficiente dinâmico da componente de força para cada harmônico.

i	α_i
1	1,5
2	0,6
3	0,1

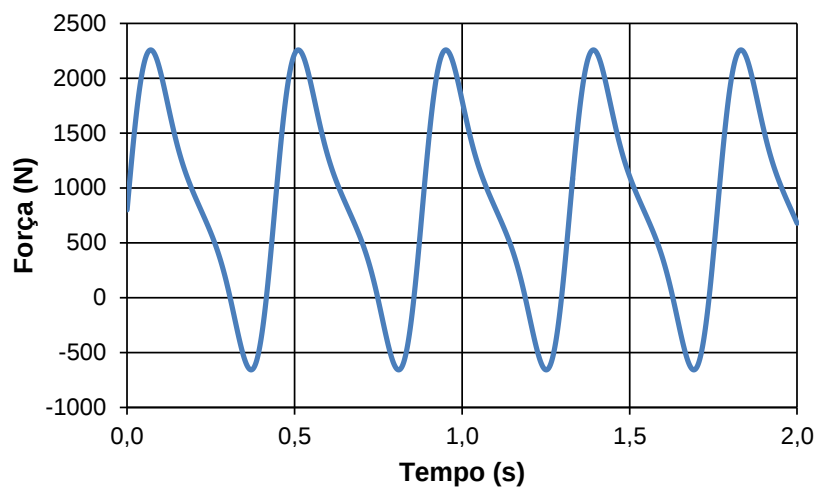


Figura 5. Função de carregamento do AISC (2016).

2.3 Modelo de carregamento proposto por Faisca (2003)

Com base em resultados experimentais realizados por Faisca (2003), este concluiu que a função que melhor se adapta as ações dinâmicas oriundas de atividades de ginástica aeróbica e saltos à vontade é a chamada função Hanning.

A representação matemática deste tipo de carregamento dinâmico por meio da função Hanning é dada pela Eq. (2). Em seguida, a Fig. 6 facilita o entendimento da função matemática adotada, pois esta ilustra os dois intervalos de tempo significativos da referida função.

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

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

Onde:

- $F(t)$: representação matemática do carregamento no tempo em (N);
- CD : coeficiente de defasagem;
- K_p : coeficiente de impacto;
- P : peso da pessoa em (N);
- T : período da atividade em (s);
- T_c : período de contacto da atividade em (s);
- t : tempo em (s).

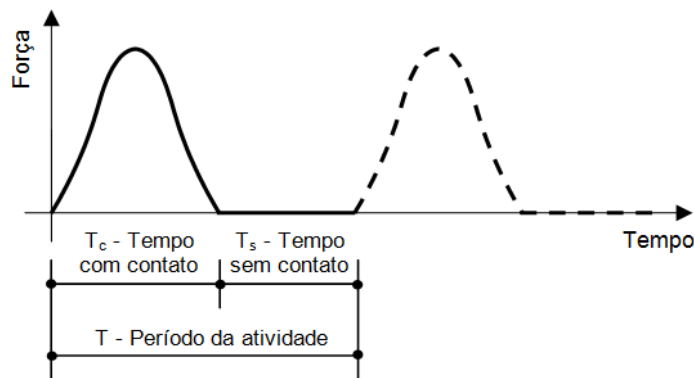


Figura 6. Intervalos de tempo da função adotada por Faisca (2003).

Destaca-se que o parâmetro CD é um coeficiente de ponderação das ações dinâmicas definidas em função da atividade realizada e do número de pessoas que atuam sobre a estrutura. Este coeficiente leva em conta os efeitos de multidão, ou seja, o grau de sincronismo entre as pessoas que atuam sobre a estrutura. Deste modo, a definição deste parâmetro considera possíveis defasagens e variações de ritmo que levariam a redução da intensidade do carregamento.

A Fig. 7 representa o gráfico do coeficiente de defasagem (CD), para três atividades estudadas por Faisca (2003), extrapoladas para um grande número de pessoas. Isso permite que as cargas possam ser usadas para representar multidões.

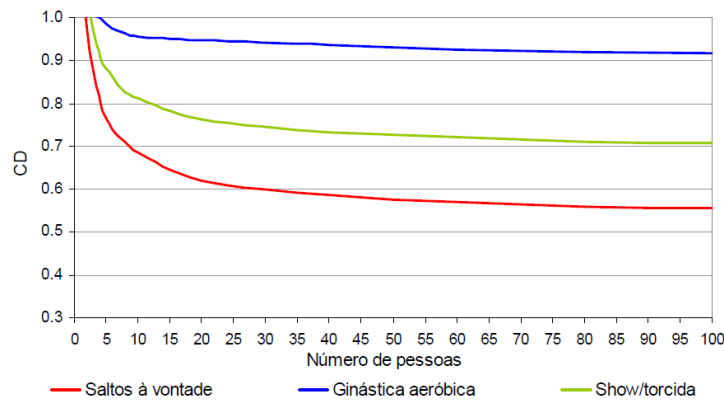


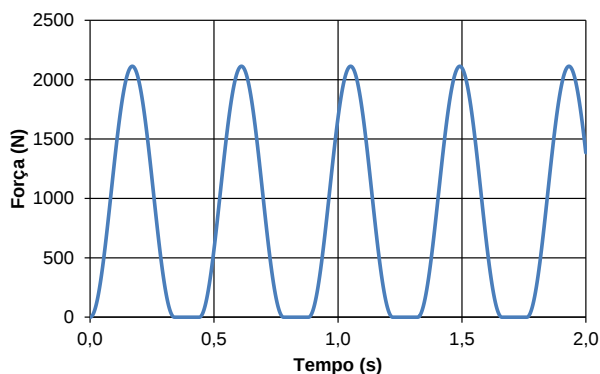
Figura 7. Coeficiente de defasagem (CD) das atividades estudadas por Faisca (2003).

Na Tabela 2 são apresentados os valores dados por Faisca (2003) para as médias e desvios-padrão dos parâmetros T , T_c e K_p para representar as atividades de salto à vontade, ginástica aeróbica e torcida. É importante notar que Faisca (2003) investigou a influência da flexibilidade da estrutura sobre esses parâmetros. Chegou-se a conclusão de que, de um modo geral, tais parâmetros foram pouco influenciados pela flexibilidade do sistema estrutural.

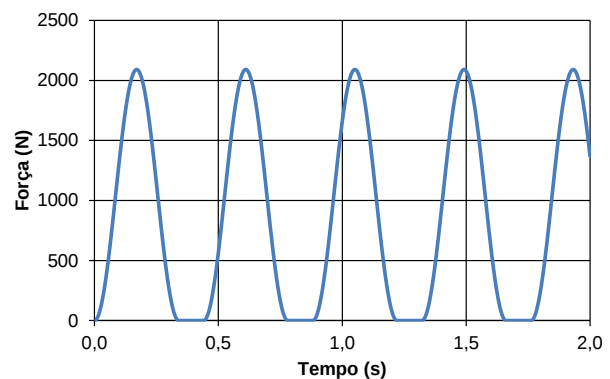
Tabela 2. Parâmetros utilizados na análise por Faisca (2003).

