



MODELAGEM DAS AÇÕES HUMANAS RÍTMICAS E ESTUDO DE CONFORTO HUMANO SOBRE EDIFÍCIOS MISTOS (AÇO-CONCRETO)

Fernanda Fernandes Campista

Cássio Marques Rodrigues Gaspar

fernandafcampista@yahoo.com.br

cgaspar@yahoo.com.br

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

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

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

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

Resumo. Atualmente, os sistemas estruturais mistos (aço-concreto) estão mais susceptíveis as vibrações indesejáveis, no que diz respeito à faixa de frequências situada entre 4Hz e 8Hz, justamente onde encontram-se as frequências das excitações dinâmicas relacionadas às atividades humanas rítmicas. Assim sendo, este trabalho de pesquisa tem o intuito de avaliar o comportamento dinâmico de um edifício misto (aço-concreto), submetido às atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica), sob o ponto de vista do conforto humano. O modelo estrutural é composto por três andares com dimensões de 20m x 20m, com uma área total de 1200m² (3 x 400m²) e um pé-direito de 4m. A modelagem numérica da estrutura foi realizada pelo programa computacional ANSYS, onde utilizou-se técnicas de discretização por meio do método dos elementos finitos (MEF). O carregamento dinâmico, proveniente das ações humanas rítmicas (ginástica aeróbica) é simulado através de duas formulações matemáticas distintas, baseadas em testes experimentais. Uma extensa análise paramétrica foi realizada sobre o modelo estrutural investigado e a resposta dinâmica do sistema foi obtida, em termos acelerações de pico, RMS e VDV. De acordo com os resultados encontrados, o edifício misto (aço-concreto) em estudo apresentou níveis de vibração excessiva que comprometem o conforto humano dos usuários.

Palavras-chave: Edifícios mistos, Atividades humanas rítmicas, Conforto humano.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, problemas relacionados à vibração excessiva de estruturas estão ocorrendo com maior frequência em espaços destinados à prática de atividades humanas rítmicas (aeróbica). Tal fato pode ser associado a uma combinação de fatores, tais como a adaptação de estruturas projetadas inicialmente para outros fins e a influência dos avanços tecnológicos no campo dos materiais. Estes avanços tecnológicos estão relacionados a utilização de materiais com menor peso e maior resistência, resultando em sistemas estruturais mais flexíveis e esbeltos, levando assim a baixas frequências naturais dos pisos mistos. Além disso, tem sido observada na prática, a concepção de estruturas com baixo amortecimento estrutural, que está relacionado com o tipo de construção, os materiais, a presença de elementos não estruturais, idade e qualidade de construção.

Em relação à utilização de estruturas mistas (aço-concreto) como ginásios, é importante observar que a representação das atividades humanas rítmicas (aeróbica) consiste em um problema complexo. Estas atividades podem ser descritas por funções matemáticas fornecidas por alguns autores e normas de projeto. Nota-se que as frequências dos harmônicos das atividades humanas rítmicas se encontram próximas a frequência natural da maioria dos pisos, de 4 a 8 Hz, que é coincidentemente a faixa de frequência mais perceptível aos humanos. Assim, esses pisos destinados a residências, escritórios e academias, por exemplo, são mais suscetíveis a vibração excessiva devido ao fenômeno da ressonância, podendo causar mal-estar e desconforto do usuário.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento dinâmico de uma edificação de três andares que mede 20mx20m, com uma área total de 3x400m², utilizado como ginásio para prática de atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica). As respostas dinâmicas foram obtidas em termos da aceleração de pico, RMS e VDV, baseadas em duas funções matemáticas distintas que representam as atividades humanas rítmicas (aeróbica). Desta forma, verificou-se o estado de desconforto humano dos usuários diante dos níveis elevados de vibração do piso misto, conforme os limites propostos por algumas normas de projetos e autores.

2 MODELAGEM DAS ATIVIDADES RÍTMICAS

A função matemática que representa as atividades humanas rítmicas é descrita por duas diferentes abordagens, propostas por Faisca (2003) e Ellis e Ji (2004) e SCI (2009). O modelo de carregamento I é referente ao modelo desenvolvido por Faisca (2003), representado pela eq. (1), enquanto o modelo de carregamento II corresponde ao modelo proposto por Ellis e Ji (2004) *apud* SCI (2009), representado pelas eqs. (2) a (5). As Figs. 1 e 2 ilustram exemplos da força no domínio do tempo e frequência, respectivamente, em relação a uma pessoa praticando atividade aeróbica numa frequência de 2,17Hz. Considerou-se que o peso de um indivíduo é 800 N, além disso, a atuação de cinquenta pessoas distribuídas sobre o piso misto.

$$F(t) = CD \left\{ K_p P \left[0,5 - 0,5 \cos \left(\frac{2\pi}{t_c} \right) \right] \right\} \quad \text{Para } t \leq T_c$$
$$F(t) = 0 \quad \text{Para } T_c \leq t \leq T$$
(1)

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 contato da atividade em (s); t : tempo em (s).

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

$$r_{1,v} = 1,61v^{-0,082} \quad (3)$$

$$r_{2,v} = 0,94v^{-0,24} \quad (4)$$

$$r_{3,v} = 0,44v^{-0,31} \quad (5)$$

Onde, $F(t)$: representação matemática do carregamento no tempo em (N); t : tempo (s); f_p : frequência da atividade (Hz); v : número de pessoas; $r_{n,v}$: Fourier coeficiente de Fourier induzido por v pessoas; G : peso do indivíduo (N); φ_n : diferença de fase. A diferença de fase para os três primeiros harmônicos, considerando saltos normais realizados pela multidão é $\pi/6$, $-\pi/6$ e $\pi/2$, respectivamente.

