



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Fernanda Fernandes Campista

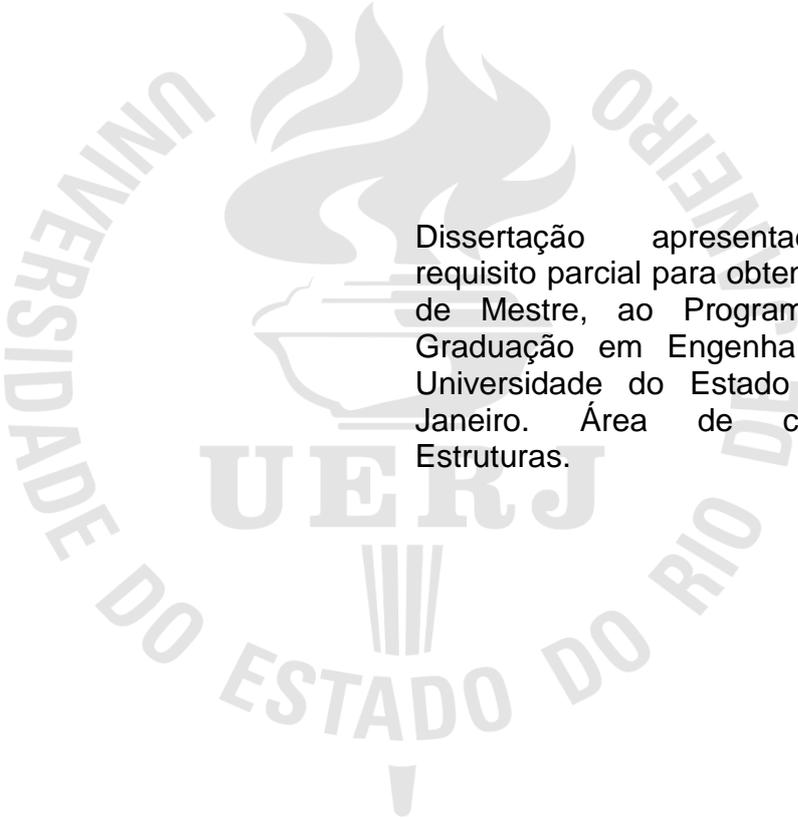
Análise de vibrações e estudo de conforto humano sobre pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas

Rio de Janeiro

2015

Fernanda Fernandes Campista

Análise de vibrações e estudo de conforto humano sobre pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva

Rio de Janeiro

2015

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C197 Campista, Fernanda Fernandes.
Análise de vibrações e estudo de conforto humano sobre
pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas
rítmicas / Fernanda Fernandes Campista. - 2015.
117f.

Orientador: José Guilherme Santos da Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Civil. 2. Estruturas mistas de aço e concreto -
Dissertações. 2. Conforto humano - Dissertações. I. Silva, José
Guilherme Santos da. II. Universidade do Estado do Rio de
Janeiro. III. Título.

CDU 624.016

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou
parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Fernanda Fernandes Campista

Análise de vibrações e estudo de conforto humano sobre pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 03 de março de 2015.

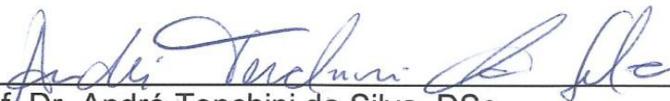
Banca Examinadora:



Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva, DSc - Presidente / Orientador
Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Dr. Francisco José da Cunha Pires Soeiro, PhD.
Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Dr. André Tenchini da Silva, DSc.
Faculdade de Engenharia - UERJ



Prof. Dr. Raul Rosas e Silva, PhD.
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Rio de Janeiro

2015

DEDICATÓRIA

A minha família e Deus

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Ronald e Rosalva, que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos, pelo amor incondicional, me dando todo o apoio e força necessários para me fazer seguir sempre em frente.

A minha irmã Danielle, que sempre me apoiou e sempre esteve disposta a me ajudar no que fosse preciso.

Aos amigos de faculdade, que compartilharam toda sua experiência, dificuldades, momentos tristes e alegres durante a graduação. Sem a nossa união não iríamos conseguir chegar tão longe.

Ao meu orientador, Professor José Guilherme, que confiou em minha capacidade, pelo incentivo, motivação, orientação e amizade.

Para encontrar a si mesmo, pense por si mesmo.

Sócrates

RESUMO

Campista, Fernanda Fernandes. *Análise de vibrações e estudo de conforto humano sobre pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas*. 2015. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Este trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) sob a ação de cargas provenientes das atividades humanas rítmicas, especificamente a prática de ginástica aeróbica, sob o ponto de vista do conforto humano. Tal avaliação torna-se necessária por crescentes problemas estruturais associados às vibrações excessivas, decorrentes da concepção de sistemas estruturais com baixos níveis de amortecimento e com frequências naturais cada vez mais baixas e bastante próximas das faixas de frequência das excitações associadas às atividades humanas rítmicas. O modelo estrutural investigado baseia-se em um piso misto (aço-concreto) submetido a aulas de ginástica aeróbica. A modelagem numérica do piso misto investigado foi realizada com base no emprego do programa ANSYS e foram utilizadas técnicas de discretização por meio do método dos elementos finitos (MEF). As cargas aplicadas sobre o piso, oriundas das atividades aeróbicas, são simuladas através de dois modelos de carregamentos dinâmicos distintos. Uma extensa análise paramétrica foi desenvolvida sobre o modelo estrutural investigado e a resposta dinâmica do sistema foi obtida, em termos dos deslocamentos e das acelerações, e comparada com os limites recomendados por normas e critérios de projeto. A resposta dinâmica do piso estudado viola os critérios de projeto relativos ao conforto humano e indica níveis de vibrações excessivas nos casos de carregamento dinâmicos analisados nesta dissertação.

Palavras-chave: Pisos mistos (aço-concreto), Atividades humanas rítmicas, Conforto humano, Vibrações excessivas, Modelagem numérica.

ABSTRACT

This study aims to assess the dynamic behaviour of steel-concrete composite floors when subjected to human rhythmic activities, specifically the practice of aerobics, from the point of view of human comfort. This evaluation is required due to the increasing of the structural problems associated with excessive vibrations, related to structural systems designed with low levels of damping and low natural frequencies, close to the excitation frequencies associated with human rhythmic activities. The investigated structural system is composed by a steel-concrete composite floor subjected to aerobics. The proposed analysis methodology adopted the usual mesh refinement techniques present in the finite element method (FEM) simulations implemented in the ANSYS program. The loads applied on the floor, related to aerobics, are simulated using two different dynamic loading models. An extensive parametric analysis was developed on the investigated structural model and the system dynamic response was obtained, based on displacement and accelerations values, and compared with the recommended limits by standards and design criteria. The studied floor dynamic response violated the human comfort design criteria and indicated levels of excessive vibration in the investigated dynamic loading cases along this dissertation.

Keywords: Steel-concrete composite floor, Human rhythmic activities, Human comfort, Excessive vibrations, Numerical modelling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Frequências características do corpo humano (SOEIRO, 2011)	22
Figura 2 - Direções das vibrações (ISO 2631-1, 1997)	37
Figura 3 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração no eixo z (ISO 10137, 2007, p. 37)	40
Figura 4 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração nos eixos x e y (ISO 10137, 2007, p. 38)	40
Figura 5 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração em direção combinada nos eixos x, y, z (ISO 10137, 2007, p. 39)	41
Figura 6 - Valores de aceleração de pico recomendados para o conforto humano devido a atividades humanas (AISC, 2003, p. 7)	48
Figura 7 - Movimentação do corpo em um salto livre (FAISCA, 2003).....	53
Figura 8 - Força gerada na estrutura por movimento de saltos livres no domínio do tempo (FAISCA, 2003)	53
Figura 9 - Força vertical gerada por um indivíduo saltando (ISO, 2007, p. 19)	54
Figura 10 - Comparação do sinal experimental com as funções semisseno e Hanning (FAISCA, 2003)	55
Figura 11 - Características da função Hanning	56
Figura 12 - Coeficiente de defasagem (CD) das atividades estudadas (FAISCA, 2003)	57
Figura 13 - Sinais de força no tempo e espectro de frequência para ginástica aeróbica. Modelo de carregamento I.....	59
Figura 14 - Sinais de força no tempo e espectro de frequência para ginástica aeróbica. Modelo de carregamento II.....	62
Figura 15 - Comparação dos espectros de frequências dos modelos de carregamento (MC-I e MC-II) referente a 1 pessoa praticando ginástica aeróbica.....	63
Figura 16 - Aproximação dos picos da Transformada de Fourier.....	64
Figura 17 - Modelo estrutural do piso misto (aço-concreto). Dimensões em metros.....	67
Figura 18 - Seção genérica dos perfis metálicos.....	68
Figura 19 - Quatro situações de indivíduos praticando atividade aeróbica. Dimensões em metros	69

Figura 20 - Localização dos nós analisados no piso misto.	70
Figura 21 - Elemento BEAM44 (ANSYS, 2007)	72
Figura 22 - Excentricidade entre a laje a viga	72
Figura 23 - Elemento SHELL63 (ANSYS, 2007)	73
Figura 24 - Elemento COMBIN7 (ANSYS, 2007)	73
Figura 25 - Elemento COMBIN39 (ANSYS, 2007)	74
Figura 26 - Modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto) (ANSYS, 2007)	75
Figura 27 - Vista isométrica do modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto) (ANSYS, 2007)	76
Figura 28 - Vista superior do modelo em elementos finitos (aço-concreto) (ANSYS, 2007)	76
Figura 29 - Vista do plano XY do modelo em elementos finitos (aço-concreto) (ANSYS, 2007)	77
Figura 30 - Vista do plano ZY do modelo em elementos finitos (aço-concreto) (ANSYS, 2007)	77
Figura 31 - Deslocamentos estáticos do piso misto (aço-concreto)	81
Figura 32 - Diagrama de momento fletor do piso misto.....	82
Figura 33 - Diagrama de momento fletor das vigas principais do piso misto	83
Figura 34 - Diagrama de momento fletor das vigas secundárias do piso misto	83
Figura 35 - 1° ao 8° modo de vibração do piso misto investigado.....	85
Figura 36 - 9° ao 16° modo de vibração do piso misto investigado.....	86
Figura 37 - Análise harmônica do piso misto nos nó F e J (aço-concreto).....	88
Figura 38 - Análise harmônica do piso misto nos nó G e K (aço-concreto).....	89
Figura 39 - Resposta dinâmica do piso misto para 8 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I	91
Figura 40 - Resposta dinâmica do piso misto para 16 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I	91
Figura 41 - Resposta dinâmica do piso misto para 32 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I	92
Figura 42 - Resposta dinâmica do piso misto para 64 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I	92
Figura 43 - Resposta dinâmica do piso misto para 8 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II	92

Figura 44 - Resposta dinâmica do piso misto para 16 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II	93
Figura 44 - Resposta dinâmica do piso misto para 32 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II	93
Figura 46 - Resposta dinâmica do piso misto para 64 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II	93
Figura 47 - Resposta dinâmica no domínio da frequência do piso misto para 8 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I.....	95
Figura 48 - Resposta dinâmica do piso misto para 16 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I	95
Figura 49 - Resposta dinâmica do piso misto para 32 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I	95
Figura 50 - Resposta dinâmica do piso misto para 64 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I	96
Figura 51 - Resposta dinâmica do piso misto para 8 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II	96
Figura 52 - Resposta dinâmica do piso misto para 16 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II	96
Figura 53 - Resposta dinâmica do piso misto para 32 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II	97
Figura 54 - Resposta dinâmica do piso misto para 64 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II	97
Figura 55 - Quatro casos de pessoas praticando atividade aeróbica. Modelo de carregamento I	103
Figura 56 - Quatro casos de pessoas praticando atividade aeróbica. Modelo de carregamento II	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas (NBR 6118, 2007, p. 173).....	35
Tabela 2 - Faixas dos fatores de multiplicação usados em muitos países para magnitudes satisfatórias específicas de vibrações de edifícios com respeito à resposta humana (ISO 10137, 2007, p. 34).....	38
Tabela 3 - Valores de dose de vibração ($m/s^{1.75}$) acima dos quais vários níveis de comentários adversos podem ser esperados em edifícios residenciais (ISO 10137, 2007, p. 35)	42
Tabela 4 - Valores de dose de vibração ($m/s^{1.75}$) que podem resultar na probabilidade de comentários adversos em edifícios residenciais (BS 6472-1, 2008, p. 12)	45
Tabela 5 - Faixas de frequências de atividades humanas (AISC, 2003, p. 12).....	47
Tabela 6 - Carregamento estimado durante atividades rítmicas (AISC, 2003, p. 38)	49
Tabela 7 - Aplicação do critério de projeto de acordo com a equação (12) para atividades rítmicas (AISC, 2003, p. 39)	51
Tabela 8 - Valores de coeficiente de defasagem para ginástica aeróbica (FAISCA, 2003)	58
Tabela 9 - Parâmetros para representação de atividades rítmicas (FAISCA, 2003) .	58
Tabela 10 - Valores dos coeficientes de Fourier e diferença de fase.....	61
Tabela 11 - Características geométricas dos das vigas e colunas. Dimensões em milímetros.....	68
Tabela 12 - Deslocamentos dos nós de análise do piso misto.....	81
Tabela 13 - Valores dos momentos fletores máximos positivos e negativos do piso misto.....	83
Tabela 14 - Frequências naturais do piso misto (aço-concreto).....	84
Tabela 15 - Frequências naturais recomendadas para atividade aeróbica	87
Tabela 16 - Parâmetros do modelo de carregamento I (MC-I)	90
Tabela 17 - Critérios de conforto humano para atividades humanas rítmicas.....	99
Tabela 18 - Resposta dinâmica dos modelos de carregamento para 8 pessoas	99