Atividades	T (s)	T_c (s)	K_p
Saltos à vontade	$0,44 \pm 0,15$	$0,32 \pm 0,09$	$3,17 \pm 0,58$
Ginástica aeróbica	$0,44 \pm 0,09$	$0,34 \pm 0,09$	$2,78 \pm 0,60$
Show/Torcida	$0,37 \pm 0,03$	$0,37 \pm 0,03$	$2,41 \pm 0,51$

Para o uso da função de carregamento dada por Faisca (2003) no nosso estudo foi considerada uma frequência de passo igual a 2,27 Hz com a finalidade de que o terceiro harmônico da excitação coincida com a frequência fundamental do piso. Foi adotada também uma força vertical de 800 N e um valor de 0,002 s para o passo da função. Para esta função de carregamento também foram utilizados como dado de entrada um coeficiente de impacto (K_p) de 2,78 e um período de contato de 0,34 s referentes à ginástica aeróbica. Para o coeficiente de defasagem (CD) foram utilizados os valores de 0,95 para o arranjo com 26 pessoas e 0,94 para os arranjos com 42 e 43 pessoas, de acordo com a Fig. 7. A Fig. 8 apresentam os gráficos da função de carregamento proposto por Faisca (2003) em função do tempo para os arranjos com 26 e 42/43 pessoas, respectivamente.



a) Carregamento para 26 pessoas.



b) Carregamento para 42 e 43 pessoas.

Figura 8. Função de carregamento proposto por Faisca (2003).

2.4 Modelo de carregamento proposto pelo guia do SCI (2009)

O modelo proposto por Ellis e Ji (1994) e adotado pelo guia do SCI (2009) foi desenvolvido para carregamentos gerados por grupos em atividades humanas rítmicas. Foram realizados estudos para investigar a influência do tamanho do grupo de pessoas na variação da carga dinâmica de saltos sincronizados, através da obtenção de forma experimental do coeficiente de Fourier ($r_{n,v}$), que é relacionado ao fator dinâmico do carregamento.

A equação do carregamento, conforme os resultados obtidos pelos testes experimentais, é descrita na Eq. (3) e seus parâmetros estão representados na Tabela 3.

$$F(t) = G \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} r_{n,v} \sin(2n\pi f_p t + \phi_n) \right\} \quad (3)$$

Onde:

- $F(t)$: representação matemática do carregamento no tempo (N);
 G : Peso de uma pessoa (N);
 $r_{n,v}$: coeficiente de Fourier para v pessoas;
 n : número de termos de Fourier;
 v : número de pessoas;
 ϕ_n : ângulo de fase (rad);
 f_p : frequência da atividade (Hz);
 t : tempo (s).

Na Tabela 3, o parâmetro α representa a razão entre o período de contato e período do carregamento, variando de acordo com a atividade executada. Conforme a realização de testes experimentais, obteve-se os três primeiros coeficientes de Fourier (r) em função do número de pessoas (v), onde estão apresentados nas Eq. (4), (5) e (6). De acordo com Ellis e Ji (1994), o incremento de precisão da Eq. (3) considerando os 6 primeiros termos de Fourier, para uma função considerando apenas os 3 primeiros, é pouco significativo.

Tabela 3. Valores dos coeficientes de Fourier e diferença de fase

α	Tipo de atividade	N						
			1	2	3	4	5	6
2/3	Baixo impacto	r_n	9/7	9/55	2/15	9/247	9/391	2/63
		ϕ_n	$-\pi/6$	$-5\pi/6$	$-\pi/2$	$-\pi/6$	$-5\pi/6$	$-\pi/2$
1/2	Alto impacto	r_n	$\pi/2$	2/3	0	2/15	0	2/35
		ϕ_n	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$
1/3	Saltos normais	r_n	9/5	9/7	2/3	9/55	9/91	2/15
		ϕ_n	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$	$-5\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$

$$r_{1,v} = 1,61v^{-0,082} \quad (4)$$

$$r_{2,v} = 0,94v^{-0,24} \quad (5)$$

$$r_{3,v} = 0,44v^{-0,31} \quad (6)$$

Considerando apenas uma pessoa a praticar atividades rítmicas, o coeficiente de Fourier ($r_{n,1}$) pode ser utilizado de acordo com a Tabela 3, salvo esta exceção, são utilizadas as Eq. (4), (5) e (6) para cargas de multidão. Além disso, apenas a diferença de fase (ϕ_n) para "salto normal", encontrada na Tabela 3, deve ser utilizada para grupo de pessoas realizando atividades rítmicas.

Para o uso da função de carregamento do SCI mais uma vez foi considerada uma frequência de passo igual a 2,27 Hz de modo que o terceiro harmônico da excitação coincida com a frequência fundamental do piso. Foi adotada também uma força vertical de 800 N e um valor de 0,002 s para o passo da função. Foi considerado também nesta função um número de pessoas excitando a estrutura ao mesmo tempo, onde os valores do coeficiente de Fourier para cada harmônico foram calculados em função deste número de pessoas através das Eq. (4), (5) e (6). Os ângulos de fase para os três primeiros harmônicos foram adotados iguais a $\pi/6$, $-\pi/6$ e $\pi/2$, respectivamente. As Fig. 9 e 10 apresentam os gráficos da função de carregamento proposto pelo SCI (2009) em função do tempo para os arranjos com 26, 42 e 43 pessoas.

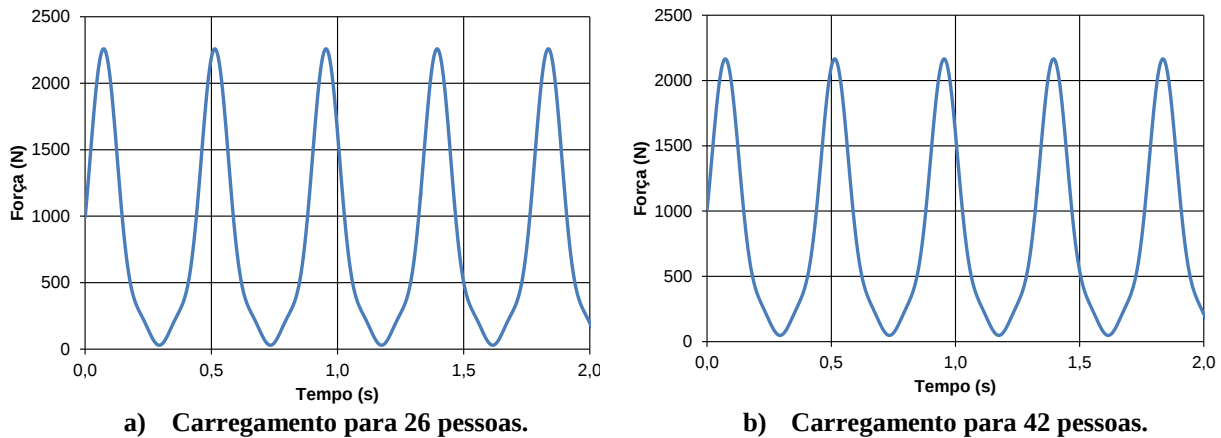


Figura 9. Função de carregamento proposto pelo guia do SCI (2009).