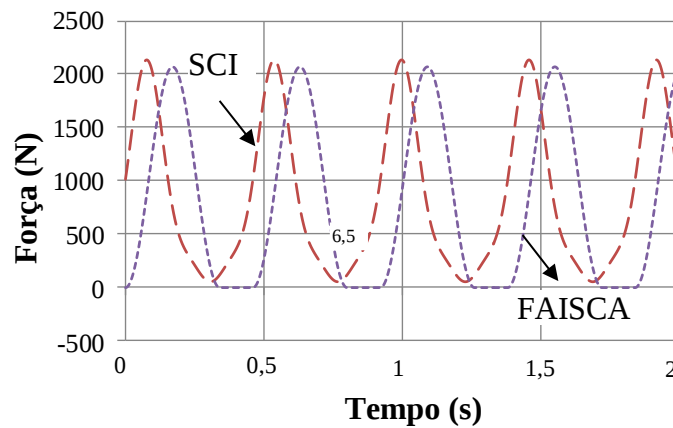
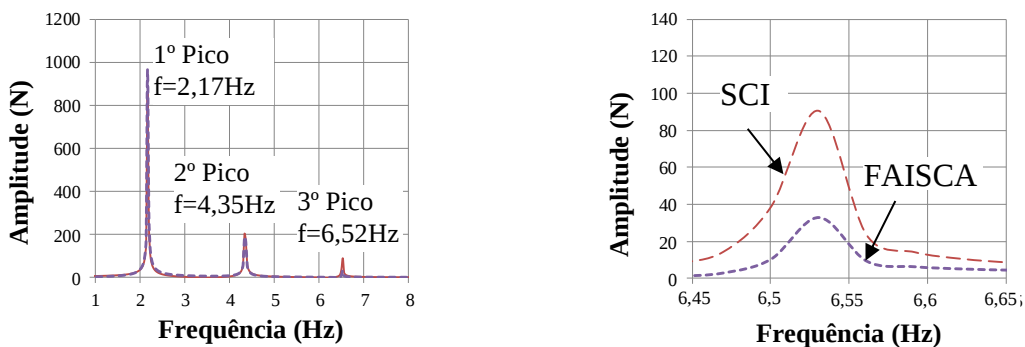


Figura 1. Sinais da força no domínio do tempo



a) Espectro de frequência dos três primeiros harmônicos da atividade aeróbica

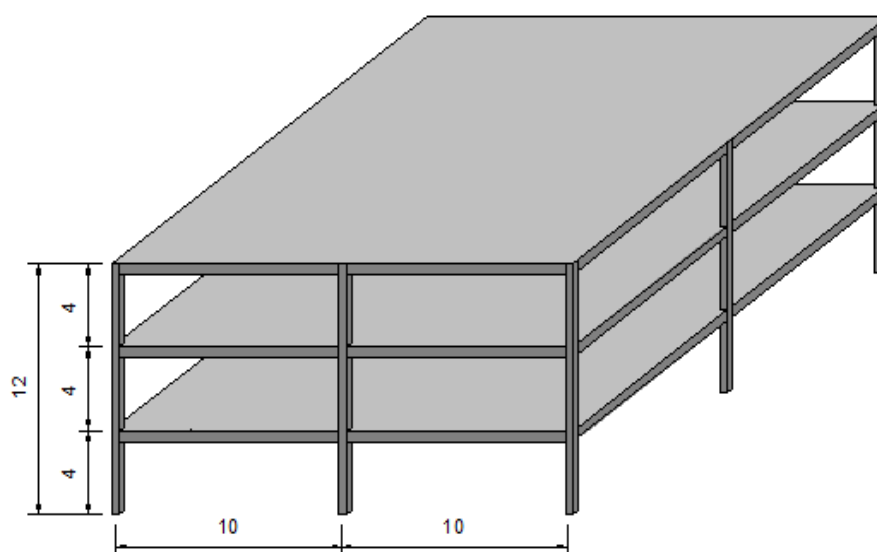
b) Espectro de frequência dos três primeiros harmônicos da atividade aeróbica

Figura 2. Sinais da força no domínio da frequência

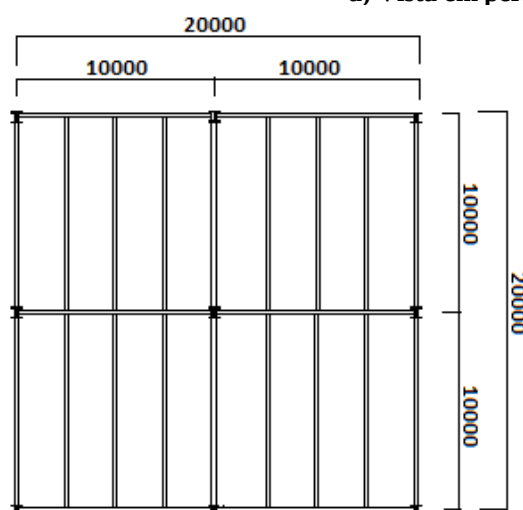
3 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

3.1 Descrição do modelo estrutural

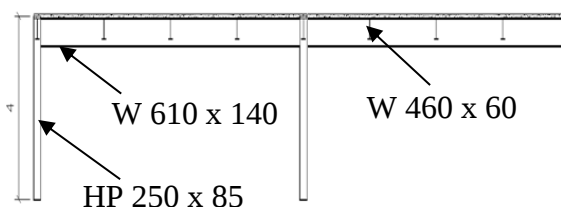
O sistema estrutural investigado é referente a um piso misto composto por uma laje de concreto, vigas e pilares metálicos. Conforme a Fig. 3, o piso possui dimensão de 20mx20m, uma área de 3x400 m² com um total de 12 baias de 10mx10m. A laje de concreto possui espessura de 10 cm e os pilares tem altura igual a 4m. A seção de aço utilizada foi de perfil w soldado, com tensão de escoamento de 345 MPa, enquanto a laje de concreto tem uma resistência característica à compressão (fck) de 30 MPa e módulo de elasticidade secante (Ecs) de 26x10³ MPa.



a) Vista em perspectiva da estrutura



a) Vista superior do piso



b) Seção transversal do painel

Figura 3. Modelo estrutural investigado. Dimensão em (mm)

3.2 Distribuição do carregamento dinâmico

O carregamento dinâmico é representado pela distribuição uniforme de cinquenta pessoas praticando atividades aeróbicas na metade da área do 2º andar, conforme ilustração da Fig. 4. A simulação destas atividades humanas rítmicas é realizada pela aplicação dos modelos de carregamento I e II, desenvolvidos respectivamente por Faisca (2003) e Ellis e Ji (2004) *apud* SCI (2009).