Tabela 19 - Resposta dinâmica dos modelos de carregamento para 16 pessoas ..	100
Tabela 20 - Resposta dinâmica dos modelos de carregamento para 32 pessoas. .	100
Tabela 21 - Resposta dinâmica dos modelos de carregamento para 64 pessoas ..	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADS	Atenuador dinâmico sintonizado
AISC	American Institute of Steel Construction
ANSYS	Swanson Analysis Systems
BS	British Standards Institution
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Norma Brasileira
SCI	The Steel Construction Institute
TMD	Tuned mass damper

LISTA DE SÍMBOLOS

a_0/g	aceleração limite
a_i	aceleração de pico para o i-ésimo harmônico
a_m	máxima aceleração efetiva
a_p/g	razão entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade
a_w	aceleração rms ponderada
c	Amortecimento do atenuador
c_a	Amortecimento do atenuador
c_c	amortecimento crítico do atenuador
CD	Coeficiente de defasagem
cm	Centímetro
eVDV	valor de dose de vibração estimado
f	frequência da atividade
$f_{crítica}$	frequência crítica
f_a	Frequência do atenuador
f_n	frequência natural da estrutura
f_{opt}	relação ótima entre a frequência do atenuador e da estrutura
f_p	frequência do passo da atividade
f_r	relação entre a frequência do atenuador e da estrutural principal
$F(t)$	força representativa da atividade humana ao longo do tempo
$F(t)/Q$	Força normalizada em relação ao peso de uma pessoa
g	aceleração da gravidade
g_r	relação entre a frequência de excitação e da estrutural principal
Hz	Hertz
i	múltiplo harmônico da frequência do passo
k	Rigidez do atenuador
k	constante de multiplicação para atividades rítmicas
K	Rigidez da estrutura principal
K_p	Coeficiente de impacto
kPa	Quilopascal
L	menor vão do piso
m	Massa do atenuador

m	Metro
mm	Milímetros
m/s ^{1,75}	metro por segundo elevado a 1,75 (um vírgula setenta e cinco)
m/s ²	metro por segundo ao quadrado
M	Massa da estrutura principal
massa _j	j-ésimo termo da diagonal da matriz de massa da estrutura
N	Newton
P	peso do indivíduo
P _o	Força externa
psf	libra força por pé ao quadrado (<i>pounds per square foot</i>)
rms	valor quadrático médio (<i>root mean square</i>)
rmq	root mean quad
s	Segundo
t	Tempo
T	período de tempo
T	Período da atividade
T _c	Período de contato
t _{day}	duração de exposição por dia
t _n	duração da vibração para “n” episódios
u _{jk}	j-ésimo componente relativo à coordenada modal do modo “k”
VDV	valor de dose de vibração (<i>vibration dose value</i>)
VDV _{b/d, dia/noite}	valor de dose de vibração em função de “w _b ” ou “w _d ” e o período do dia (dia ou noite)
VDV _{b/d, tn}	valor de dose de vibração em função de “w _b ” ou “w _d ” e a duração da vibração “t _n ”
VDV _{b/d, τ}	valor de dose de vibração em função de “w _b ” ou “w _d ” e a amostra representativa de tempo “τ”
W _b	coeficiente de ponderação vertical
W _d	coeficiente de ponderação horizontal
w _p	carga efetiva por unidade de área das pessoas distribuídas sobre o piso
w _t	carga total por unidade de área do piso, incluindo os ocupantes
x ₁	deslocamento da estrutura principal
x ₂	deslocamento do atenuador

x_{st}	deslocamento estático da estrutural principal
α_i	coeficiente de fourier associado ao i-ésimo harmônico da atividade
ξ	taxa de amortecimento modal da estrutura
ξ_a	Relação de amortecimento do atenuador
ξ_{opt}	relação de amortecimento ótimo do atenuador (ADS)
τ	amostra representativa de tempo
ω	Frequência angular da força externa
ω_{0i}	frequência natural circular referente ao modo i
ω_a	frequência natural do atenuador
Ω_n	frequência natural da estrutural principal
μ	relação entre a massa do atenuador e a da estrutura principal
ν	coeficiente de Poisson

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	21
1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
1.1	Análise de vibrações e controle de vibrações de pisos	25
2	CRITÉRIOS E NORMAS DE PROJETO	33
2.1	Norma Brasileira NBR 8800/2008	33
2.2	Norma Brasileira NBR 6118/2007	34
2.3	Norma ISO 10137/2007	36
2.4	Norma inglesa BS 6472-1/2008	42
2.5	Guia do SCI/2009	46
2.6	Guia prático do AISC/2003	46
3	MODELAGEM DAS ATIVIDADES HUMANAS RÍTMICAS	52
3.1	Caracterização das atividades humanas rítmicas	52
3.2	Modelo de Carregamento I (MC-I)(FAISCA,2003)	55
3.3	Modelo de Carregamento II (MC-II)(ELLIS & JI,2004)	60
3.4	Comparação entre os modelos de carregamento I e II (MC-I e MC-II)	63
4	MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO	66
4.1	Descrição do modelo estrutural	66
4.2	Distribuição do carregamento dinâmico	68
5	MODELAGEM NUMÉRICA VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	71
5.1	Descrição dos elementos finitos	71
5.2	Considerações simplificadoras	74
5.3	Modelagem numérico-computacional	75
5.4	Modelagem do amortecimento estrutural	77
6	ANÁLISE ESTÁTICA	80
6.1	Deslocamento Vertical	80
6.2	Momentos Fletores	82
7	FREQUENCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO	84
8	ANÁLISE HARMÔNICA	88
9	ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO	90
9.1	Análise no domínio do tempo	91
9.2	Análise no domínio da frequência	94

9.3	Critérios de avaliação do conforto humano	98
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
10.1	Introdução	106
10.2	Conclusões Alcançadas	106
10.3	Sugestões para trabalhos futuros	108
	REFERÊNCIAS	110

INTRODUÇÃO

A concepção de uma estrutura envolve a adoção de um sistema estrutural adequado às suas características e tendências arquitetônicas, atendendo as exigências do mercado e garantindo a segurança dos usuários.

Atualmente, as estruturas aliam-se tanto a multifuncionalidade das edificações, como prédios residenciais com áreas comerciais, lazer e prática de atividades físicas, quanto tendências arquitetônicas e construtivas pela ampliação de espaços ao projetar estruturas com vãos livres maiores e substituição de elementos até então fixos por desmontáveis, por exemplo, paredes por divisórias. Tais fatos somados as exigências do mercado conduzem a sistemas estruturais complexos. Logo, exigem do engenheiro civil experiência e conhecimento, que aliados ao conhecimento dos materiais e novas técnicas construtivas, buscam a melhor estrutura a ser adotada.

Estas novas características apresentadas anteriormente, levam ao desenvolvimento de projetos com sistemas estruturais cada vez mais flexíveis e esbeltos, resultando em baixos valores de frequências naturais, nos quais se aproximam a faixa de frequências associadas às atividades humanas como andar, correr, saltar e dançar. Somando-se o fato anterior à prática corrente de projetos que consideram as cargas dinâmicas a uma estática equivalente, as construções destinadas a residências, escritórios e academias tornam-se mais suscetíveis a problemas de vibrações excessivas, que geram desde o desconforto humano até mesmo o comprometimento da estrutura.

A percepção humana as vibrações das estruturas encontra-se numa faixa de frequência de 4 a 8 Hz, segundo MURRAY et al. (1997), em virtude dos órgãos internos humanos (coração, fígado, rins e bexiga) possuírem frequências naturais neste intervalo (Murray (1981) e Varela (2004)). Entretanto, a maioria dos sistemas estruturais também se encontram nesta faixa de frequência, tornando-os mais suscetíveis ao fenômeno da ressonância, podendo causar mal-estar e desconforto do usuário. A Figura 1 ilustra as frequências de ressonância do corpo humano.

Considerando-se os fatos citados nos parágrafos anteriores, torna-se necessária à concepção de estruturas que levem em consideração estes efeitos. Assim sendo, o engenheiro civil deve verificar o estado limite de serviço, que neste

trabalho utilizou os critérios desenvolvidos por pesquisadores como Ellis & Littler (2004), Smith et al. (2009); Setareh (2012), sob o ponto de vista do conforto humano em relação a aceleração do piso.

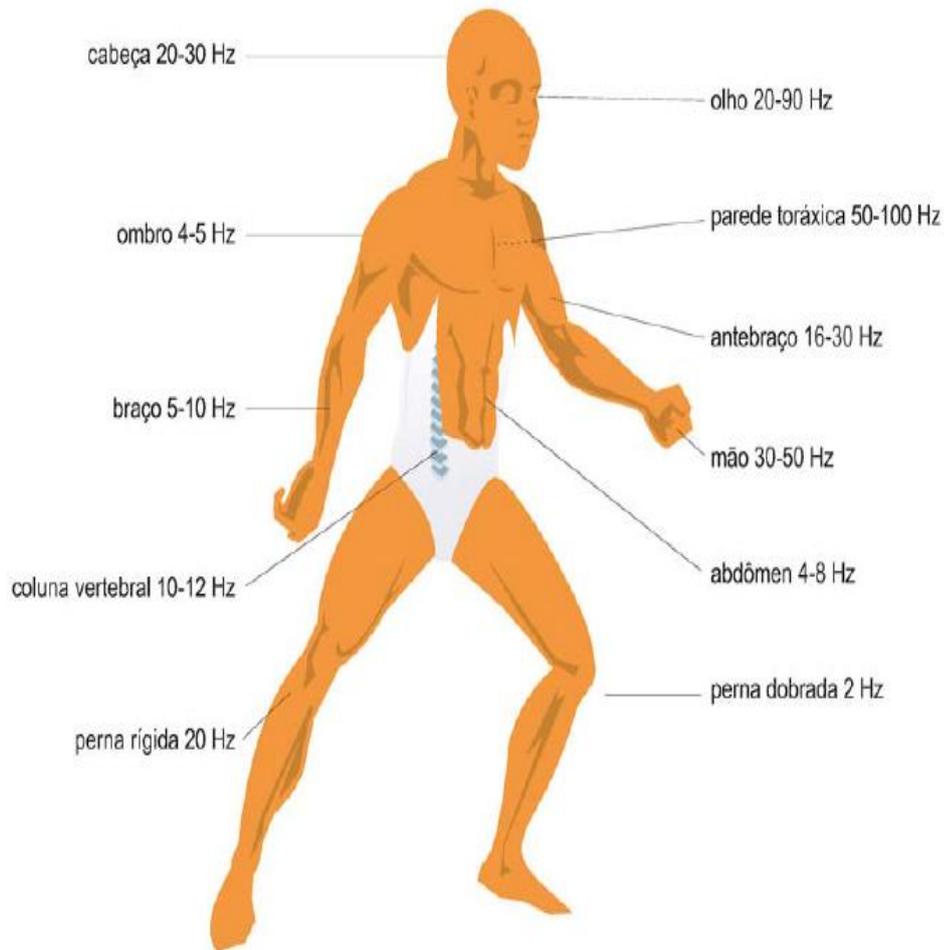


Figura 1 - Frequências características do corpo humano (SOEIRO, 2011)

Motivação

Este trabalho tem intenção de apresentar a importância dos estudos, relacionados às vibrações nas estruturas aos projetistas, de modo a fornecer orientações necessárias à prevenção às vibrações excessivas e reparos futuros na estrutura, além de garantir o conforto dos usuários.