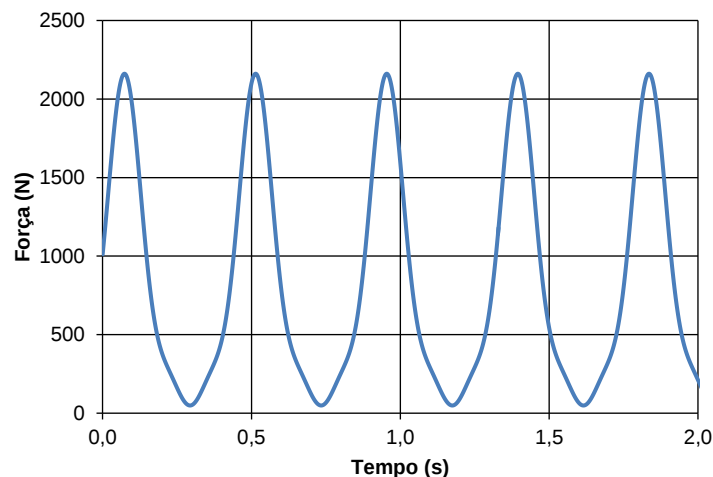


Figura 10. Função de carregamento proposto pelo guia do SCI (2009) para 43 pessoas.

3 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

O modelo estrutural estudado trata-se de uma estrutura tradicional de concreto armado formada por lajes, vigas e pilares. O sistema é composto por dois vãos de 9,0 m numa direção, dois de 6,0 m e um de 8,0 m na outra direção, perfazendo uma área total de 360,0 m². Este modelo estrutural também leva em consideração a influência da rigidez dos pilares que apresentam uma altura de 4,0 m, conforme ilustrado nas Fig. 11 e 12.

Cabe ressaltar que as lajes de concreto armado possuem uma espessura de 15,0 cm. O concreto adotado possui uma resistência característica à compressão (f_{ck}) aos 28 dias de 35 MPa e coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,2, adotado de acordo com a NBR 6118 (2014). Com referência ao módulo de elasticidade longitudinal, tem-se um valor igual a 28,2 GPa. Na sequência do texto, a Tabela 4 apresenta todas as características geométricas do modelo estrutural investigado.

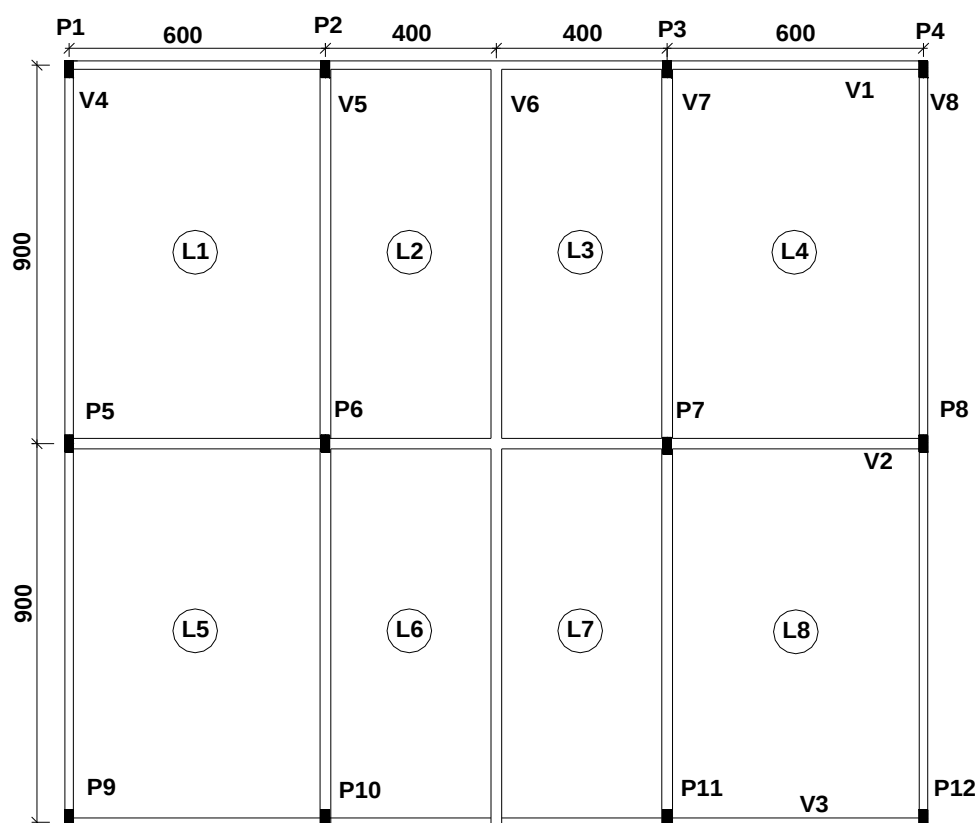


Figura 11. Planta baixa do piso investigado.

Tabela 4. Características físicas geométricas das vigas e dos pilares.

Elemento estrutural	Identificação	Seção transversal (cm x cm)
VIGAS	V1, V3, V4 e V8	20x50
	V5, V6 e V7	25x60
	V2	25x70
PILARES	P1,P2, P3, P4, P5, P8, P9, P10, P11 e P12	20x30
	P6 e P7	20x40

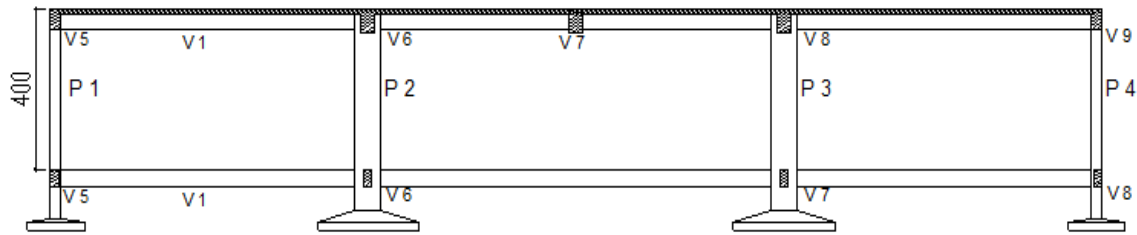


Figura 12. Seção transversal da estrutura (medidas em centímetros).