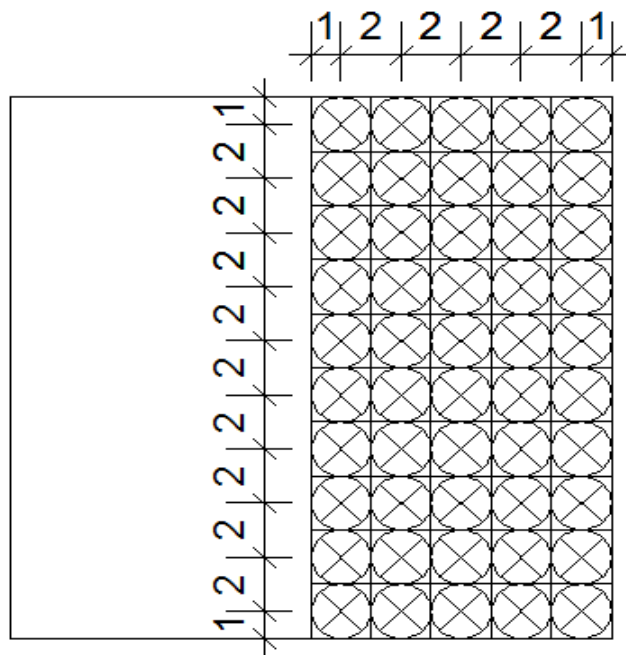


Figura 4. Cinquenta pessoas praticando atividades aeróbicas no 2º andar do piso misto. Dimensão em metros

Considera-se que o peso do indivíduo é 800N. Neste estudo, o amortecimento estrutural é igual a $\xi = 1\%$ ($\xi = 0,01$), de acordo com a ISO10137. A resposta dinâmica do modelo foi obtida no centro de cada um dos nós dos 12 painéis, enumerados de A até L, referente aos três andares de laje de concreto de acordo com a Fig. 5.

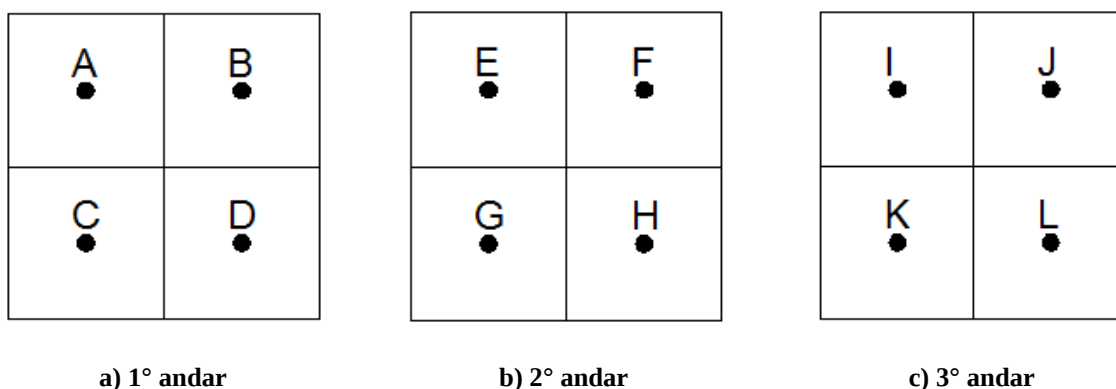


Figura 5. Nós analisados na resposta dinâmica

4 MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

A modelagem numérica foi realizada utilizando o programa ANSYS, baseando-se no Método dos Elementos Finitos. As vigas foram representadas pelo elemento BEAM44, no qual os efeitos de flexão e de torção são considerados. A laje de concreto armado foi representada pelo elemento de casca (SHELL63). O modelo numérico apresentou 29874 nós e 167079 graus de liberdade. O sistema estrutural modelado por meio de elementos finitos está ilustrado na Fig. 6. Considera-se que ambos materiais possuem um comportamento elástico, permanecendo planos no estado deformado.

A completa interação entre laje de concreto e as vigas metálicas foi considerada na análise, ou seja, são acoplados os nós entre viga e coluna para impedir a ocorrência de qualquer deslizamento. Referente ao comportamento das ligações estruturais, as ligações viga-viga e viga-coluna foram consideradas respectivamente, como conexões flexíveis e rígidas.