Objetivos

Este trabalho de pesquisa tem o propósito de estudar o comportamento dinâmico de um sistema estrutural referente a um piso misto (aço-concreto), submetido a excitações dinâmicas oriundas de atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica). Estas atividades humanas foram convenientemente representadas matematicamente pelos modelos de carregamento dinâmicos propostos por Faísca (2003) e Ellis e Ji (2004), os quais levam em conta os efeitos de multidão. Deste modo, a resposta dinâmica da estrutura, em regime de serviço, é obtida em termos dos valores das acelerações de pico, acelerações rms e valores de dose de vibração (VDV) e os valores destas grandezas são comparados com os limites estabelecidos por normas e recomendações internacionais de projeto, no que tange ao conforto humano.

Estrutura da dissertação

Com o intuito de atender aos objetivos e a metodologia descritos anteriormente, este trabalho de pesquisa está subdividido em dez capítulos, descritos a seguir:

No capítulo um são apresentados os trabalhos desenvolvidos por diversos autores, referentes ao conforto humano nas estruturas mistas e de concreto, quando são submetidas aos carregamentos dinâmicos provenientes das atividades humanas rítmicas.

No capítulo dois são apresentados os critérios e normas relacionados a avaliação as vibrações dos pisos, sob o ponto de vista do conforto humano.

No capítulo três são apresentadas as metodologias adotadas na modelagem dos carregamentos dinâmicos, assim como as respectivas formulações matemáticas que descrevem a atividade dinâmica. O enfoque deste estudo é o carregamento humano rítmico correspondente à ginástica aeróbica.

No capítulo quatro é descrito o modelo estrutural investigado, apresentando a sua geometria, espessura da laje, as propriedades geométricas das peças e físicas

dos materiais que o compõem. Também está apresentada a distribuição espacial das cargas dinâmicas no piso misto.

O capítulo cinco apresenta os elementos finitos empregados na modelagem da estrutura, bem como suas respectivas características e a modelagem do amortecimento estrutural.

No capítulo seis é apresentada a análise estática do modelo investigado, em termos dos deslocamentos, onde são comparados aos limites recomendados pela norma.

No capítulo sete é realizada a avaliação do comportamento dinâmico do piso misto, através de sua vibração livre, onde foram obtidas suas frequências naturais e seus respectivos modos de vibração.

No capítulo oito é realizada uma análise harmônica, com o objetivo de avaliar os modos de vibração que mais contribuem na resposta dinâmica estrutural.

No capítulo nove são apresentadas as análises do conforto humano no piso misto, através da obtenção das suas acelerações mediante os casos estudados de carregamento, oriundos das atividades aeróbicas, seguidamente os comparando com os critérios utilizados.

No capítulo dez são apresentadas as conclusões obtidas do estudo realizado e critérios, além de algumas propostas para trabalhos futuros.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção aborda a apresentação dos trabalhos de diversos autores relacionados ao tema do conforto humano das estruturas mistas (aço-concreto) e de concreto, abrangendo os procedimentos e metodologias de obtenção e avaliação dos níveis de vibração e o seu controle estrutural.

1.1 Análise de vibrações e controle de vibrações de pisos

Bachmann (1992) estudou casos de passarelas, ginásios, salas de esporte, salas de dança e shows submetidos a carregamentos dinâmicos oriundos de atividades humanas, com a finalidade de estabelecer recomendações visando minimizar as vibrações excessivas das estruturas. As análises realizadas demonstraram que é recomendável, em situações normais, afastar a frequência fundamental da estrutura da frequência da componente harmônica crítica da excitação dinâmica. Além disso, recomendaram-se medidas corretivas as vibrações excessivas e frequências naturais mínimas para diferentes tipos de construções e para diferentes ocupações.

Alves (1997) realizou estudos em uma plataforma rígida, analisando experimentalmente as atividades humanas em tal estrutura. Assim, obteve-se os valores dos coeficientes de Fourier para os primeiros harmônicos da carga dinâmica, de modo que verificou-se a proximidade destes valores com os recomendados pelo CEB (1991). Ainda foi observado a influência das características individuais e tipos de calçados utilizados na realização das atividades na obtenção destes coeficientes de Fourier.

Hanagan e Murray (1997) desenvolveram uma pesquisa sobre a implementação de um sistema de controle ativo baseado em um atenuador eletromagnético transmitindo uma força de controle sobre o sistema estrutural, onde a redução das vibrações por este mecanismo é analisada experimentalmente e analiticamente. Ambos os resultados obtidos apresentaram um aumento do amortecimento estrutural de 2,5% a 40% e segundo o experimento realizado, a

excitação estrutural pelo andar humano, em relação a amplitude do pico de velocidade, reduziu-se em 12% em um sistema estrutural descontrolado.

Em seu trabalho, Murray, Allen e Ungar (1997) desenvolveram o guia AISC (*Floor Vibrations due to Human Activity, Steel Design Guide Series*), onde são apresentados os limites de conforto humano em estruturas submetidas às atividades de caminhar e rítmicas. Este guia contém cálculos analíticos e recomendações, com o propósito de avaliar e minimizar as vibrações das estruturas para serem utilizados pelos engenheiros.

Hanagan e Murray (1998) investigaram a importância do amortecimento estrutural e a utilização de sistemas de controle ativo para reduzir as vibrações excessivas de pisos. Instalou-se um sistema de controle ativo, constituído por um atenuador eletromagnético, em dois pisos destinados para escritório e laboratório de química, de modo a obter os resultados experimentais com o intuito de avaliar a eficácia deste sistema de controle. Assim, diante das respostas obtidas, conclui-se que houve uma redução de 70% e 75% da amplitude da velocidade dos pisos do escritório e laboratório de química, respectivamente. Contudo, a aquisição deste sistema de controle representa um elevado custo, que segundo os autores, através de pesquisa e a ampliação de seu uso, provavelmente tornará viável sua utilização para reduzir vibrações excessivas de piso.

Rana e Soong (1998) abordaram em seu estudo, a melhor compreensão das características de um atenuador dinâmico sincronizado (ADS) no controle dos níveis de vibrações das estruturas com um grau de liberdade. Foi analisado e assim obtiveram-se os parâmetros ótimos do ADS, e os mesmos foram expandidos para sistemas de vários graus de liberdade. Os autores, ainda, investigaram o controle de vários modos de vibração de um edifício usando múltiplos atenuadores dinâmicos sincronizados (MADSs).

Laman (1999) apresentou uma breve revisão dos critérios de projetos, fornecendo orientações e especificações de guias e as exigências das normas para minimizar as vibrações de pisos, e estudos relacionados às respostas humana as vibrações. Desse modo, são determinados os critérios de aceitabilidade de vibrações de pisos, onde o autor considera que futuramente a avaliação destes critérios será algo rotineiro e parte do processo de concepção de projetos.

El-Dardiry et al. (2002) apresentaram um estudo onde são comparados as frequências naturais de um edifício de concreto construído em laboratório com o

modelado computacionalmente por meio de elementos finitos. Os resultados obtidos indicaram que o modelo numérico o qual considera a rigidez real das colunas foi o que mais se aproximou dos dados experimentais.

Da Silva et al. (2003) relatou o crescente aumento de estruturas com problemas de vibrações indesejáveis, decorrentes das tendências construtivas inseridas. No intuito de analisar tais fatos anteriores, foi investigado o comportamento estrutural de um piso de uma edificação sujeito às ações humanas rítmicas. Esta investigação baseou-se na modelagem do sistema estrutural por meio de elementos finitos pelo programa ANSYS, permitindo uma adequada avaliação da resposta dinâmica em termos do conforto humano e estado limite de serviço. Conforme os resultados obtidos nesta investigação, os mesmos foram comparados com os valores limites propostos por diversos autores e padrões de projeto. Os valores encontrados em relação ao deslocamento, velocidade e aceleração indicaram a satisfação dos critérios e normas recomendados, garantindo assim o conforto dos usuários no piso estudado.

Reynolds e Pavic (2003) investigaram o efeito de pisos falsos na minimização dos níveis de vibração de pisos de concreto com vãos longos. Para tal, foram obtidas as frequências naturais, modos de vibração e o amortecimento estrutural do piso por meio da modelagem via elementos finitos antes e depois da instalação dos pisos falsos. De tal forma que, demonstrou-se eficiente a instalação dos pisos falsos, já que aumentou em até 89% o amortecimento estrutural dos pisos e ainda contribuiu igualmente para o aumento da rigidez dos pisos. Entretanto, as mudanças nas propriedades modais foram inconsistentes em todos os modos de vibração e não foi possível prever facilmente quais os modos seriam afetados benéficamente pela instalação de pisos falsos. Apesar disto, tal medida implementada nos pisos de concreto demonstraram a redução da resposta de vibração quando submetidos a atividades do caminhar.

Moreira (2004) desenvolveu um estudo para compreender a influência de parâmetros como variação de vãos e rigidez de vigas, através da modelagem de painéis típicos por meio do programa computacional ANSYS. Os resultados, em termos de aceleração, foram examinados e comparados com as normas e recomendações internacional.

Hanagan (2005) analisou cinco casos reais incluindo escritórios, salas de aula e espaços comerciais; onde foram encontrados níveis de vibrações perturbadoras

pelo caminhar humano ao redor destes espaços. Diante das tendências construtivas inseridas, verificou-se a influência de elementos arquitetônicos na contribuição ou não no amortecimento estrutural. Segundo o autor, estas avaliações e recomendações relativas à avaliação das vibrações, ainda geram resistência por parte dos proprietários das construções e projetistas. Em consequência disto, o custo de reparo do problema tem-se mostrado muito maior do que aquele na fase de projeto.

Ebrahimpour e Seek (2005) desenvolveram um estudo relacionado aos modelos representativos das ações dinâmicas ao longo da história, contendo os critérios de percepção humana às vibrações e suas medidas corretivas para minimizá-las. Em adição, foram apresentadas e explicadas, técnicas de controle de vibrações por meio de um sistema ativo e semiativo usando respectivamente, materiais compósitos e visco elásticos.

Mello et al. (2007) apresenta a metodologia de avaliação do conforto humano de pisos mistos com múltiplos andares e vãos principais variando de 5 a 10m, onde são aplicados quatro modelos de carregamento simulando o caminhar humano. As respostas dinâmicas obtidas em termos de acelerações de pico foram comparadas com os limites propostos por normas e critérios de projeto.

Loose (2007) analisou a resposta dinâmica de pisos mistos (aço-concreto) ao serem submetidos às excitações humanas pelas atividades tais como ginástica aeróbica e saltos a vontade, onde foram obtidos resultados em termos de aceleração máxima de pico. Estes valores foram comparados com os limites das recomendações internacionais relacionadas ao conforto humano em diferentes ocupações da estrutura.

Silva et. al (2008) relata que atualmente os sistemas estruturais estão cada vez mais propícios as vibrações indesejadas, em virtude de seu menor peso e amortecimento que levam a frequência natural fundamental próxima a frequência de excitação das atividades humanas rítmicas. Em vista desta situação, avaliaram-se as vibrações em pisos mistos ortotrópicos (aço-concreto) devido as atividades humanas rítmicas, onde foram verificados a violação dos limites de vibrações no estado limite de serviço (em relação à velocidade máxima obtida); entretanto, satisfaz o critério de conforto humano (em relação à aceleração máxima encontrada).

A maioria dos autores relatam o desconforto humano em estruturas com frequências menores que 8Hz, porém Brownjohn e Middleton (2008) analisaram em

seu estudo que estruturas rígidas com frequência superiores a 10Hz, também representam significativas respostas dinâmicas. Tal fato demonstra a influência dos mais altos harmônicos do caminhar humano, de modo que não se deve subestimar a resposta de frequências naturais de até 20Hz no que concerne ao conforto humano. Os autores observaram a possibilidade da influência de que outros harmônicos devido ao caminhar humano nos sistemas estruturais.