4 MODELO NUMÉRICO DESENVOLVIDO

O sistema estrutural investigado foi modelado a partir de técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, através do programa computacional ANSYS (2007). O modelo computacional foi desenvolvido utilizando-se elementos finitos de casca SHELL63 (ANSYS, 2007) para simular as lajes de concreto armado. As vigas e colunas da edificação foram representadas por elementos finitos de viga tridimensionais BEAM44 (ANSYS, 2007), onde são considerados os efeitos de flexão e torção. O modelo numérico considera, também, que o concreto trabalha em regime linear-elástico. O elemento finito de viga BEAM44 (ANSYS, 2007) é um elemento uniaxial composto por dois nós e cada nó possui seis graus de liberdade: translação nas direções x , y , e z e rotação nos eixos x , y , e z .

O presente modelo em elementos finitos possui um grau de refinamento adequado, permitindo uma boa representação do comportamento estrutural estático e dinâmico da estrutura analisada no que diz respeito à malha de elementos finitos, apresentando 1613 nós, 1440 elementos finitos de casca SHELL63 (ANSYS, 2007) e 396 elementos finitos de viga BEAM44 (ANSYS, 2007).

As condições de contorno foram aplicadas sobre o modelo numérico na base da estrutura, de modo a restringir as deslocabilidades dos pilares, no que diz respeito aos deslocamentos translacionais (horizontais e verticais), no que tange as direções globais X , Y e Z , simulando apoios de segundo gênero tridimensionais. As rotações na base dos pilares não foram restringidas. O modelo em elementos finitos desenvolvido encontra-se ilustrado nas Fig. 13, 14 e 15.

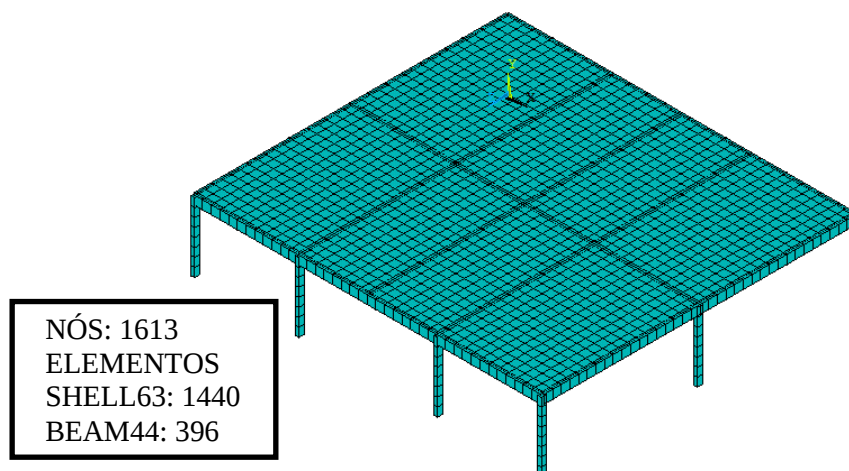


Figura 13. Vista tridimensional do modelo em elementos finitos.

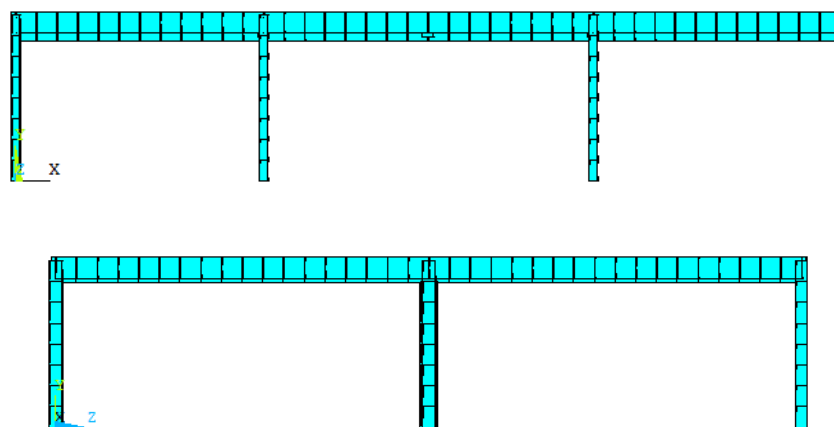


Figura 14. Planos XY e ZY.

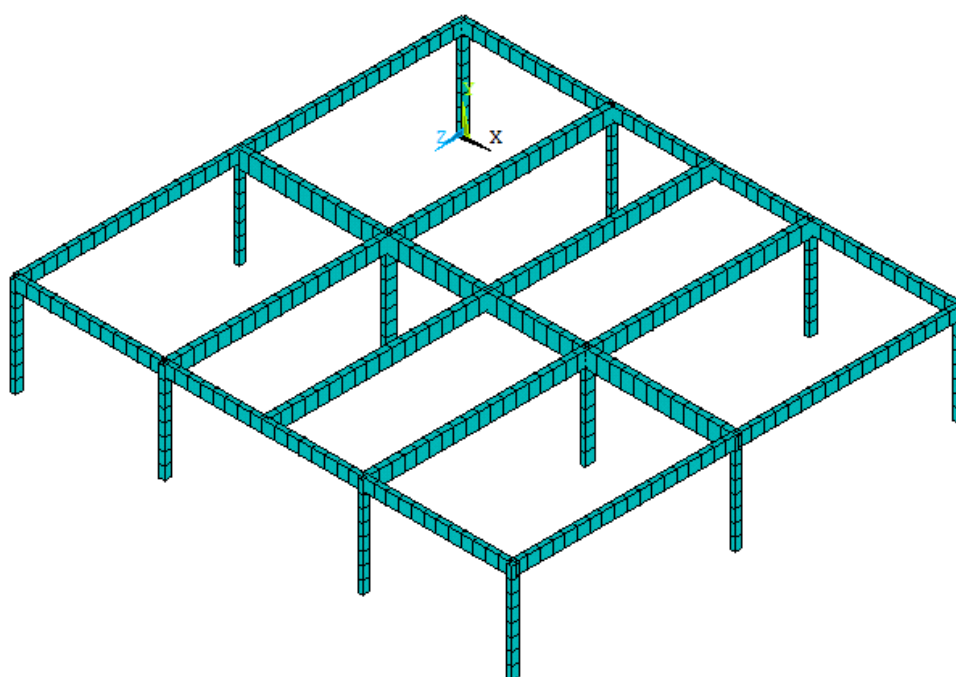


Figura 15. Vista isométrica das vigas e pilares.