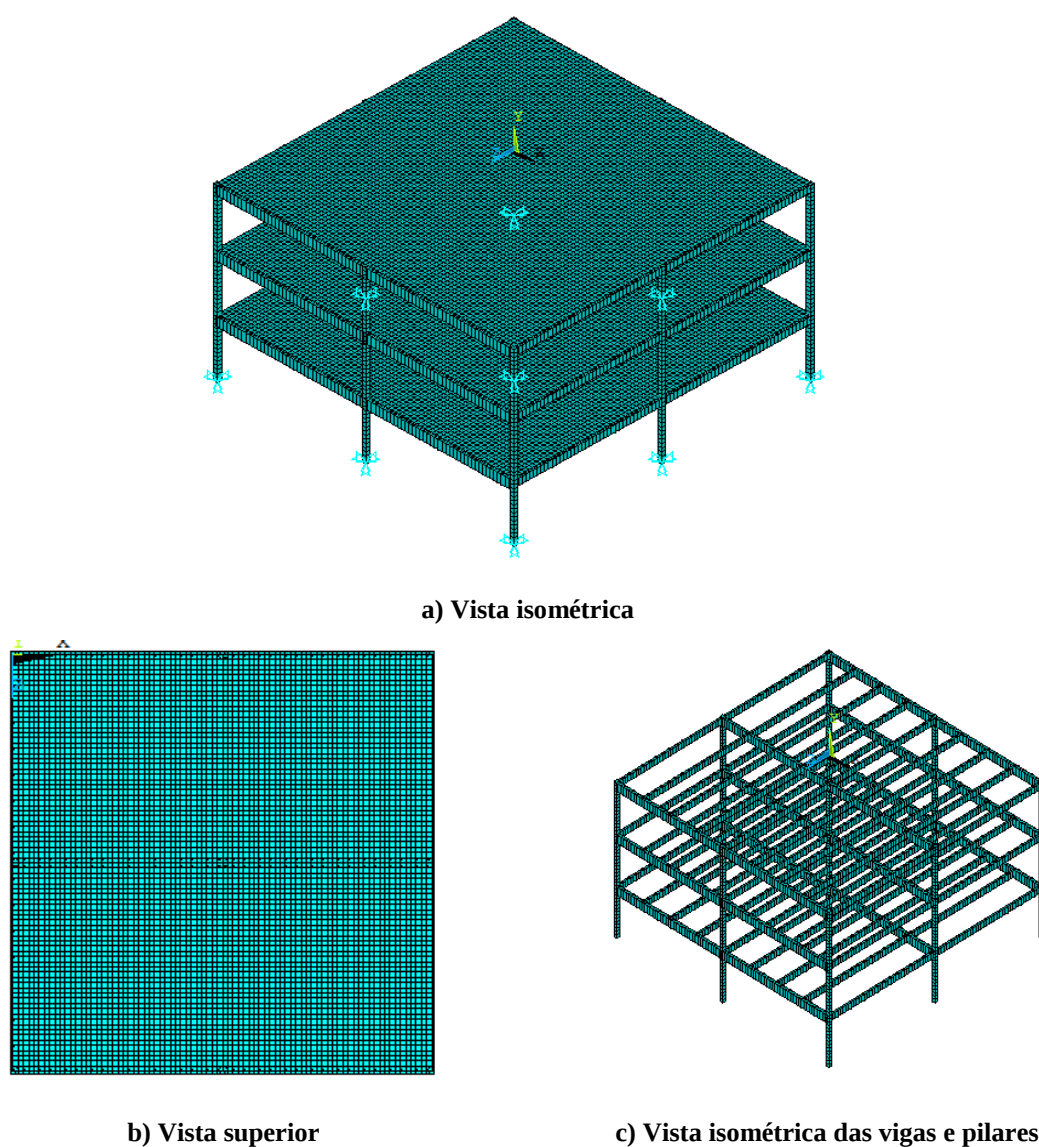


Figura 6. Modelo em elementos finitos

5 ANÁLISE DINÂMICA

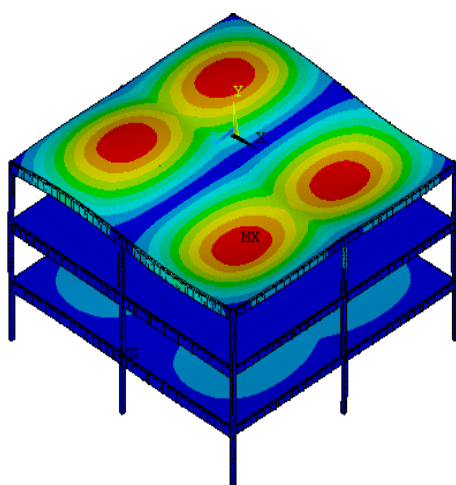
5.1 Frequências naturais e Modos de Vibração

A partir da análise modal, verificou-se que as doze primeiras frequências naturais do edifício variam de 6,29 Hz a 7,59 Hz (Tabela 1), de modo que encontram-se na mesma faixa da frequência de excitação correspondente ao terceiro harmônico de atividades aeróbicas, variando de 5,66 a 8,57 Hz e de 4,5 a 8,4 Hz, segundo Faisca (2003) e Elis e Ji (2004), respectivamente. Deste modo, a estrutura apresenta uma maior suscetibilidade ao fenômeno da ressonância ao igualar-se a uma destas frequências, podendo ocasionar vibrações excessivas e desconforto humano. A massa total da estrutura é 372,83 T.

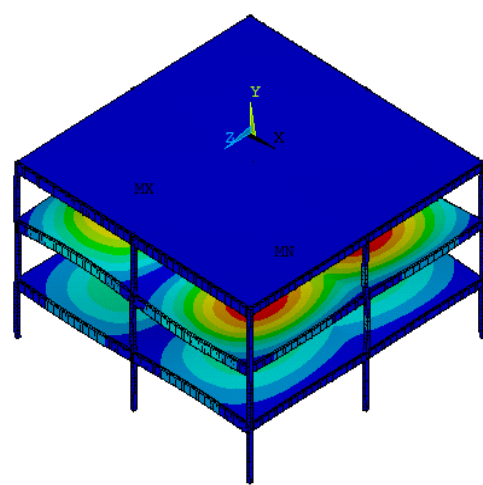
Com o propósito de evitar a ocorrência de vibrações excessivas, a frequência fundamental do piso deveria ser no mínimo igual a 9,2 Hz, levando em consideração a atividade aeróbica praticada sobre ele, segundo Murray. As Figs. 7 e 8 mostra alguns dos modos de vibração que podem ser excitados pelo posicionamento do carregamento dinâmico (Fig. 5).

Tabela 1. Frequências naturais do modelo estrutural investigado

Modos de vibração	Frequências naturais (Hz)	Massa modal/massa total da estrutura (%)	Modos de vibração	Frequências naturais (Hz)	Massa modal/massa total da estrutura (%)
f_{01}	6,29	11,55	f_{09}	7,33	16,25
f_{02}	6,52	13,03	f_{10}	7,34	19,53
f_{03}	6,53	20,60	f_{11}	7,52	32,42
f_{04}	6,60	13,98	f_{12}	7,59	20,51
f_{05}	6,98	18,08	f_{13}	9,30	16,81
f_{06}	7,10	12,20	f_{14}	9,48	24,02
f_{07}	7,27	19,51	f_{15}	9,54	25,41
f_{08}	7,29	17,32	f_{16}	10,04	35,61



a) 1° Modo de vibração ($f_{01}=6,29\text{Hz}$)



b) 2° Modo de vibração ($f_{02}=6,52\text{Hz}$)