Da Silva e Thambiratnam (2009,2011) estudaram o comportamento dinâmico de um piso composto por múltiplos painéis, submetidos ao carregamento induzido por atividades humanas relacionadas aos tipos de danças e amortecimento estrutural através da modelagem da estrutura por meio de elementos finitos. Foram aplicados quatro tipos de carregamentos onde avaliaram os deslocamentos e acelerações do piso, onde se conclui que tais valores são influenciáveis pelo tipo de atividade exercida, amortecimento estrutural e densidade de ocupação. Além disso, recomendaram medidas corretivas para minimizar os efeitos de vibração excessiva e sugestões de modo a complementar as normas e guias práticos de projeto em razão da complexidade da interação entre o carregamento dinâmico e a estrutura.

Han et al. (2009) propõem limites de aceleração vertical em pisos submetidos ao andar humano e saltos, através de testes experimentais realizados com vinte voluntários coreanos. Assim, constataram quatro níveis de percepção humana a aceleração vertical em residências, bem como se verificou a inferioridade de seus valores aos comparados de outros países, sugerindo tal fato ao tipo de utilização da estrutura e estilo de vida dos usuários.

Loose et al. (2009) analisaram um sistema estrutural composto por um piso misto (aço-concreto) e seu resultado, em termos da aceleração máxima (aceleração de pico), são comparados com os limites propostos por recomendações de projeto do ponto de vista do conforto humano. Os resultados obtidos verificaram a violação dos limites recomendados na maioria dos casos de carregamentos dinâmicos considerados (ginástica aeróbica e saltos livres). Tal fato demonstrou o desconforto humano a tais carregamentos.

Zheng et al. (2010) realizaram uma análise experimental de um piso de uma edificação, reproduzido em laboratório, de modo a compará-lo com a modelagem numérica, a fim de investigar a importância da imperfeição da continuidade entre os painéis que compõem um piso misto. Assim, foram obtidas as respostas dinâmicas pela análise de autovalores e análise harmônica. Com o intuito de o modelo

numérico se aproximar melhor do real, as ligações semirrígidas entre os painéis foram simuladas com elementos de mola.

Setareh et al. (2010) analisaram as medições experimentais em um escritório com estrutura em balanço, suscetível à vibração excessiva, onde obtiveram as frequências naturais e modos de vibração que ao comparar-se aos obtidos pela modelo computacional, concluiu-se a defasagem do segundo e terceiro modo de vibração. Diante desta constatação, os autores consideraram o fato ao número insuficiente de pontos de medições e limitações dos testes pelo grande porte das estruturas.

CREȚU et al. (2010) estudaram o comportamento dinâmica de um piso misto através de uma análise experimental, no qual obteve-se respostas em termos da frequência natural. Tal análise é realizada variando as condições de contorno, intensidades do carregamento dinâmico e rigidez da laje aplicada ao método dos elementos finitos. As respostas obtidas foram confrontadas com as extraídas pela modelagem em elementos finitos. Diante de tal comparação, foi verificado a proximidade de ambas respostas.

Varela e Battista (2011) desenvolveram um protótipo de um piso (aço-concreto), em laboratório numa escala 1:1, para a realização de testes experimentais simulando o carregamento dinâmico das ações humanas, especialmente os produzidos pelo caminhar humano de forma aleatória. Na estrutura projetada foi instalado um sistema de controle passivo de modo a atenuar as vibrações indesejáveis. Os testes experimentais foram conduzidos pela análise dos resultados em termos da aceleração do sistema estrutural com e sem controle, e, em seguida os comparando. Assim, os resultados mostraram a eficiência do uso do sistema de controle passivo ao reduzir significativamente as vibrações existentes no piso, de modo que os autores propõem seu uso na fase de concepção do projeto, visto sua eficiência, baixo custo de aquisição e manutenção.

Saidi et al.(2011) propõem a utilização de um sistema de controle passivo, utilizando o amortecedor viscoelástico para reduzir as vibrações de pisos. Segundo os autores, este tipo de amortecedor ajusta-se facilmente as diversas frequências naturais e amortecimento estrutural. Foram desenvolvidos dois protótipos de vigas, uma de viga de aço em um vão de 3 m e outra viga no formato T de concreto com um vão de 9,5 m, onde foram adicionados os amortecedores viscoelásticos, de modo que os resultados das análises nestas estruturas foram comparados com seus

respectivos modelos analíticos. Logo, os valores obtidos de frequência natural e amortecimento dos resultados experimentais e analíticos se correlacionam bem, assim verificou-se um aumento do amortecimento de 0,3% para 3%, nas vigas de aço, e 2,9% para 6,1% para viga T de concreto.

Hudson e Reynolds (2012) relatam o crescente aumento de estruturas com níveis de vibração que violam os recomendados por normas e guias de projeto, geradas pela excitação as atividades humanas rítmicas, de modo que proporcionam o desconforto humano nos pisos. A fim de amenizar tais efeitos, os autores propuseram a utilização de um sistema de controle ativo na minimização das vibrações, de forma a atender os critérios relativos ao conforto humano. Em adição, o trabalho investiga os aspectos ambientais e econômicos em relação a sua incorporação na estrutura.

Setareh (2012) apresentou um estudo comparativo das avaliações das vibrações de um piso em balanço, submetido às atividades humanas rítmicas, pelas normas e guias de projetos com os registros medidos por meio de um sistema de monitoramento. Além disso, foram propostas novas relações dos parâmetros de avaliação da vibração. Dessa maneira, foi observado que o critério de avaliação utilizando a aceleração de pico é impreciso e insuficiente, e, que a ISO 10137 apresenta uma melhor avaliação através do VDV e aceleração rms.

Lee et al. (2013) investigaram uma vibração atípica ocorrida nos andares superiores de um edifício de 39 andares na Coreia. Neste estudo, simularam as excitações humanas rítmicas no centro do 12º andar, tanto nos testes experimentais quanto no modelo obtido via elementos finitos, com a intenção de comparar as frequências naturais e acelerações verticais. Logo, verificou-se que os resultados comparados convergiram a uma frequência natural de 2,7Hz e a uma concordância das acelerações verticais. Portanto, foi concluído o fenômeno da ressonância entre a estrutura e excitação humana rítmica ocasionou a vibração atípica na estrutura.

Costa Neves et al. (2014) avaliaram o comportamento de estruturas mistas com dimensões variando de 4 m a 10 m, aplicando dois modelos de carregamento dinâmico que representam a excitação humana rítmica. As respostas dinâmicas da estrutura, em termos de acelerações de pico e deslocamentos, foram consideradas respectivamente inaceitáveis e aceitáveis, conforme as normas e critérios utilizados.

Hicks e Peltonen (2014) desenvolveram uma metodologia simplificada para avaliar a resposta às vibrações de estruturas compostas por vigas slim. Tal

metodologia é apropriada as áreas com grandes vãos livres, já que as vigas slim proporcionam tal fato, onde os cálculos são realizados manualmente, sem auxílio de programas computacionais. Foram realizados ensaios experimentais em seis pisos, obtendo-se respostas que satisfizeram a ISO 10137 e ao comparar-se com a metodologia simplificada verificou-se o conservadorismo dos resultados do mesmo. Assim, a metodologia proposta foi considerada aplicável em projetos estruturais na avaliação as vibrações.

2 CRITÉRIOS E NORMAS DE PROJETO

Este capítulo apresenta critérios e normas de projeto, de modo a oferecer orientação na elaboração de projetos relacionados ao conforto humano, sob o ponto de vista da prática de atividades humanas rítmicas. As normas apresentadas são diferenciadas pelo nível de refinamento a percepção humana as vibrações. Tal situação conduz tanto a avaliações conservadoras quanto a não conservadoras.

2.1 Norma Brasileira NBR 8800/2008

A norma determina os requisitos básicos em que se devem respeitar os projetos de estruturas de aço e mistas de aço e concreto de edificações. Em relação a verificação do estado limite de serviço referente as vibrações de pisos, o item 11.4.1 estabelece o dimensionamento da estrutura, tais como grandes áreas que não possuem divisórias ou outros elementos de amortecimento, de modo a se evitar o aparecimento de vibrações transientes indesejáveis pelo caminhar humano e outras fontes, conforme o anexo L (NBR 8800, 2008, p.110).

Referente ao item 11.4.2, relacionado aos equipamentos mecânicos que possam produzir vibrações indesejáveis são recomendados o isolamento para reduzir ou eliminar tais vibrações na estrutura. Esses tipos de vibrações, que incluem veículos e atividades humanas rítmicas como dança, devem ser verificados também em relação aos estados-limites últimos (ELU), incluindo fadiga. O anexo K e L pertencentes a este item descrevem respectivamente as verificações de fadiga e estado-limite de serviço (ELS) devido a tais vibrações.

Segundo o anexo L, item L.1.2 (NBR 8800, 2008), estabeleceu-se que a frequência natural da estrutura deve ser superior a 3Hz. De acordo com o item L.2, os projetos estruturais devem avaliar os problemas de vibrações de pisos por meio da realização de uma análise dinâmica, levando em conta as características e a natureza das excitações dinâmicas, por exemplo, o caminhar humano e atividades rítmicas; os critérios de aceitação para o conforto humano em função do uso e ocupação das áreas do piso; a frequência natural fundamental da estrutura do piso;

a razão de amortecimento modal; os pesos efetivos do piso. Este item recomenda a avaliação mais precisa utilizando os procedimentos e métodos contidos nas bibliografias no item S.4 (NBR 8800, 2008, p. 236).

O item citado anteriormente pela norma recomendou análises mais criteriosas, entretanto, no item L.3 estabeleceu uma “avaliação simplificada para atividades humanas normais”, no qual a NBR 8800 afirma que “a opção por este tipo de avaliação fica a critério do projetista e pode não constituir uma solução adequada para o problema.” (NBR 8800, 2008, p.161). Deste modo, foram desenvolvidas duas regras para esta avaliação, descritas nos itens L.3.2 e L.3.3.

Em relação ao item L.3.2, estruturas destinadas ao caminhar humano constante, como residência e escritório, a frequência natural não deve ser inferior a 4Hz e deslocamento vertical do piso causado pelas ações permanentes e variáveis abaixo de 20 mm.

Em pisos onde as pessoas saltam ou dançam de forma rítmica, como os de academias de ginástica, salões de dança, ginásios e estádios de esportes, o item L.3.3 especifica que a menor frequência natural não pode ser inferior a 6Hz e em casos em que atividade seja muito repetitiva, como a ginástica aeróbica, a frequência natural deverá ser aumentada para 8Hz. Essas condições ficam satisfeitas, se o deslocamento vertical total causado pelas ações permanentes, excluindo a parcela dependente do tempo, e variáveis, considerando a viga como biapoiada e usando as combinações frequentes de serviço, respectivamente não ultrapassarem 9 mm e 5 mm.

2.2 Norma Brasileira NBR 6118/2007

Esta norma estabelece os requisitos básicos que são exigidos em projetos de estrutura de concreto simples, armado e protendido, excluindo os que empregam concreto leve, pesado ou outros especiais.

A verificação do estado limite nesta norma é baseada no item 13.3.2 (NBR 6118, 2007, p. 69), avaliando os limites estabelecidos de deslocamento da estrutura mediante os valores práticos contidos na tabela 13.2 (NBR 6118, 2007, p. 70). Esta tabela indica valores relacionados a quatro tipos de efeito a analisar, onde o utilizado

será referente à aceitabilidade sensorial em relação a vibrações de pisos. De acordo com a tabela referida, o deslocamento estático limite é considerado a $L/350$, onde “L” é o menor vão do piso, e o deslocamento estático considerado é aquele devido à parcela de cargas acidentais.

A análise das vibrações excessivas pelo item 23.3 é realizada em regime linear no caso de estruturas usuais. Com o intuito de evitá-las, e assim garantir um comportamento satisfatório das estruturas sujeitas à vibração, é necessário o maior afastamento possível da frequência natural da estrutura (f_n) da frequência crítica ($f_{crítica}$). A equação (1) representa a relação da frequência natural da estrutura (f_n) e crítica ($f_{crítica}$).

$$f_n > 1,2f_{crítica} \quad (1)$$

A equação (1) é analisada de forma que, afastando a frequência natural da estrutura da frequência crítica busca-se evitar o fenômeno da ressonância entre a estrutura e a ação dinâmica atuante e, conseqüentemente minimizar o desconforto humano devido às vibrações excessivas. De modo a reduzir tais vibrações são realizadas ações sobre a estrutura como aumento de rigidez e massa para modificar a frequência natural e também elevar a taxa de amortecimento estrutural (NBR 6118, 2007, p. 172). Na falta de valores determinados experimentalmente, adota-se os valores indicados na Tabela 1 para a $f_{crítica}$.