5 FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

As frequências naturais indicam a taxa de oscilação livre da estrutura, quando a força que provocou o movimento é retirada, ou seja, representa o quanto a estrutura vibra quando não há força aplicada sobre ela. Esta frequência é função direta da rigidez, e inversa da massa da estrutura, sendo designada por um número real positivo, e cuja unidade mais comum é o Hertz (Hz). Normalmente a frequência natural mais importante é a primeira, menor entre todas, designada por fundamental. Foram obtidas as frequências naturais dos dez primeiros modos de vibração do modelo estrutural. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para cada modo de vibração.

Tabela 5. Frequências naturais do piso investigado.

Frequências Naturais (Hz)		Modos de Vibração
$f_{01}^{Colunas}$	0,66	Flexão das colunas em torno do eixo X
$f_{02}^{Colunas}$	1,04	Flexão das colunas em torno do eixo Z
$f_{03}^{Colunas}$	1,09	Torção das colunas em torno do eixo Y
f_{01}^{Piso}	6,83	Flexão da laje em torno do eixo X
f_{02}^{Piso}	7,01	Flexão da laje em torno dos eixos X e Z
f_{03}^{Piso}	7,75	Flexão da laje em torno dos eixos X e Z
f_{04}^{Piso}	8,10	Flexão da laje em torno do eixo Z
f_{05}^{Piso}	8,78	Flexão da laje em torno dos eixos X e Z
f_{06}^{Piso}	8,84	Flexão da laje em torno dos eixos X e Z
f_{07}^{Piso}	11,43	Flexão da laje em torno dos eixos X e Z

Os modos de vibração representam a forma como a estrutura vibra, relacionada a cada uma de suas frequências naturais, ou seja, para cada frequência natural existe um modo de vibrar específico. A Fig. 16 apresenta os modos de vibração das colunas e os principais modos de vibração à flexão do piso.

É possível observar, em relação às características das formas modais, que os três primeiros modos de vibração são referentes às colunas, sendo os demais modos de vibração correspondentes a vibração do piso, apresentando frequência fundamental igual a 6,83 Hz. Observa-se também que a frequência fundamental do piso encontra-se dentro da faixa de frequência de excitação correspondente ao terceiro harmônico de atividades aeróbicas, variando de 5,66 a 8,57 Hz (Faisca, 2003) e de 4,5 a 8,4 Hz (Ellis e Ji, 1994). Em consequência, o piso pode entrar em ressonância caso a frequência de excitação se iguale a frequência fundamental. É importante observar que o posicionamento do carregamento contribui para a amplificação das vibrações, principalmente nos pontos de maior amplitude modal.

A Tabela 6 mostra os valores mínimos de frequência natural fundamental da estrutura, de acordo com as normas de critérios de projeto destinada a atividades rítmicas praticadas sobre pisos.

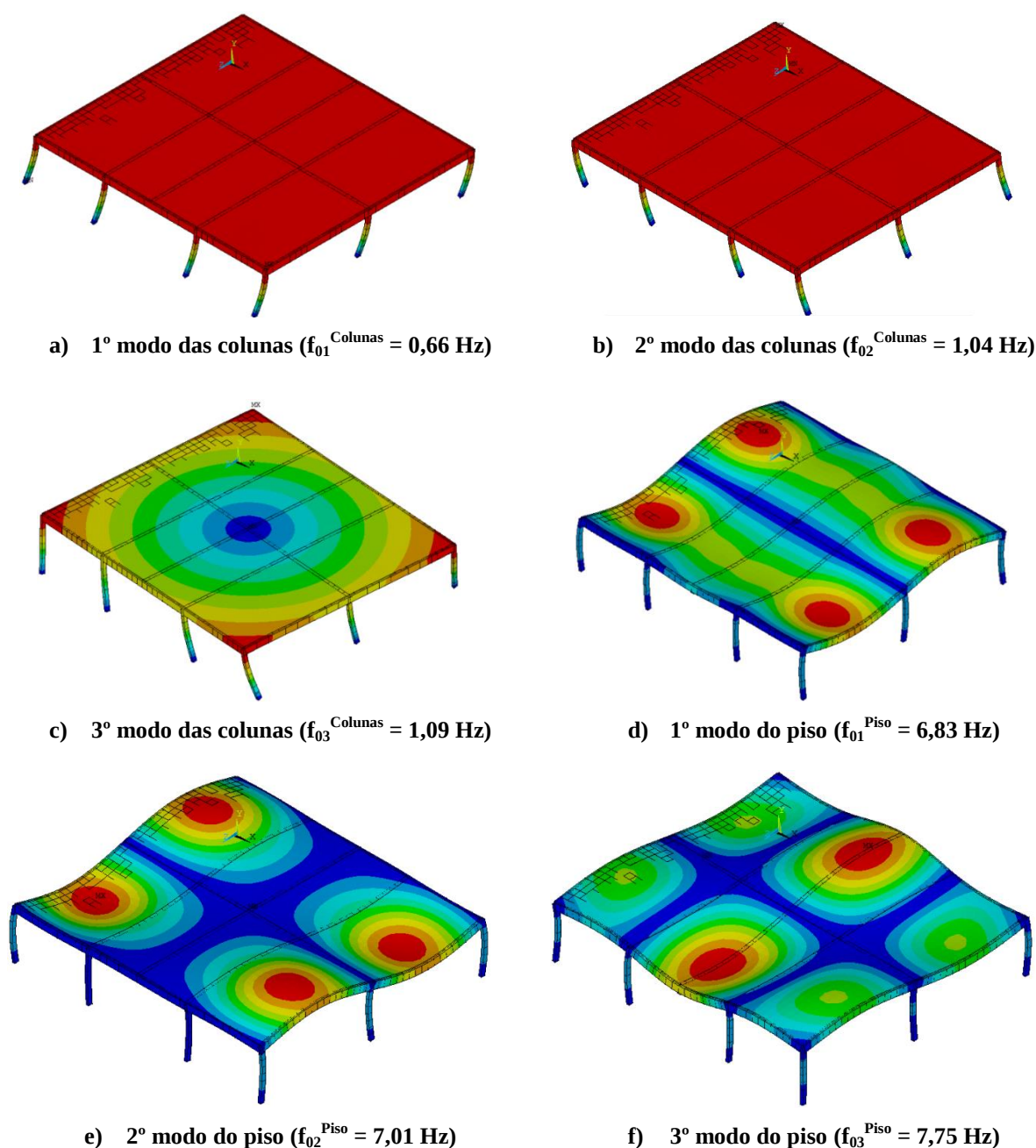


Figura 16. Modos de vibração do piso de concreto armado.

Tabela 6. Frequências naturais recomendadas para atividade aeróbica

Norma / Critérios de projeto	Atividade praticada	Frequência natural mínima (Hz)
NBR 6118 [1]	Ginásio de esportes	9,6
Guia AISC [6]	Ginástica aeróbica para pisos leves	9,2

Comparando-se os valores indicados pelas normas e guia de projeto, presentes na Tabela 6, com a frequência fundamental do piso ($f_{01}^{\text{Piso}} = 6,83 \text{ Hz}$), conclui-se que esta está abaixo do valor mínimo recomendado. Esta situação remete a uma grande probabilidade de ocorrência de problemas relacionados a vibrações excessivas.