Figura 7. Modos de vibração do modelo estrutural investigado

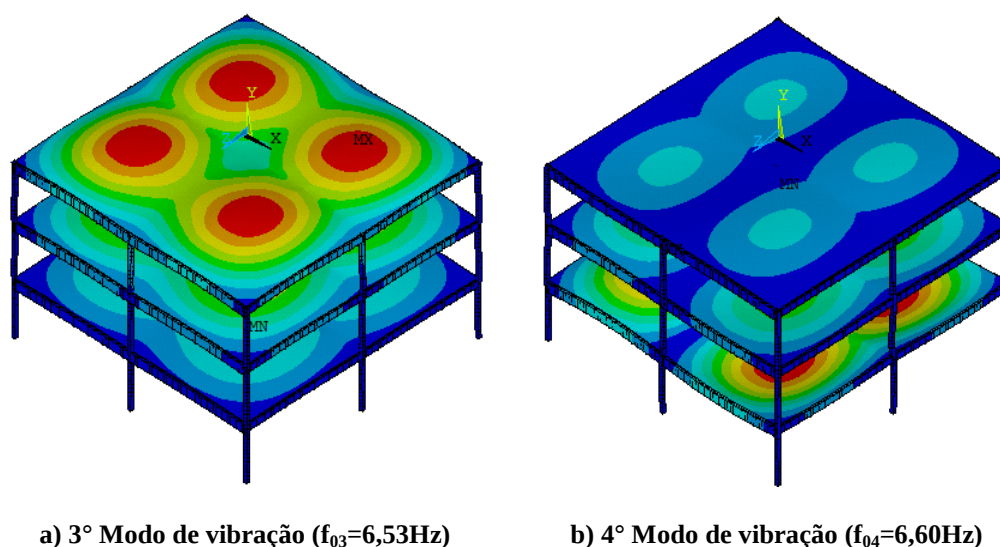


Figura 8. Modos de vibração do modelo estrutural investigado

Pode-se notar que a análise modal pode avaliar a ocorrência de vibrações excessivas nos sistemas estruturais, e visando evitá-las, é recomendável que a frequência fundamental de um piso misto deva ser em torno de 9,2 Hz ou 8,4 Hz para atividades rítmicas, segundo o SCI (2009). Neste sentido, observa-se que a estrutura se encontra suscetível a estas vibrações por estar com sua frequência fundamental ($f_{01}=6,29\text{Hz}$) abaixo do recomendável.

6 ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO

Neste trabalho foram avaliados os níveis de conforto humano dos pisos mistos da estrutura em termos da aceleração de pico no regime permanente (steady-state), a_p , acelerações filtradas rms, $a_{w,rms}$, e valores de dose de vibração, VDV. A Tabela 2 apresenta os valores limites RMS e VDV. O limite referente para as acelerações de pico (a_p) é igual a 0,5 m/s^2 (5%g), associado a atividades aeróbicas (Murray et al. 2003).

Tabela 2. Critérios de conforto humano para atividades humanas rítmicas

SCI (2009)	Ellis e Littler	Setareh	Reação das pessoas
$a_{w,rms}$ (m/s^2)	VDV ($\text{m/s}^{1,75}$)	VDV ($\text{m/s}^{1,75}$)	
< 0,35	< 0,66	< 0,50	Limite aceitável
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	Provável condição de pânico

Um extenso estudo paramétrico foi realizado, de modo a sintonizar as doze primeiras frequências naturais da edificação com o 3º harmônico da frequência de excitação das atividades aeróbicas, a fim de induzir a ressonância (situação mais desfavorável). Portanto, realizou-se a análise de doze casos de carregamento, tanto para o modelo de carregamento I, quanto para o modelo de carregamento II, totalizando vinte e quatro casos estudados. Na Tabela 3 e 4 estão descritos os parâmetros utilizados no modelo de carregamento I e II, respectivamente.

Tabela 3. Parâmetros utilizados no modelo de carregamento I

Casos	T_c (s)	T_s (s)	T (s)	f_{01} (Hz)	f_{02} (Hz)	f_{03} (Hz)
f_{01}	0,34	0,138	0,478	2,09	4,18	6,28
f_{02}	0,34	0,120	0,460	2,17	4,35	6,52
f_{03}	0,34	0,119	0,459	2,18	4,36	6,54
f_{04}	0,34	0,115	0,455	2,20	4,40	6,59
f_{05}	0,34	0,090	0,430	2,33	4,65	6,98
f_{06}	0,34	0,082	0,422	2,37	4,74	7,11
f_{07}	0,34	0,072	0,412	2,43	4,85	7,28
f_{08}	0,34	0,071	0,411	2,43	4,87	7,30
f_{09}	0,34	0,069	0,409	2,44	4,89	7,33
f_{10}	0,34	0,069	0,409	2,44	4,89	7,33
f_{11}	0,34	0,059	0,399	2,51	5,01	7,52
f_{12}	0,34	0,055	0,395	2,53	5,06	7,59
CD=0,93; Kp=2,78						

Tabela 4. Parâmetros utilizados no modelo de carregamento II

$\emptyset_n$	n		
	1	2	3
	$\pi/6$	$-\pi/6$	$\pi/2$
$\nu= 50$ pessoas			

As respostas dinâmicas da estrutura (acelerações de pico, aceleração RMS e VDV) para as doze frequências (Tabela 1) nos nós representados pela Fig. 5, estão apresentadas nas Tabelas 5 a 10 para os modelos de carregamento I e II. Deve ser observado que os valores escritos em negrito apontam resultados que excederam os limites recomendados pelo critério de conforto humano.

Tabela 5. Resposta dinâmica do sistema estrutural. Modelo de carregamento I. Aceleração de pico (m/s²)

Casos	Aceleração de pico (m/s ²)					
	1° andar		2° andar		3° andar	
	A e C	B e D	E e G	F e H	I e K	J e L
f ₀₁	0,12	0,06	0,29	0,66	0,15	0,16
f ₀₂	0,50	0,26	0,71	1,56	0,46	0,49
f ₀₃	0,52	0,31	0,70	1,58	0,48	0,51
f ₀₄	0,41	0,38	0,65	1,44	0,46	0,42
f ₀₅	0,10	0,12	0,44	0,70	0,30	0,29
f ₀₆	0,11	0,13	0,46	0,69	0,31	0,29
f ₀₇	0,13	0,13	0,49	0,69	0,34	0,34
f ₀₈	0,13	0,13	0,51	0,68	0,35	0,35
f ₀₉	0,14	0,13	0,55	0,68	0,37	0,37
f ₁₀	0,14	0,13	0,55	0,68	0,37	0,37
f ₁₁	0,34	0,34	0,90	1,01	0,55	0,55
f ₁₂	0,42	0,41	0,72	1,14	0,41	0,42

Tabela 6. Resposta dinâmica do sistema estrutural. Modelo de carregamento I. Aceleração RMS (m/s²)