Em estruturas onde as recomendações anteriores não possam ser atendidas, deve ser realizada uma análise dinâmica mais meticulosa utilizando as normas internacionais, caso não exista norma brasileira específica.

Tabela 1 - Frequência crítica para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas (NBR 6118, 2007, p. 173)

Caso	$f_{crítica}$ (Hz)
Ginásio de esportes	8,0
Sala de dança ou de concertos	7,0
Escritórios	3,0 a 4,0
Salas de concerto com cadeiras	3,4
Passarelas de pedestres ou	1,6 a 4,5

Conforme Varela (2004), uma análise baseada somente em frequências mínimas não é aconselhável, pois a estrutura em casos fora de ressonância pode apresentar vibrações indesejáveis com a força dinâmica atuante.

2.3 Norma ISO 10137/2007

A norma ISO 10137 (2007) da International Organization for Standardization fornece recomendações para a avaliação das vibrações de edifícios e passarelas, abrangendo a recepção destas vibrações a ocupação humana em edifícios e passarelas e também o conteúdo e estrutura da edificação.

A avaliação das vibrações, segundo o item 4.1 (ISO 10137, 2007, p. 4), leva-se em conta as características da fonte de vibração, o caminho transmissor e o receptor. De forma que as vibrações percorrem um trajeto denominado caminho de transmissão até chegar finalmente aos receptores destas vibrações, sendo estes, sujeitos aos critérios do estado limite de serviço (ELS).

De acordo com o item 4.2.1 (ISO 10137, 2007, p. 5), a excitação humana representa uma fonte de vibração no interior da edificação. Além disso, as atividades humanas rítmicas são classificadas de classe A no item 6.2.1 (ISO 10137, 2007, p. 9), da norma, na qual atuam como fonte de vibração no tempo e espaço.

O anexo C descreve os critérios de vibração relativos à resposta humana, onde comenta a influência de inúmeros fatores, tais como as características do indivíduo, atividade exercida e expectativa do indivíduo as vibrações, na aceitabilidade aos níveis de vibração.

Segundo o item C.1.1.2 (ISO 10137, 2007, p. 33), as vibrações são analisadas usualmente pela aceleração, entretanto, a percepção a diferentes níveis de intensidade ocorre também pela frequência do movimento e posicionamento do indivíduo (em pé, sentado ou deitado), portanto é necessário que as acelerações sejam filtradas. Esses filtros ou parâmetros de ponderação de frequência são apresentados na ISO 2631-1 (1997) para situações em que a direção da vibração crítica é especificada ou utiliza-se a ISO 2631-2 (2007) quando o sentido crítico é desconhecido. A norma ISO 2631-2 (2003) não oferece uma orientação sobre os critérios de aceitação, entretanto a ISO 2631-2 (1989) permite a utilização de parte

relevantes desta edição para serem utilizados como critérios para vibrações em edifícios, sendo assim, reproduzidas em um formato no anexo C da ISO 10137 (2007). É importante ressaltar que a faixa de frequência coberta é de 1 a 80Hz. A Figura 2 representa o posicionamento do indivíduo diante das vibrações.

O valor limite da aceleração (rms) é determinada pela multiplicação dos coeficientes fornecidos na Tabela 2, em função da destinação da estrutura, do período do dia e do tipo de vibração, pelos valores das curvas-base (Figura 3, Figura 4 e Figura 5), em função da direção das acelerações.

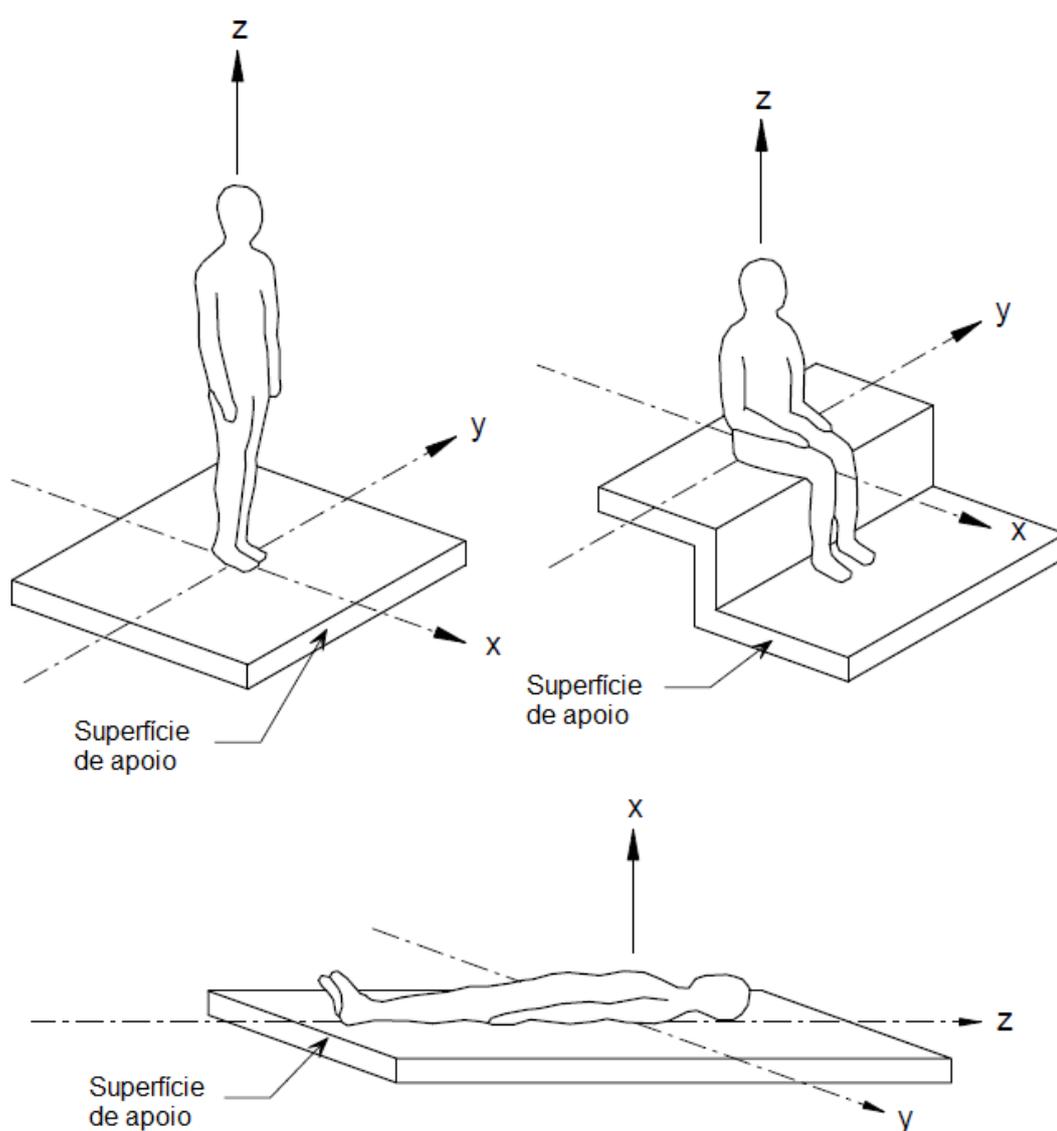


Figura 2 - Direções das vibrações (ISO 2631-1, 1997)

A aceleração da aceleração *rms* ponderada (*the weighted rms acceleration*) é calculada pela equação (2), conforme a ISO 2631-1 (1997):

$$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (2)$$

Onde $a_w(t)$ é a aceleração ponderada (translacional ou rotacional) em função do tempo; e T é o período de tempo em que a aceleração é medida.

Tabela 2 - Faixas dos fatores de multiplicação usados em muitos países para magnitudes satisfatórias específicas de vibrações de edifícios com respeito à resposta humana (ISO 10137, 2007, p. 34)

Local	Tempo	Fatores de multiplicação para a curva base (Figura 3, Figura 4 e Figura 5) ^(a)	
		Vibração contínua e intermitente ^(b)	Vibrações por excitação transiente com várias ocorrências ao dia
Áreas de trabalho críticas (salas de operação de hospitais, laboratórios de precisão, etc.)	Dia	1	1
	Noite	1	1 ^(c)
Residências (apartamentos, casas e hospitais)	Dia	2 a 4 ^(d)	30 a 90 ^{(d), (e), (f)}
	Noite	1,4	1,4 a 20
Escritórios "silenciosos" (calmos)	Dia	2	60 a 128 ^(g)
	Noite	2	60 a 128
Escritórios em geral (escolas, etc.)	Dia	4	60 a 128 ^(g)
	Noite	4	60 a 128
Salões de conferências e oficinas	Dia	8	90 a 128 ^(g)
	Noite	8	90 a 128

NOTA 1: Para avaliar os efeitos de um sinal de vibração contendo dois ou mais componentes de frequência discretos, o método do valor médio a quarta potência (*the root-mean-quad; (rmq)*) pode ser empregado (ver ISO 2631-2:1989, Anexo B)

NOTA 2: Esta tabela foi adaptada a partir da ISO 2631-2:1989, Anexo A.

- (a) Esses fatores levam a valores de magnitudes de vibração abaixo dos quais a probabilidade de comentários adversos é baixa (qualquer ruído acústico causado por vibração estrutural não é considerado).
- (b) Dobrar as magnitudes de vibração sugeridas pode resultar em comentários adversos, e isto pode aumentar significativamente se as magnitudes forem quadruplicadas (quando disponível, as curvas de dose/resposta podem ser consultadas).

"Vibrações contínuas" são aquelas com uma duração de mais de 30 min por 24 h; "vibrações intermitentes" são aquelas com mais de 10 acontecimentos por 24 h.

- (c) Magnitudes de choque impulsivo em salas de operação (hospitais) e áreas críticas de trabalho referem-se a períodos de tempo em que as operações estão em andamento ou o trabalho crítico está sendo realizados. Em outros horários, magnitudes tão elevadas como aquelas para residências são satisfatórias desde que exista devido acordo e aviso.
- (d) Em áreas residenciais, existe uma grande variação na tolerância às vibrações. Os valores específicos são dependentes de fatores sociais, culturais e psicológicos.
- (e) A relação entre o número de eventos por dia, magnitudes e durações não está bem estabelecida. No caso de detonação (uso de explosivos), e para mais de três eventos por dia, a seguinte relação provisória pode ser usada para modificar os fatores de residências na coluna 4 da tabela. O procedimento envolve uma multiplicação do valor da magnitude da vibração por um fator numérico $F = 1,7N^{-0,5}T^{-d}$, onde N é o número de eventos de um dia de 16 h; T é o período de duração do impulso e o sinal de decaimento para um evento, em segundos, (a duração de um evento pode ser estimada a partir dos pontos de movimento/histórico de tempo de 10% (-20dB)); d é zero para T menor que 1 s. Para estímulos de curta duração, há evidências de que a resposta humana para pisos de madeira tenha $d = 0,32$, e para pisos de concreto $d = 1,22$. Este fator numérico não se aplica quando os valores são inferiores àqueles apresentados para o caso de vibração contínua.
- (f) Na escavação de pedras de grande tenacidade, onde perturbações subterrâneas causam vibrações em frequências altas, um fator de até 128 é satisfatório para imóveis residenciais em alguns países. Fatores menores de 60 somente se aplicariam a estruturas frágeis ou áreas sensíveis.
- (g) As magnitudes para choques impulsivos em escritórios e oficinas não devem ser aumentadas sem considerar a possibilidade de interrupção significativa da atividade do trabalho.
- (h) A ação de vibrações em operários executando certos processos numa oficina mecânica ou industrial deve estar numa categoria separada. A ISO 2631-1 (1997) se aplica melhor a esta categoria.