6 ANÁLISE DA RESPOSTA: TEMPO E FREQUÊNCIA

A simulação das ações dinâmicas rítmicas foi realizada pela aplicação dos modelos de carregamento nas três formas distintas de posicionamento do carregamento sobre o piso. Os modelos de carregamento foram sintonizados ao modo fundamental do piso ($f_{01}^{\text{Piso}} = 6,83 \text{ Hz}$), de modo a induzir um estado de ressonância com a estrutura investigada. Em seguida, foram obtidos os deslocamentos e acelerações nos nós de interesse por meio do programa computacional ANSYS (2007) e, após, comparando-os com os valores limites recomendados para o conforto humano.

Os resultados da análise foram obtidos no intervalo de tempo de 0 a 10 s, a contar da aplicação do carregamento, e sendo suficiente para que a atividade entrasse em regime permanente. O intervalo de integração foi de 0,002 s. A Fig. 17 apresenta os nós de interesse da estrutura, onde foram obtidas as respostas dinâmicas.

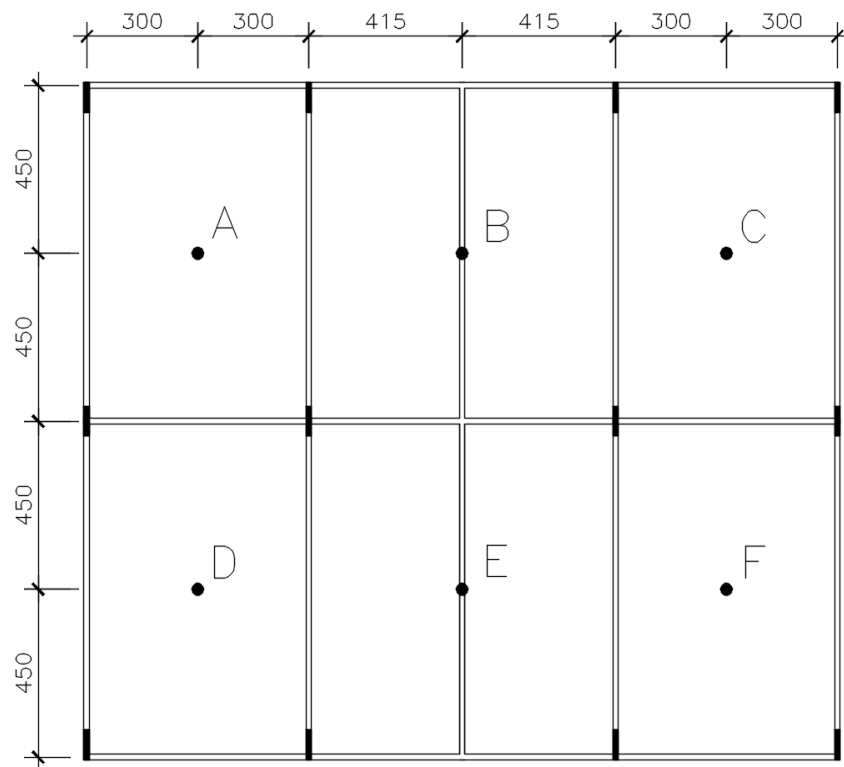


Figura 17. Nós onde foram obtidas as respostas da estrutura.

As respostas dinâmicas do piso, em termos das acelerações, para os três arranjos de carregamento propostos analisados para cada modelo de carregamento, estão ilustradas na Fig. 18, no domínio do tempo e com sua respectiva transformada de Fourier, no domínio da frequência. Foram apresentados os resultados somente para o nó A que, segundo a Tabela 8, foi o nó que apresentou os maiores valores de aceleração.