Casos	Aceleração RMS (m/s ²)					
	1° andar		2° andar		3° andar	
	A e C	B e D	E e G	F e H	I e K	J e L
f ₀₁	0,05	0,02	0,11	0,30	0,06	0,07
f ₀₂	0,29	0,17	0,45	0,90	0,30	0,30
f ₀₃	0,30	0,19	0,46	0,90	0,31	0,31
f ₀₄	0,25	0,23	0,44	0,79	0,30	0,27
f ₀₅	0,04	0,06	0,23	0,26	0,14	0,13
f ₀₆	0,04	0,06	0,23	0,22	0,15	0,14
f ₀₇	0,05	0,05	0,29	0,23	0,19	0,18
f ₀₈	0,05	0,06	0,30	0,24	0,19	0,19
f ₀₉	0,05	0,06	0,33	0,26	0,21	0,21
f ₁₀	0,05	0,06	0,33	0,26	0,21	0,21
f ₁₁	0,21	0,21	0,54	0,55	0,35	0,35
f ₁₂	0,25	0,25	0,49	0,58	0,28	0,28

Tabela 7. Resposta dinâmica do sistema estrutural. Modelo de carregamento I. VDV (m/s²)

Casos	VDV (m/s1,75)					
	1° andar		2° andar		3° andar	
	A e C	B e D	E e G	F e H	I e K	J e L
f ₀₁	0,11	0,05	0,24	0,66	0,14	0,15
f ₀₂	0,62	0,36	0,93	1,87	0,61	0,63
f ₀₃	0,63	0,40	0,95	1,89	0,64	0,64
f ₀₄	0,52	0,50	0,89	1,65	0,62	0,56
f ₀₅	0,09	0,13	0,47	0,59	0,29	0,27
f ₀₆	0,09	0,12	0,48	0,51	0,30	0,28
f ₀₇	0,11	0,12	0,58	0,50	0,38	0,37
f ₀₈	0,11	0,12	0,60	0,52	0,39	0,38
f ₀₉	0,12	0,13	0,66	0,56	0,43	0,42
f ₁₀	0,12	0,13	0,66	0,56	0,43	0,42
f ₁₁	0,44	0,44	1,10	1,17	0,63	0,63
f ₁₂	0,53	0,53	0,99	1,23	0,56	0,56

Tabela 8. Resposta dinâmica do sistema estrutural. Modelo de carregamento II. Aceleração de pico (m/s²)

Casos	Aceleração de pico (m/s ²)					
	1° andar		2° andar		3° andar	
	A e C	B e D	E e G	F e H	I e K	J e L
f ₀₁	0,34	0,21	1,00	1,91	0,49	0,50
f ₀₂	1,43	0,77	2,04	4,20	1,34	1,41
f ₀₃	1,47	0,86	2,03	4,15	1,36	1,43
f ₀₄	1,10	1,06	1,86	3,31	1,24	1,15
f ₀₅	0,34	0,44	1,39	2,10	0,80	0,78
f ₀₆	0,38	0,34	1,48	2,13	0,87	0,84
f ₀₇	0,36	0,38	1,55	2,19	0,93	0,88
f ₀₈	0,37	0,38	1,55	2,19	0,94	0,88
f ₀₉	0,43	0,39	1,55	2,20	0,98	0,89
f ₁₀	0,43	0,39	1,55	2,21	0,99	0,90
f ₁₁	0,95	0,94	2,19	2,53	1,42	1,43
f ₁₂	1,18	1,17	2,10	2,61	1,25	1,28

Tabela 9. Resposta dinâmica do sistema estrutural. Modelo de carregamento II. Aceleração RMS (m/s²)

Casos	Aceleração RMS (m/s ²)					
	1° andar		2° andar		3° andar	
	A e C	B e D	E e G	F e H	I e K	J e L
f ₀₁	0,16	0,06	0,39	0,93	0,22	0,25
f ₀₂	0,87	0,48	1,37	2,67	0,89	0,90
f ₀₃	0,88	0,52	1,38	2,68	0,92	0,92
f ₀₄	0,72	0,66	1,26	2,22	0,87	0,78
f ₀₅	0,15	0,21	0,59	0,60	0,37	0,35
f ₀₆	0,15	0,16	0,59	0,50	0,37	0,35
f ₀₇	0,15	0,15	0,72	0,50	0,46	0,45
f ₀₈	0,15	0,15	0,74	0,52	0,48	0,47
f ₀₉	0,15	0,15	0,82	0,59	0,54	0,53
f ₁₀	0,16	0,16	0,83	0,60	0,55	0,53
f ₁₁	0,59	0,60	1,49	1,48	0,97	0,97
f ₁₂	0,73	0,73	1,44	1,64	0,83	0,83

Tabela 10. Resposta dinâmica do sistema estrutural. Modelo de carregamento II. VDV (m/s^{1,75})

Casos	VDV (m/s ^{1,75})					
	1° andar		2° andar		3° andar	
	A e C	B e D	E e G	F e H	I e K	J e L
f ₀₁	0,34	0,15	0,82	1,89	0,47	0,49
f ₀₂	1,84	1,01	2,79	5,47	1,83	1,86
f ₀₃	1,88	1,10	2,83	5,52	1,89	1,92
f ₀₄	1,48	1,39	2,54	4,48	1,76	1,59
f ₀₅	0,35	0,26	1,24	1,45	0,78	0,72
f ₀₆	0,34	0,34	1,27	1,23	0,80	0,75
f ₀₇	0,34	0,34	1,47	1,25	0,95	0,91
f ₀₈	0,34	0,34	1,52	1,27	0,98	0,95
f ₀₉	0,36	0,35	1,66	1,39	1,09	1,06
f ₁₀	0,36	0,35	1,68	1,40	1,10	1,07
f ₁₁	1,24	1,25	3,03	3,06	1,97	1,96
f ₁₂	1,54	1,54	2,90	3,41	1,67	1,67