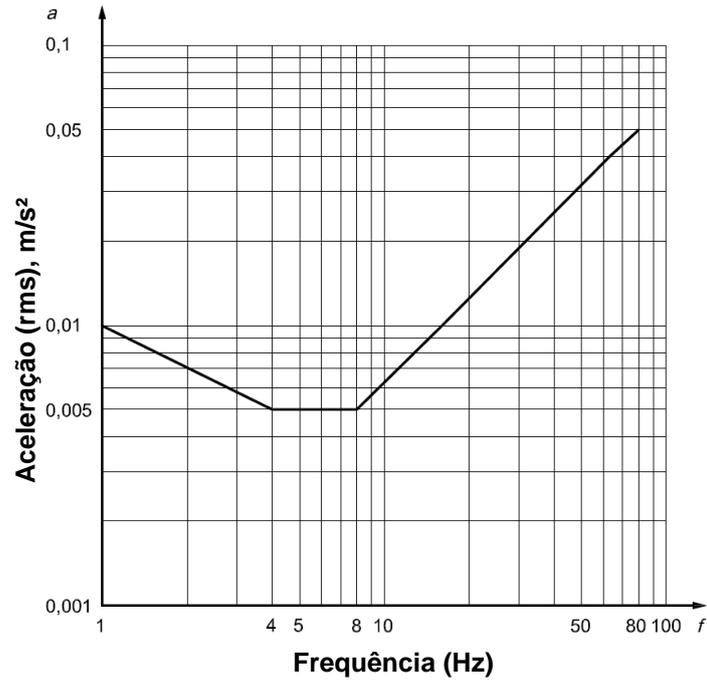


Figura 3 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração no eixo z
(ISO 10137, 2007, p. 37)

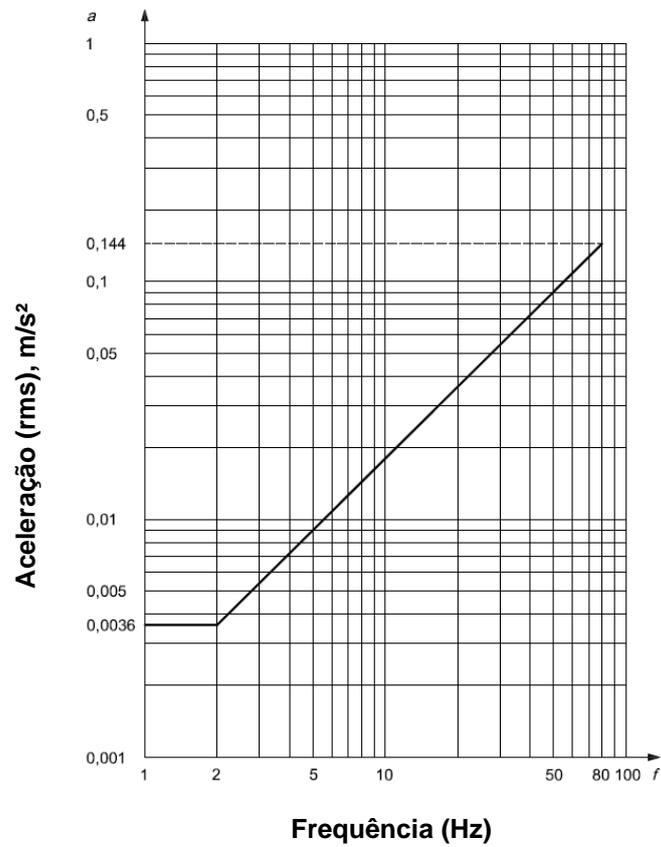


Figura 4 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração nos eixos
x e y (ISO 10137, 2007, p. 38)

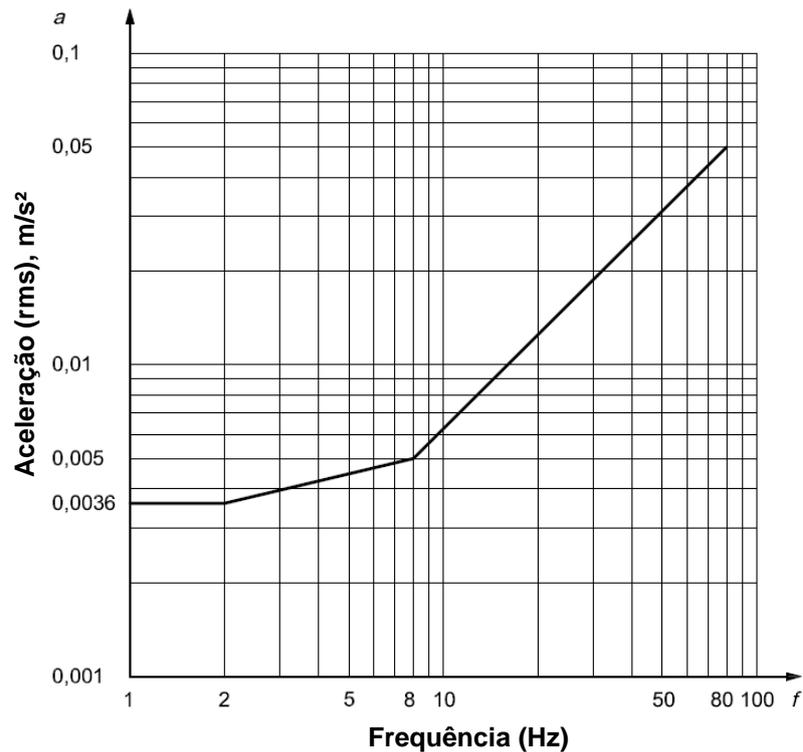


Figura 5 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração em direção combinada nos eixos x, y, z (ISO 10137, 2007, p. 39)

A norma estabelece que as acelerações devem ser avaliação em valores de dose de vibração (*Vibration Dose Values*) – VDV em casos em que a relação entre o valor de pico e o valor *rms* exceder mais que seis. A equação (3) apresenta a aceleração VDV, conforme a ISSO 2631-1 (1997)

$$VDV = \left[\int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right]^{1/4} \quad (3)$$

Onde $a_w(t)$ é a aceleração ponderada (translacional ou rotacional) em função do tempo; e T é o período de tempo em que a aceleração é medida.

Embora os valores de dose de vibração (VDV) não sejam ainda usados amplamente, eles têm sido empregados em alguns países quando a relação entre o valor de pico e o valor *rms* exceder seis (ISO 10137, 2007). Na Tabela 3 estão representados os valores limites de VDV em função do grau de sensibilidade e local investigado.

Tabela 3 - Valores de dose de vibração ($m/s^{1.75}$) acima dos quais vários níveis de comentários adversos podem ser esperados em edifícios residenciais (ISO 10137, 2007, p. 35)

Local	Baixa probabilidade de comentários adversos	Possíveis comentários adversos	Prováveis comentários adversos
Edifícios residenciais 16 horas diurnas	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8	0,8 a 1,6
Edifícios residenciais 8 horas noturnas	0,13	0,26	0,51

É necessário ressaltar que, os fatores de multiplicação fornecidos na Tabela 2 são aplicáveis também no caso da avaliação de vibrações em VDV.

O item C.2.3 considera que a avaliação dos efeitos das vibrações pelas pessoas varia conforme o movimento realizado, logo a percepção de uma pessoa parada e outra se movimentando é diferenciada. Avaliam-se estas vibrações considerando dois critérios, sendo o primeiro pelas pessoas paradas em meio a um público, onde o limite de vibração vertical na ausência de informações é obtido na Figura 3 com um fator de multiplicação de 200. O segundo critério é a segurança do público em geral, de forma a prevenir casos extremos de vibração que possam gerar pânico, onde o limite considerado é um fator de multiplicação de até 400 para ser aplicado nas curvas básicas das Figuras 3,4 e 5.

Em relação a resposta dinâmica de pisos submetidos a atividades humanas rítmicas, a ISO 10137 (2007) recomenda a avaliação proposta por Murray et al. (2003) e Wyatt (1989).

2.4 Norma inglesa BS 6472-1/2008

Esta norma fornece um guia para avaliar a exposição humana a vibrações em edifícios. É importante ressaltar, que a norma ISO 10137 (2007) também considera a atuação de diversos fatores que interferem na percepção humana as vibrações. Tais fatores a ser avaliados são: atividade exercida na estrutura, fatores sociais e

culturais, além da frequência e a direção da vibração. Pela norma, tais vibrações podem ser classificadas em contínuas, intermitentes e ocasionais. Observa-se no item 3.2.1 da BS 6472-1 (2008) que a faixa de frequência considerada varia de 0,5 Hz a 80Hz.

Baseado nos fatores que influenciam na percepção dos indivíduos as vibrações, devem-se filtrar as acelerações através dos coeficientes de ponderação (“ W_b ” para acelerações verticais e “ W_d ” para acelerações horizontais) nesta norma e, adicionalmente, na norma BS 6841 (1987). De acordo com o item 3.2.2 da BS 6472-1 (2008), a sensibilidade do indivíduo a vibração vertical é mais perceptível na faixa de frequência de 4 a 12,5Hz, bem como na vibração horizontal atua na frequência de 1 a 2Hz.

O limite de percepção da vibração contínua pelos indivíduos é variável, de tal forma que estudos apontam que metade das pessoas de uma típica população pode perceber uma aceleração de pico de 0,015 m/s² quando estão sentadas ou em pé. Um quarto dessa população pode perceber um valor de 0,01 m/s², e o último quarto da população percebe um valor de 0,02 m/s². Tais limites podem ser ligeiramente maiores quando as vibrações tem um período de duração menor que 1s.

Em relação aos efeitos das vibrações dos edifícios sobre um indivíduo, a norma estabelece a utilização dos valores de dose de vibração (VDV) para melhor avaliação de tais efeitos. Tal método conduz a uma avaliação consistente de vibrações contínuas, intermitentes, ocasionais e impulsivas e se correlaciona bem com as respostas subjetivas. O valor de dose de vibração (VDV) é representado pela equação (4), conforme a BS 6472-1 (2008).

$$VDV_{b/d, dia/noite} = \left[\int_0^T a^4(t) dt \right]^{0,25} \quad (4)$$

Onde:

$VDV_{b/d, dia/noite}$ é o valor de dose de vibração (em m/s^{1,75}), sendo que o subscrito “dia/noite” refere-se ao período de 16 horas para o dia (por exemplo, das 7h às 23h) e ao período de 8 horas para a noite (por exemplo, das 23h às 7h);

$a(t)$ é a aceleração ponderada (em m/s^2), usando os coeficientes de ponderação “ W_b ” (aceleração vertical) e “ W_d ” (aceleração horizontal) conforme apropriado;

T é o período total de tempo (em s) do dia ou da noite durante o qual a vibração pode ocorrer.

Quando a vibração é constante e com regulares repetições, a medição é realizada utilizando apenas uma amostra representativa, de “ τ ” segundos. Se o valor de dose de vibração for “ $VDV_{b/d, \tau}$ ”, logo o valor total de dose de vibração para o dia, “ $VDV_{b/d, dia}$ ”, é fornecido pela equação (5):

$$VDV_{b/d, dia} = \frac{t_{day}}{t_{\tau}}^{0,25} \times VDV_{b/d, \tau} \quad (5)$$

É importante ressaltar que o valor de dose de vibração (VDV) tem maior influência da magnitude da vibração do que sua duração.

Onde “ t_{day} ” (em s) é a duração de exposição por dia.

Se, durante qualquer período de avaliação, existir um total de “ n ” episódios de vibração de várias durações (t_n), cada um com um valor de dose de vibração de “ $VDV_{b/d, t_n}$ ”, o valor total de dose de vibração para o período do dia ou noite, é dado pela equação (6):

$$VDV_{b/d, dia / noite} = \left(\sum_{n=1}^{n=N} VDV_{b/d, t_n}^4 \right)^{0,25} \quad (6)$$

Em casos de vibração contínua, onde se caracteriza pela amplitude constante e relação entre a aceleração de pico e *rms* de, aproximadamente, 3 a 6; uma aproximação do valor de dose de vibração pode ser feita, sendo esta denominada de valor de dose de vibração estimado (eVDV), de acordo com a equação (7). A aplicação do eVDV não é recomendado para vibrações com características variáveis ao longo do tempo ou choques (BS 6472-1, 2008, p. 16).

$$eVDV = 1,4 \times a(t)_{rms} \times t^{0,25} \quad (7)$$

No que diz respeito às fontes de vibrações dos pisos, a BS 6472-1 (2008) distingue os pisos de baixa e alta frequência, baseando-se nas respostas dinâmicas e a excitação humana.

Os pisos com frequências naturais menores que a faixa de variação de 7 a 10 Hz são denominados como estrutura de baixa frequência, sendo mais susceptível a ressonância, provenientes de atividades humanas. Quando tais pisos possuem frequências naturais maiores que a faixa de variação de 7 a 10Hz, são considerados como piso de alta frequência. Logo, a probabilidade de serem excitados em ressonância com a atividade humana praticada sobre eles é bem menor.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores de dose de vibração (VDV), com a finalidade de avaliar as vibrações baseado no conforto humano.