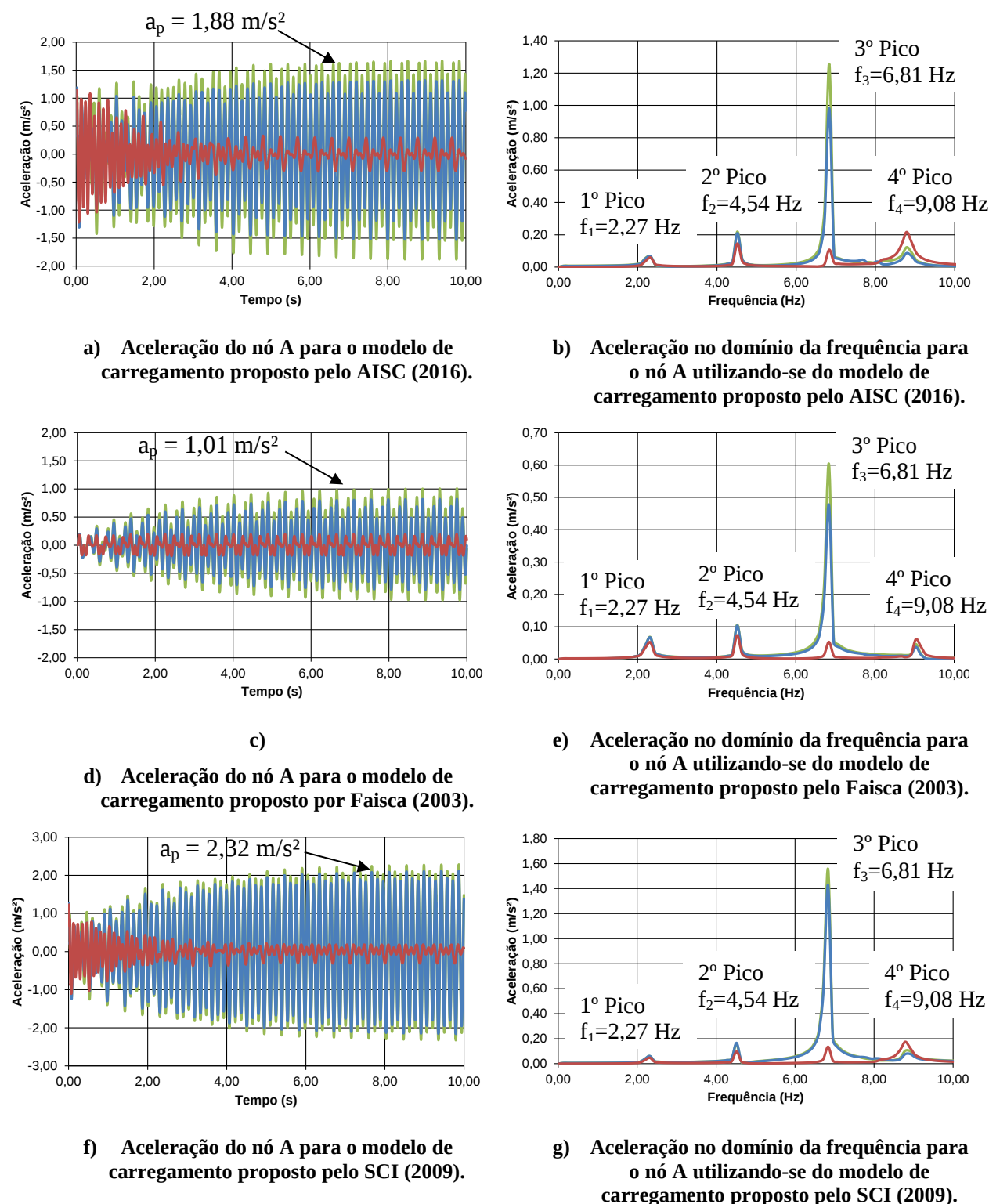


Figura 18. Gráficos da aceleração do nó A no tempo para cada modelo de carregamento e suas respectivas transformadas de Fourier.

Legenda:

- 26 Pessoas
- 42 Pessoas
- 43 Pessoas

Considerando o exposto acima, a análise transiente confirmou a alta probabilidade da ocorrência de vibrações perturbadoras ao conforto humano para em caso de ressonância com o modo fundamental do piso ($f_{01}^{\text{Piso}} = 6,83 \text{ Hz}$). Observando a Fig. 18, nota-se que as respostas dinâmicas entram rapidamente em regime permanente. Nesse sentido, a avaliação através da amplitude em regime permanente é mais razoável.

7 ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO

Os critérios de avaliação do nível de conforto humano, até o presente conhecimento dos autores, são divergentes em relação aos valores limites de aceitação para atividades humanas rítmicas (Smith et al. 2009). Vários pesquisadores (Bachmann et al. 1992; Murray et al. 2016; Ellis & Littler 2004; Smith et al. 2009; Setareh 2012) têm estabelecido limites de conforto em função dos métodos de avaliação das acelerações.

No presente trabalho, as acelerações do piso foram avaliadas com base em acelerações de pico no regime permanente, a_p , acelerações filtradas rms, $a_{w,rms}$, e valores de dose de vibração, VDV. A Tabela 7 apresenta os valores limites rms e VDV com as respectivas reações das pessoas aos limites estabelecidos pelos trabalhos desenvolvidos por Smith et al. (2009), Ellis & Littler (2004) e Setareh (2012). O limite referente as acelerações de pico (a_p) é igual a $0,5 \text{ m/s}^2$ (5%g), adotado de acordo com o guia do AISC (2007) para atividades aeróbicas.

Tabela 7. Critérios de conforto humano para atividades humanas rítmicas

AISC (2016)	Smith et al. (2009)	Ellis e Littler (2004)	Setareh (2012)	Limite de Conforto
a_p (m/s^2)	$a_{w,RMS}$ (m/s^2)	VDV ($\text{m/s}^{1,75}$)	VDV ($\text{m/s}^{1,75}$)	
0,5	< 0,35	< 0,66	< 0,50	Razoável
	0,35 - 1,27	0,66 - 2,38	0,50 - 3,50	Perturbador
	1,27 - 2,47	2,38 - 4,64	3,50 - 6,90	Inaceitável
	> 2,47	> 4,64	> 6,90	Pânico

As respostas dinâmicas do piso em estudo, em termos das acelerações de pico, aceleração rms e VDV, para os três arranjos de carregamento onde foram aplicados os modelos de carregamento propostos pelo AISC (2016), Faisca (2003) e SCI (2009), estão apresentadas na Tabela 8 e classificadas seguindo a Tabela 7 para cada faixa do limite de conforto humano.

Tabela 8. Resposta dinâmica para os diversos modelos de carregamento.

Nº de Pessoas	Ponto	Modelos Dinâmicos de Carregamento								
		AISC (2016)			FAISCA (2003)			SCI (2009)		
		a_p (m/s ²)	$a_{w,RMS}$ (m/s ²)	VDV (m/s ^{1,75})	a_p (m/s ²)	$a_{w,RMS}$ (m/s ²)	VDV (m/s ^{1,75})	a_p (m/s ²)	$a_{w,RMS}$ (m/s ²)	VDV (m/s ^{1,75})
26 Pessoas	A	1,48 ^a	0,89 ^c	1,82 ^c	0,82 ^a	0,45 ^c	0,94 ^c	2,16 ^a	1,32 ^d	2,71 ^{c, d}
	B	0,75 ^a	0,53 ^c	1,14 ^c	0,40 ^b	0,25 ^b	0,51 ^{b, c}	1,13 ^a	0,74 ^c	1,51 ^c
	C	1,48 ^a	0,89 ^c	1,82 ^c	0,82 ^a	0,45 ^c	0,94 ^c	2,16 ^a	1,32 ^{c, d}	2,71 ^{c, d}
	D	1,27 ^a	0,88 ^c	1,80 ^c	0,66 ^a	0,43 ^c	0,89 ^c	1,97 ^a	1,28 ^{c, d}	2,62 ^{c, d}
	E	0,75 ^a	0,52 ^c	1,09 ^c	0,38 ^b	0,25 ^b	0,51 ^{b, c}	1,13 ^a	0,74 ^c	1,52 ^c
	F	1,27 ^a	0,88 ^c	1,80 ^c	0,66 ^a	0,43 ^c	0,89 ^c	1,97 ^a	1,28 ^{c, d}	2,62 ^{c, d}
42 Pessoas	A	0,41 ^b	0,61 ^c	1,86 ^c	0,20 ^b	0,10 ^b	0,22 ^b	0,34 ^b	0,23 ^b	0,63 ^{b, c}
	B	0,18 ^b	0,18 ^b	0,54 ^b	0,08 ^b	0,04 ^b	0,09 ^b	0,17 ^b	0,08 ^b	0,19 ^b
	C	0,10 ^b	0,16 ^b	0,39 ^b	0,02 ^b	0,01 ^b	0,02 ^b	0,06 ^b	0,05 ^b	0,13 ^b
	D	0,41 ^b	0,61 ^c	1,86 ^c	0,20 ^b	0,10 ^b	0,22 ^b	0,34 ^b	0,23 ^b	0,63 ^{b, c}
	E	0,18 ^b	0,18 ^b	0,54 ^b	0,08 ^b	0,04 ^b	0,09 ^b	0,17 ^b	0,08 ^b	0,19 ^b
	F	0,10 ^b	0,16 ^b	0,39 ^b	0,02 ^b	0,01 ^b	0,02 ^b	0,06 ^b	0,05 ^b	0,13 ^b
43 Pessoas	A	1,82 ^a	1,14 ^c	2,34 ^c	1,01 ^a	0,56 ^c	1,18 ^c	2,32 ^a	1,44 ^d	2,95 ^{c, d}
	B	1,10 ^a	0,66 ^c	1,36 ^c	0,60 ^a	0,33 ^b	0,70 ^c	1,38 ^a	0,85 ^c	1,74 ^c
	C	1,83 ^a	1,15 ^c	2,35 ^c	1,01 ^a	0,56 ^c	1,18 ^c	2,33 ^a	1,45 ^d	2,97 ^{c, d}
	D	1,63 ^a	1,14 ^c	2,32 ^c	0,84 ^a	0,55 ^c	1,13 ^c	2,16 ^a	1,41 ^d	2,89 ^{c, d}
	E	0,95 ^a	0,66 ^c	1,34 ^c	0,49 ^b	0,32 ^b	0,66 ^{b, c}	1,26 ^a	0,82 ^c	1,68 ^c
	F	1,64 ^a	1,15 ^c	2,33 ^c	0,84 ^a	0,55 ^c	1,13 ^c	2,17 ^a	1,42 ^d	2,90 ^{c, d}