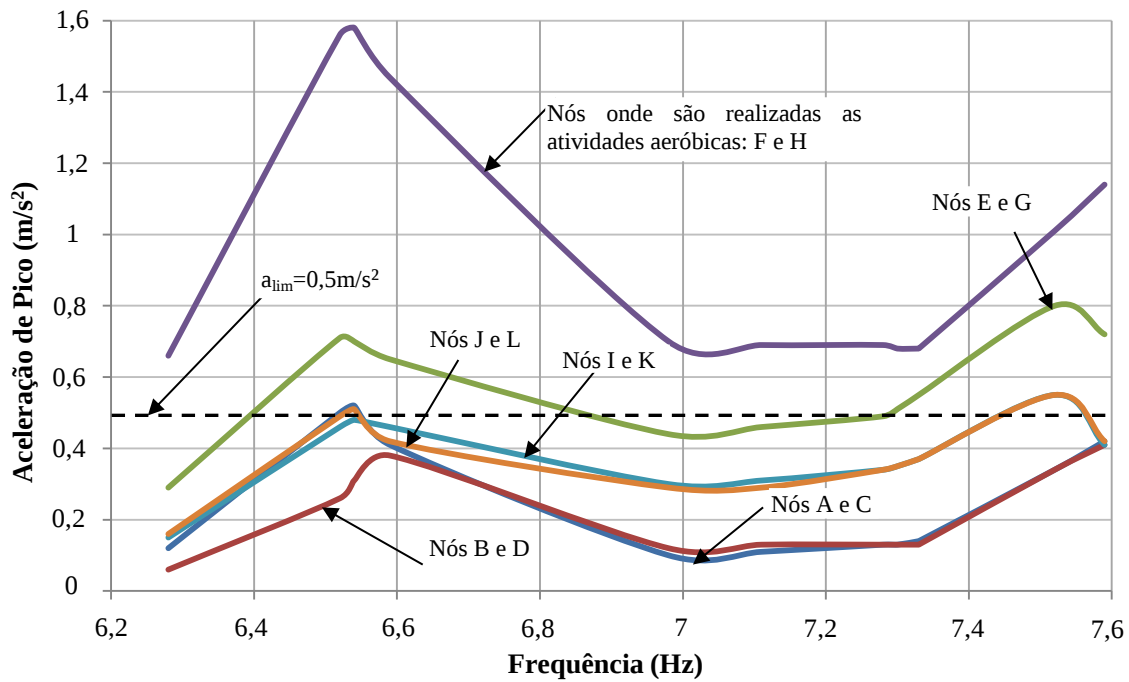


Figura 9. Resposta dinâmica da estrutura no modelo de carregamento I

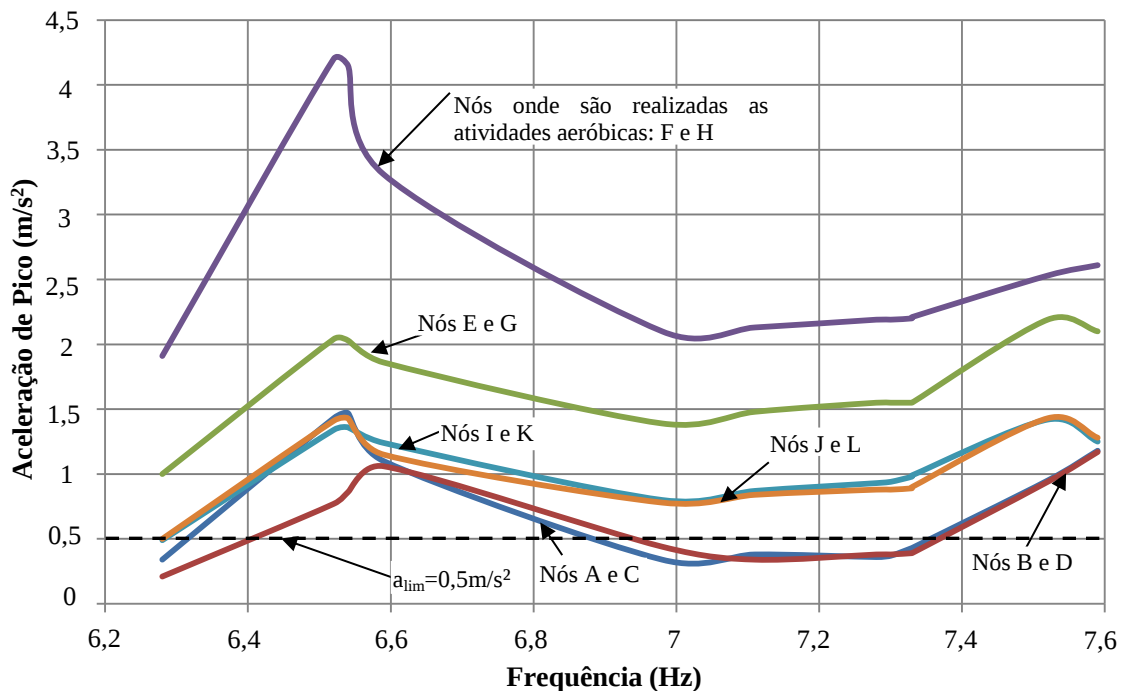


Figura 10. Resposta dinâmica da estrutura no modelo de carregamento II

A partir das respostas dinâmicas obtidas pela aplicação dos modelos de carregamento I e II, no intuito de simular a atividade humana rítmica (aeróbica) realizada por cinquenta pessoas, observa-se que os maiores valores de aceleração (pico, RMS e VDV) ocorrem no 2º modo de vibração, em ambos os carregamentos nos nós F e H. Estes nós representam os pontos onde a atividade rítmica foi realizada.

Os resultados apresentados pelo modelo de carregamento I (Tabelas 5 a 7) apontam as maiores amplitudes da resposta dinâmica nos nós (E, F, G e H) referentes ao 2º andar, excedendo o limite de conforto humano recomendado e, portanto, causando vibrações excessivas na estrutura. Em relação à aceleração RMS, a realização das atividades aeróbicas no 2º andar não afeta os outros andares, ao contrário do que indica a aceleração VDV, onde se verificou um nível de desconforto humano considerado perturbador nestes pavimentos nos casos f_{01} , f_{02} , f_{03} , f_{04} , f_{11} e f_{12} .

Analisando as respostas dinâmicas pela aplicação do modelo de carregamento II, nota-se que somente nos casos f_{01} , f_{05} a f_{10} , apresentaram níveis de vibração aceitáveis, respeitando os limites recomendados de aceleração de pico, RMS e VDV. Por outro lado, os outros casos indicaram vibrações perturbadoras para o 2º e 3º andar, exceto para os nós F e H, onde a atividade humana estava ocorrendo e apresentaram vibrações inaceitáveis nos casos f_{02} e f_{03} .