Tabela 4 - Valores de dose de vibração ($m/s^{1.75}$) que podem resultar na probabilidade de comentários adversos em edifícios residenciais (BS 6472-1, 2008, p. 12)

Local	Baixa probabilidade de comentários adversos ⁽¹⁾	Possíveis comentários adversos	Prováveis comentários adversos ⁽²⁾
Edifícios residenciais 16 horas diurnas	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8	0,8 a 1,6
Edifícios residenciais 8 horas noturnas	0,1 a 0,2	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8

(1) Comentários adversos não são esperados para valores abaixo desses limites.

(2) Comentários adversos são provavelmente esperados para valores acima desses limites.

Em locais como escritórios e oficinas, fatores de multiplicação de 2 a 4, respectivamente, deve ser aplicados nos valores da Tabela 4 para 16 horas diurnas.

Os valores apresentados na Tabela 4 representam o melhor julgamento sobre a sensibilidade humana às vibrações e podem ser usados tanto para vibrações horizontais quanto para vibrações verticais, contanto que os valores em VDV sejam corretamente ponderados. Comenta-se na norma que fatores externos, tais como ruídos, estalos e efeitos visuais exercem influência sobre a sensibilidade humana as vibrações. A norma BS 6472-1 (2008) considera que há uma imprecisão da

aceitabilidade sensorial dos indivíduos as vibrações, mesmo que se utilizem os melhores métodos de obtenção de tais limites.

2.5 Guia do SCI/2009

Este guia fornece orientação para o projeto de pisos submetidos a vibrações, através da publicação P354 concebida pelo The Steel Construction Institute (SCI)

A avaliação das vibrações pela percepção humana é medida em termos de aceleração rms, visto que melhor representa a vibração ao longo tempo. Os critérios de obtenção da aceleração rms são os mesmos utilizados pela norma ISO 10137 (2007) e a BS 6472-1 (2008), no qual influem a frequência e direção da vibração. Logo, os coeficientes de ponderação utilizados para filtrar as acelerações são aqueles fornecidos nas normas BS 6841 (1987) e ISO 2631-1 (1997).

No caso de vibrações intermitentes (por exemplo, atividades de caminhada), o guia SCI (2009) recomenda o uso de valores de dose de vibração (VDVs) para a avaliação de vibrações conforme as normas ISO 10137 (2007) e BS 6472 (1992). Em relação ao critério de conforto humano quando atividades rítmicas são praticadas sobre pisos, o guia cita que não há um consenso em relação aos valores limites de aceleração para estas atividades. Em virtude de tal situação, o guia recomenda seguir as orientações fornecidas pelo guia prático do AISC.

2.6 Guia prático do AISC/2003

Este guia foi elaborado pelos pesquisadores Murray, Allen e Ungar (1997), com o objetivo de apresentar os princípios básicos e ferramentas analíticas para a avaliação dos sistemas de pisos e passarelas submetidas às vibrações oriundas de atividades humanas, e também fornecer orientações de medidas corretivas em estruturas com problemas.

O critério de avaliação das estruturas neste guia para baseia-se na aceleração de pico, através da relação a_p/g . Estes valores são comparados aos limites recomendados pela na curva base da ISO 2631/2 (1989), ilustrada na Figura

6, fornecidos pela norma International Standard Organization, que representa o limite no qual as acelerações verticais passam a ser perceptíveis. Os valores limites apresentados podem variar numa faixa de 0,8 a 1,5 vezes dos valores recomendados de acordo com a duração e a frequência da vibração (AISC, 2003).

Este guia considera que apenas uma componente harmônica, em função do tempo, seja coincidente com a frequência natural da estrutura, na tentativa de causar a ressonância, de acordo com a equação (8):

$$F(t) = P\alpha_i \cos(2\pi i f_p t) \quad (8)$$

Onde:

$F(t)$: força representativa da atividade humana ao longo do tempo (N);

P : peso do indivíduo;

i : múltiplo harmônico da frequência do passo;

α_i : coeficiente de Fourier associado ao i -ésimo harmônico da atividade;

f_p : frequência do passo da atividade (Hz);

t : tempo (s).

Na Tabela 5 são apresentados valores da frequência do passo da atividade (f_p) e coeficientes dinâmicos (α_i) associados aos diversos tipos de atividades humanas.

Tabela 5 - Faixas de frequências de atividades humanas (AISC, 2003, p. 12)

Frequência de excitação do passo (f_p) e coeficientes dinâmicos* (α_i)						
Harmônico	Caminhada		Atividade aeróbica		Dança	
	f_p (Hz)	α_i	f_p (Hz)	α_i	f_p (Hz)	α_i
1	1,6 a 2,2	0,5	2,0 a 2,75	1,5	1,5 a 3,0	0,5
2	3,2 a 4,4	0,2	4,0 a 5,5	0,6	-	-
3	4,8 a 6,6	0,1	6,0 a 8,25	0,1	-	-
4	6,4 a 8,8	0,05	-	-	-	-

* Coeficiente dinâmico significa o pico da força senoidal dividido pelo peso da pessoa.

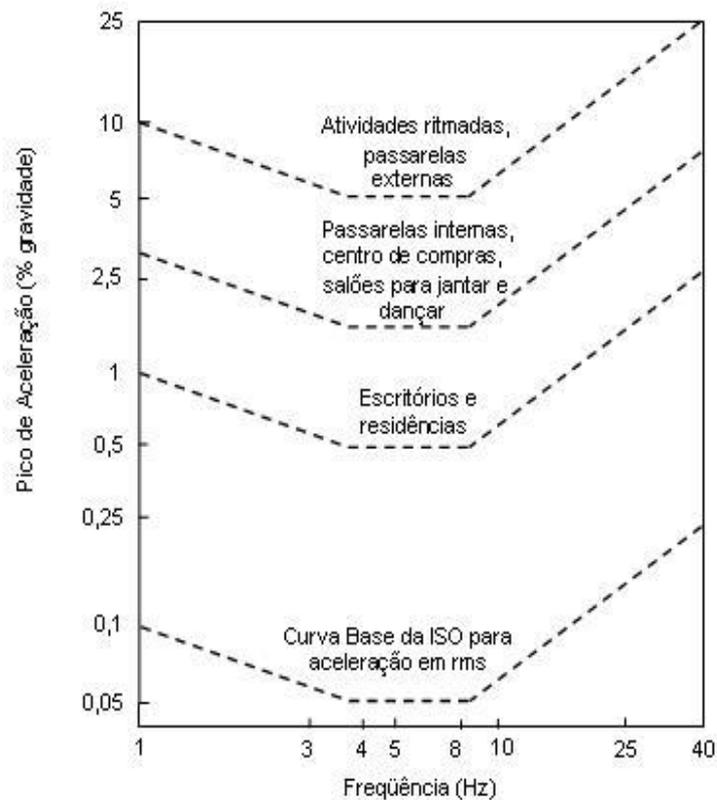


Figura 6 - Valores de aceleração de pico recomendados para o conforto humano devido a atividades humanas (AISC, 2003, p. 7)

A aceleração de pico das atividades rítmicas é determinada sob dois tipos de cálculos, sendo o primeiro referente à estrutura em ressonância ($f=f_n$), onde a frequência natural do piso é igual ou próxima a frequência de excitação da atividade rítmica exercida, e o outro quando a estrutura encontra-se afastada da frequência de excitação das atividades rítmicas ($f_n > 1,2f$). Estes cálculos estão representados nas equações (9) e (10).

Em ressonância ($f=f_n$):

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1,3\alpha_i w_p}{2\xi w_t} \quad (9)$$

Acima da ressonância ($f_n > 1,2f$):

$$\frac{a_p}{g} = \frac{1,3}{(f_n/f)^2} \cdot \frac{\alpha_i w_p}{w_t} \quad (10)$$

Onde:

a_p/g : razão entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade;

α_i : coeficiente de Fourier associado ao i -ésimo harmônico da atividade;

w_p : carga efetiva por unidade de área das pessoas distribuídas sobre o piso;

w_t : carga total por unidade de área do piso, incluindo os ocupantes;

ξ : taxa de amortecimento modal (amortecimento crítico).

Os valores de α_i e w_p são apresentados na Tabela 6, em função da atividade rítmica realizada sobre a estrutura.

O guia menciona a ocorrência de muitos problemas de vibrações em estrutura pela proximidade dos harmônicos mais altos das atividades rítmicas com a frequência natural da estrutura, devido ao relatado é utilizado a equação (9) para obtenção da aceleração de pico. Entretanto é importante observar que as acelerações geradas a partir dos harmônicos mais baixos (primeiro ou segundo) da atividade podem apresentar valores consideráveis, que influenciam de certa forma na estrutura, por este fato utiliza-se a equação (10).

Tabela 6 - Carregamento estimado durante atividades rítmicas (AISC, 2003, p. 38)

Atividade	Frequência da atividade, f (Hz)	Peso dos participantes* (w_p)		Coeficiente dinâmico (α_i)	carga dinâmica ($\alpha_i * w_p$)	
		kPa	psf		kPa	psf
<i>Dança: Primeiro harmônico</i>	1,5 – 3	0,6	12,5	0,5	0,3	6,2
<i>Concertos ou eventos esportivos:</i>						
<i>Primeiro harmônico</i>	1,5 – 3	1,5	31,0	0,25	0,4	7,8
<i>Segundo harmônico</i>	3 – 5	1,5	31,0	0,05	0,075	1,6
<i>Exercícios de saltos:</i>						
<i>Primeiro harmônico</i>	2 – 2,75	0,2	4,2	1,5	0,3	6,3
<i>Segundo harmônico</i>	4 – 5,5	0,2	4,2	0,6	0,12	2,5
<i>Terceiro harmônico</i>	6 – 8,25	0,2	4,2	0,1	0,020	0,42

*Com base na maior densidade de participantes para condições comumente encontradas. A densidade dos participantes pode ser maior para eventos especiais.

Existe outra maneira de se determinar a aceleração máxima, no qual contabiliza todos os harmônicos, que é expressa pela equação (11) (Allen, 1990) e AISC (2003):

$$a_m = \left[\sum a_i^{1,5} \right]^{1/1,5} \quad (11)$$

Onde a_i é a aceleração de pico para o i -ésimo harmônico.

As acelerações máximas obtidas nas equações 9, 10 ou 11 são então comparados com o valor limite de aproximadamente 5% da gravidade obtida pela curva base da ISO 2631/2 (1989) na Figura 6, relacionada as atividades rítmicas.

É importante comentar que as áreas adjacentes aos locais onde são praticados exercícios rítmicos, apresentam uma grande sensibilidade a estas atividades rítmicas. Portanto, o valor da aceleração máxima a_m deve ser reduzida nestas áreas com grande sensibilidade, conforme o modo de vibração da estrutura.

As forças dinâmicas geradas pelas atividades rítmicas tendem a ter grandes amplitudes e em casos de ressonância é maior ainda, de modo que a adoção de maiores valores de amortecimento e massa estrutural não são suficientes para redução do nível de vibração.

O guia recomenda que a frequência fundamental do piso deve ser maior que o maior harmônico da frequência da atividade praticada. De modo a atender este critério, inverte-se a equação (10), resultando na equação (12):

$$f_n \geq f \cdot \sqrt{1 + \frac{k}{(a_o / g)} \cdot \frac{\alpha_i w_p}{w_t}} \quad (12)$$

Onde:

k : constante (1,3 para dança; 1,7 para concertos ou eventos esportivos e 2,0 para atividades aeróbicas);

a_o/g : aceleração limite (0,05; ou menor, se locais próximos à atividade praticada forem afetados pela vibração).

f : frequência da atividade ($f = f_p \cdot i$)

As respostas provenientes das equações (9), (10) ou (11) possuem maior acurácia do que a equação (12). Isto porque, por exemplo, em caso de ressonância com o último harmônico da frequência de excitação, o limite de aceleração pode ser atendido devido ao piso possuir massa e amortecimento suficientes ou o piso ser parcialmente carregado. A Tabela 7 fornece os valores recomendados a serem utilizados na equação (12).