- a) Valores de aceleração de pico que excedem o limite estabelecido pelo AISC (2016) de 0,5 m/s² (5%g).
- b) Valores na faixa de limite de conforto razoável.
- c) Valores na faixa de limite de conforto perturbador.
- d) Valores na faixa de limite de conforto inaceitável.
- e) Valores na faixa de limite de conforto em pânico.

Nota-se ainda que as acelerações encontradas pela aplicação do modelo de carregamento proposto pelo SCI (2009) apresentam as maiores amplitudes em vista das obtidas nos outros dois modelos de carregamento, porém com o modelo adotado pelo AISC (2016) possuindo valores próximos a este. Assim, o modelo proposto por Faisca (2003) foi o que apresentou os menores valores de aceleração e deslocamento em todos os arranjos de carga.

Pode-se observar também a influência da disposição do carregamento na resposta dinâmica da estrutura, onde a única disposição que apresentou valores aceitáveis segundo os critérios de avaliação foi o 2º arranjo, apesar deste possuir uma grande quantidade de indivíduos praticando a atividade aeróbica (42 pessoas). Esta redução nos valores dos resultados se deve principalmente em função do carregamento estar disposto em segmentos de laje com sinais opostos segundo o modo de vibração fundamental do piso (Fig. 16). Sendo assim, um lado tende a compensar o outro, gerando pouca contribuição para as respostas da estrutura.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta análise abordou a verificação do conforto humano dos indivíduos sobre o piso, quando submetido a atividades rítmicas (ginástica aeróbica). Para tal, realizou-se a simulação das cargas provenientes destas atividades, com base no emprego de Modelos de Carregamento propostos pelo guia do AISC (2016), pelo autor Faisca (2003) e pelo guia do SCI (2009), sendo este carregamento aplicado conforme três arranjos distintos para casos de 26, 42 e 43 pessoas atuando sobre o sistema estrutural. Em seguida, foram obtidos e comparados os valores dos deslocamentos e das acelerações oriundas da aplicação destes modelos de carregamentos dinâmicos propostos utilizando-se de três parâmetros para caracterizar a aceleração do piso (aceleração de pico (a_p), aceleração rms ($a_{w,rms}$) e valores de dose de vibração (VDV).

Conforme a análise das respostas dinâmicas, em termos das acelerações no domínio do tempo e da frequência, percebe-se que os modelos de carregamento propostos pelo AISC (2016) e pelo SCI (2009), apresentaram acelerações com valores muito superiores àqueles fornecidos pelo modelo de carregamento proposto por Faisca (2003). Além disso, observou-se que para o primeiro arranjo de carregamento, proposto inicialmente como o de projeto, a estrutura apresentou-se como imprópria para a atividade aeróbica segundo as classificações adotadas por diversos autores apresentados nesse estudo, com o conforto humano avaliado como no mínimo perturbador em todos os casos. Porém, destaca-se que alterando a disposição de projeto e adotando o segundo arranjo de carregamento, mesmo com o notável aumento do número de participantes na atividade aeróbica, o piso apresenta valores de aceleração aceitáveis para o conforto humano dos usuários da estrutura.

Observando-se a resposta dinâmica do piso de concreto, em termos da aceleração, no domínio da frequência, o sistema estrutural apresentou um quadro de ressonância a partir da aproximação do 3º harmônico da excitação da atividade rítmica (ginástica aeróbica) com a frequência natural associada ao modo de vibração fundamental do piso em estudo ($f_{01}^{\text{Piso}} = 6,83 \text{ Hz}$).

Em relação a avaliação do conforto humano da estrutura, o pior caso de carregamento foi obtido para o modelo de carregamento do SCI (2009) para os três arranjos de carga, sendo o caso mais crítico o de 43 pessoas praticando a atividade, onde apresentou os valores de $2,32 \text{ m/s}^2$; $1,44 \text{ m/s}^2$ e $2,95 \text{ m/s}^{1,75}$ para aceleração de pico, aceleração RMS e VDV,

respectivamente, e de $4,83\text{m/s}^2$; $3,08\text{m/s}^2$ e $6,28\text{m/s}^{1,75}$ para o modelo de carregamento do SCI (aceleração de pico, aceleração RMS e VDV, respectivamente. Estes valores indicaram com clareza níveis de vibrações extremamente desconfortáveis aos praticantes da atividade aeróbica sobre o piso analisado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país, CAPES e FAPERJ, que possibilitaram a realização deste trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014. NBR-6118: Projeto de Estruturas de Concreto Armado e Protendido - Procedimento.

ANSYS Swanson Analysis Systems, Inc., 2007. P. O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065. Release 11.0, SP1 UP20070830, ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001:2000 Company. Products ANSYS Academic Research.

Bachmann, H., 1992. Case studies of structures with man-induced vibrations. *Journal of Structural Engineering*, v. 118, n. 3, p. 631-647.

Ellis, B.R, Littler J.D., 2004. “Response of cantilever grandstands to crowd loads. Part I: Serviceability evaluation”, in Proceedings of the Institution of Civil Engineers – *Structures and Buildings* 157(SB4): 235-241.

Faisca, R. G., 2003. *Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas*, 230f. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL.

Ji, T.; Ellis, B. R., 1994 Floor Vibration Induced by Dance-Type Loads:Theory and Verification. *The Structural Engineer*, v. 72, n. 3, p. 37-50.

Murray, T.M.; Allen, D.E.; Ungar, E.E.; Davis, D.B., 2016. Steel Design Guide Series 11: Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity. Second Edition. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction.

Setareh, M., 2012. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*;v.165;iss,SB5;p. 219–231.

Smith, A.L.; Hicks, S.J.; Devine, P.J., 2009. Design of floors for vibrations: A new approach. SCI Publication P354, Ascot.