As Figs. 9 e 10 mostram de maneira mais ilustrativa as respostas dinâmicas da estrutura mista para os doze casos estudados. Pode-se notar que o modelo de carregamento II apresentou valores maiores do que o modelo de carregamento I. Isto significa que os coeficientes de Fourier são mais energéticos do que a função desenvolvida por Faisca (2003). Deste modo, a transmissibilidade das vibrações oriundas de atividades humanas rítmicas (aeróbica) para o 1º e 3º andar alcançaram maiores áreas e intensidades no modelo de carregamento II do que o modelo de carregamento I.

Deve-se enfatizar que a percepção a estas vibrações variam conforme o posicionamento e atividades praticadas sobre a estrutura, como exemplo situações de pessoas em pé paradas ou praticando outras atividades podem apresentar uma sensibilidade maior às vibrações. De acordo com a NBC (Norma nacional da construção civil do Canadá) *apud* AISC (2009), os critérios de conforto humano para aceleração de pico em escritório ou residência e sala de jantar variam de 0,04 a 0,07m/s² e 0,15 a 0,25m/s², respectivamente.

A Fig. 11 mostra a resposta dinâmica para os nós F e H sintonizados ao 2º modo de vibração (f_{02}) no domínio do tempo e frequência.

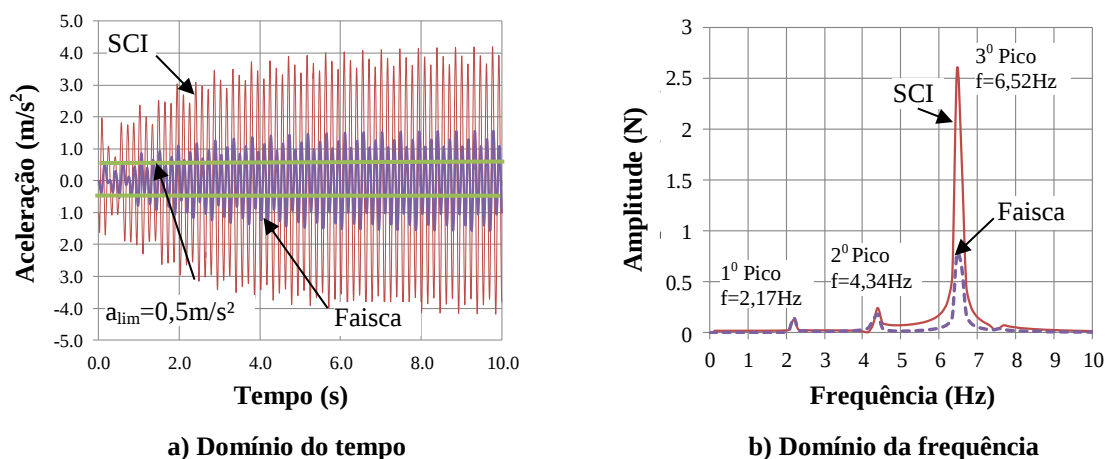


Figura 11. Resposta dinâmica do 2º andar. Nós F e H ($f_{02} = 6.52 \text{ Hz}$)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho investiga o comportamento dinâmico de uma edificação de três andares, que mede 20m x 20m, submetida às atividades rítmicas (aeróbica) realizadas por cinquenta pessoas no 2º andar. A estrutura foi modelada numericamente pelo programa ANSYS, de onde também foram obtidas as respostas dinâmicas em termos da aceleração de pico, RMS e VDV pelos modelos de carregamento I e II.

Verificou-se que as frequências naturais do sistema estrutural variam de 6,29 Hz a 7,59 Hz. Desta maneira, é observado que o 3º harmônico das atividades aeróbicas também se encontram nesta mesma faixa, e, portanto, tornando a estrutura mais suscetível ao fenômeno da ressonância. Consequentemente, podendo ocasionar vibrações excessivas capaz de gerar um desconforto aos usuários.

Em relação às respostas dinâmicas, o pior caso observado refere-se ao 2º e 3º modo de vibração, justamente nos nós aonde foram realizadas as atividades humanas rítmicas. Os valores obtidos foram de 1,58 m/s²; 0,90m/s² e 1,89m/s^{1,75} para o modelo de carregamento I (aceleração de pico, aceleração RMS e VDV, respectivamente) e de 4,20 m/s²; 2,68m/s² e 5,52m/s^{1,75} para o modelo de carregamento II (aceleração de pico, aceleração RMS e VDV, respectivamente). Tais valores indicam níveis de vibrações extremamente desconfortáveis aos praticantes da atividade aeróbica, em ambos os modelos de carregamento, segundo normas e recomendações de projeto.

Além disso, a análise dinâmica revela a transmissibilidade das vibrações para o 1º e 3º andar, e também nas áreas adjacentes ao local da realização das atividades rítmicas. Foram encontrados níveis de vibração perturbadora nestas áreas e assim afetando as pessoas que não estão envolvidas na prática de atividades rítmicas (aeróbicas). Desta maneira, recomenda-se afastar as frequências naturais da estrutura da faixa de frequência das atividades rítmica ou instalar um sistema de controle de vibração para reduzir estas vibrações e garantir o conforto humano dos usuários.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ.

REFERÊNCIAS

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, Using FLEXlm v10.8.0.7 build 26147, Customer 00489194.

Bachmann H., Ammann W.J., Deischl F., Eisenmann J., Floegl J., Hirsch G.H., et al. , 1995. *Vibration problems in structures – practical guidelines*. Basel (Switzerland):Institut für Baustatik und Konstruktion, Birkhäuser.

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.

Gaspar, C.M.R., 2013, “Dynamic Analysis and Vibration Control of Buildings' Floors when Submitted to Human Rhythmic Activities.”, MSc Dissertation (In Portuguese), Civil Engineering Post-graduate Programme, PGE CIV, State University of Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brazil.

International Standard Organization, ISO 10137, 2007. Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations.

Murray T.M., Allen D.E., Ungar E.E., 2003. *Floor Vibrations due to Human Activity*”, *Steel Design Guide Series*. American Institute of Steel Construction, AISC, Chicago, USA.

Setareh, M., 2012. “Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity”, in Proceedings of the Institution of Civil Engineers – *Structures and Buildings* 165(SB5): 219–231.

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