Tabela 7 - Aplicação do critério de projeto de acordo com a equação (12) para atividades rítmicas (AISC, 2003, p. 39)

Atividade	Frequência da atividade ⁽¹⁾ , f (Hz)	Peso dos participantes* (w _p)		Peso total (w _t)		Frequência natural mínima requerida ⁽³⁾ , f _n (Hz)
		kPa	psf	kPa	psf	
<i>Dança e jantar</i>						
a ₀ /g = 0,02						
“pesado” 5kPa (100psf)	3	0,6	12,5	5,6	112,5	6,4
“leve” 2,5kPa (50psf)	3	0,6	12,5	3,1	62,5	8,1
<i>Concertos ou eventos esportivos</i>						
a ₀ /g = 0,05						
“pesado” 5kPa (100psf)	5	1,5	31,0	6,5	131,0	5,9 ⁽²⁾
“leve” 2,5kPa (50psf)	5	1,5	31,0	4,0	81,0	6,4 ⁽²⁾
<i>Atividade aeróbica (somente)</i>						
a ₀ /g = 0,06						
“pesado” 5kPa (100psf)	8,25	0,2	4,2	5,2	104,2	8,8 ⁽²⁾
“leve” 2,5kPa (50psf)	8,25	0,2	4,2	2,7	54,2	9,2 ⁽²⁾
<i>Exercícios de saltos compartilhados com levantamento de peso</i>						
a ₀ /g = 0,02						
“pesado” 5kPa (100psf)	8,25	0,12	2,5	5,12	102,5	9,2 ⁽²⁾
“leve” 2,5kPa (50psf)	5,5	0,12	2,5	2,62	52,5	10,6 ⁽²⁾
(1) A equação (12) é aplicável a todos os harmônicos listados na Tabela 6.						
(2) Pode ser reduzida se, de acordo com a equação 0, o amortecimento vezes massa for suficiente para reduzir a vibração, em ressonância com o 2º e 3º harmônico, a níveis aceitáveis.						
(3) Com o uso da equação (12).						

3 MODELAGEM DAS ATIVIDADES HUMANAS RÍTMICAS

As atividades humanas rítmicas são fonte de excitação com magnitude, direção e posição variável no tempo, isto é, são carregamentos dinâmicos. Entretanto, em grande parte dos projetos estruturais os representam como uma majoração do carregamento estático, desconsiderando seus efeitos dinâmicos.

Os movimentos executados por estas atividades, como caminhar, corrida, saltos e ginástica aeróbica, mesmo que tenham uma padronização ao realizá-los, sofrem variações conforme as adversidades corporais de cada indivíduo, como o peso, a habilidade física, e a maneira pela qual cada um realiza uma determinada atividade. Diante disto, o desenvolvimento de uma função matemática que as representem não é algo fácil, ao contrário, é complexo.

Estas atividades são classificadas por Alves (1997) em duas categorias. Na primeira não há perda de contato com a estrutura, como dança de salão, a outra categoria se refere à perda de contato do indivíduo com a estrutura, de modo que o indivíduo em um determinado momento está em contato com a estrutura e instantes depois encontra-se no ar. Esta última categoria é exemplificada por atividades como corrida, saltos e atividades aeróbicas.

Esta dissertação aborda as atividades com perda de contato com a estrutura, tais como ginástica aeróbica, saltos à vontade e movimentos realizados por torcidas, plateias de show, predominando a execução de saltos e graus de sincronismo dos indivíduos.

3.1 Caracterização das atividades humanas rítmicas

As atividades humanas rítmicas são caracterizadas pela execução de movimentos corporais de um indivíduo, onde predominam a alternância do contato junto a estrutura com movimentos realizados no ar. Estes movimentos foram representados por um salto livre realizado por um indivíduo, ilustrado na Figura 7. O movimento se inicia com a preparação ao salto, e seguidamente são flexionados os

joelhos de forma simultânea a sua projeção para frente com objetivo de impulsionar o salto. Logo após, ocorre o salto propriamente dito, onde há a perda de contato do indivíduo com o solo e por fim, o indivíduo aterrissa na estrutura, retomando novamente o contato com o solo e a preparação para saltar-se novamente.

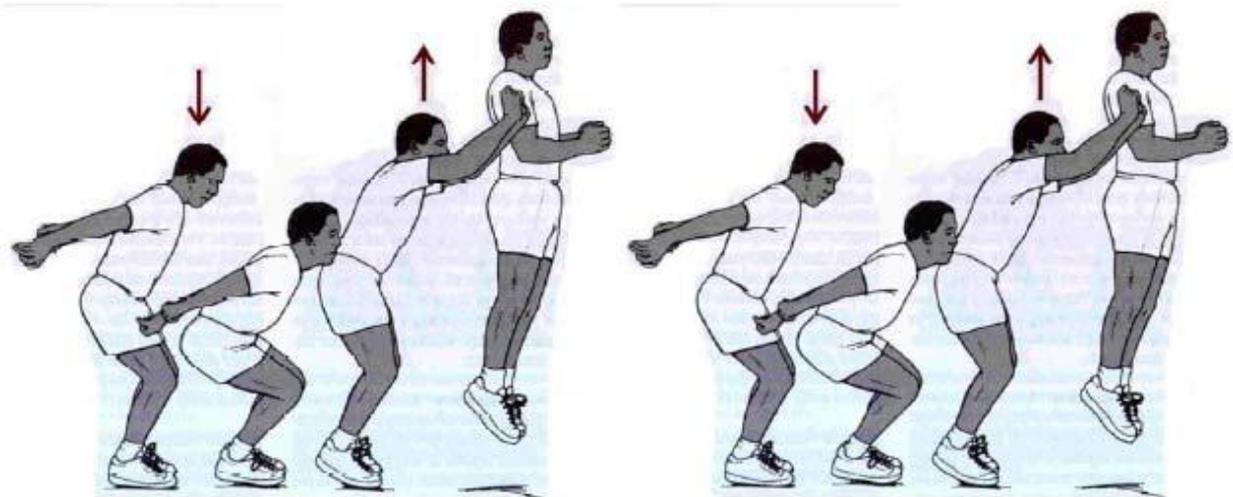


Figura 7 - Movimentação do corpo em um salto livre (FAISCA, 2003)

Após a ilustração dos movimentos do corpo em um salto livre na Figura 7, foram realizados testes experimentais que foram representados graficamente e mostram a força gerada por este movimento, no domínio do tempo, sendo apresentado na Figura 8.

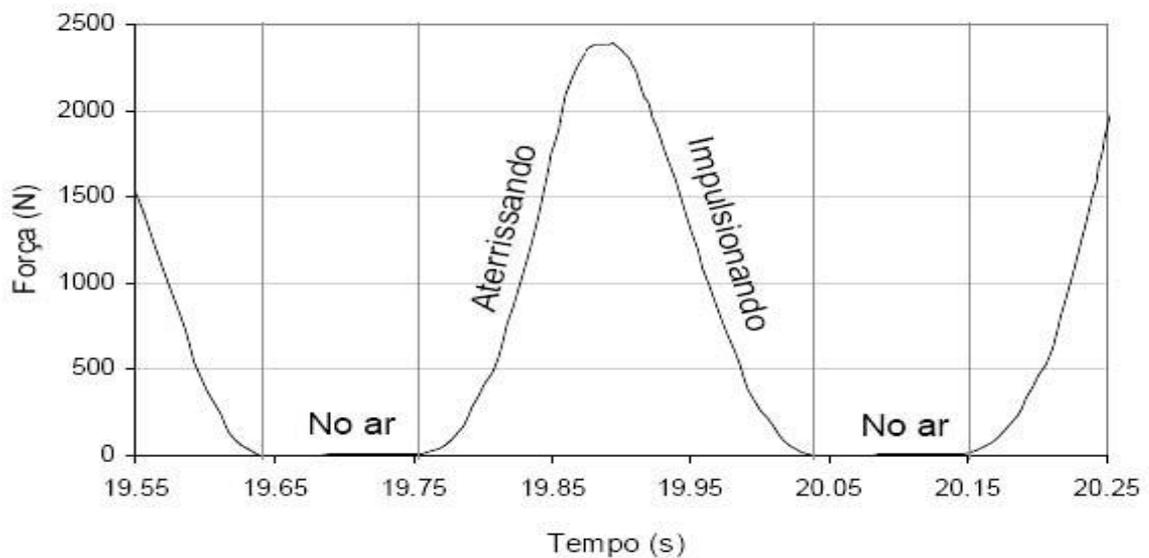


Figura 8 - Força gerada na estrutura por movimento de saltos livres no domínio do tempo (FAISCA, 2003)

A Figura 8 descreve de melhor maneira possível a ilustração da Figura 7, onde a força atuante na estrutura pelo salto, quando o indivíduo encontra-se no ar é nula, enquanto a aterrissagem total do indivíduo na estrutura atinge a força máxima. Em seguida, a amplitude da força decresce na preparação para a realização de um novo salto, assim estes movimentos tornam-se um ciclo repetitivo.

A representação matemática do carregamento proveniente das ações dinâmicas humanas rítmicas não é algo simples, pelo contrário, envolve questões já citadas anteriormente. Alguns autores como Bachmann et al. (1987), Ellis e Ji (1994), Murray et al. (1997) representaram este carregamento através da série de Fourier, considerando uma parte estática (peso individual) e outra parte dinâmica (variando no tempo). As atividades rítmicas estudadas podem ser aproximadas a uma função semi-seno, a qual é empregada por diversos autores, guia SCI (2009) e a ISO 10137 no seu anexo A, que ilustra tal função na Figura 9.

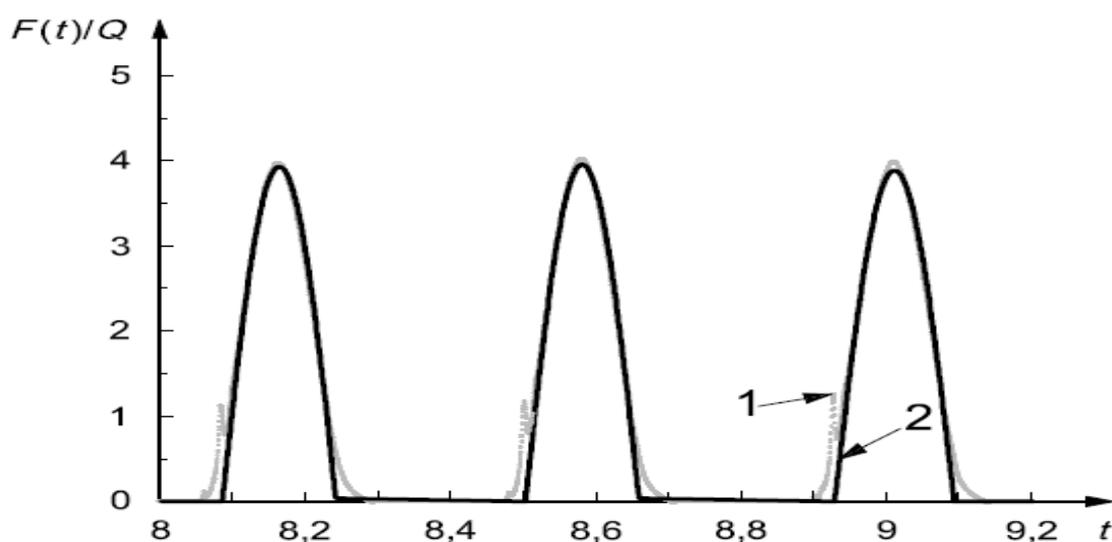


Figura 9 - Força vertical gerada por um indivíduo saltando (ISO, 2007, p. 19)

Onde:

$F(t)/Q$: força normalizada;

1: função medida experimentalmente;

2: função semi-seno.

3.2 Modelo de Carregamento I (MC-I) (FAISCA, 2003)

Neste modelo de carregamento são simuladas as ações dinâmicas induzidas pela ginástica aeróbica, através da função Hanning. Esta função é baseada em parâmetros obtidos após a realização de uma série de testes experimentais, sendo muito utilizada em processamentos de sinais para descrever matematicamente esses carregamentos.

De acordo com os testes experimentais realizados, as atividades como saltos a vontade, ginástica aeróbica e show/torcida, apresentaram comportamentos semelhantes ao analisar os gráficos da *força x tempo*, apenas se diferenciando pelas suas amplitudes máximas e o período das atividades. Essas observações possibilitaram o emprego de uma única metodologia para o processamento dos sinais.

Baseado nos resultados experimentais, concluiu-se que a função semi-seno, empregada usualmente por vários autores (como mencionado anteriormente na seção 3.1) não é tão apropriada para a representação do carregamento, e que a função Hanning (FAISCA, 2003) apresentou uma melhor aproximação ao sinal da força obtida experimentalmente. A comparação do sinal experimental com as funções semi-seno e Hanning pode ser vista na Figura 10.

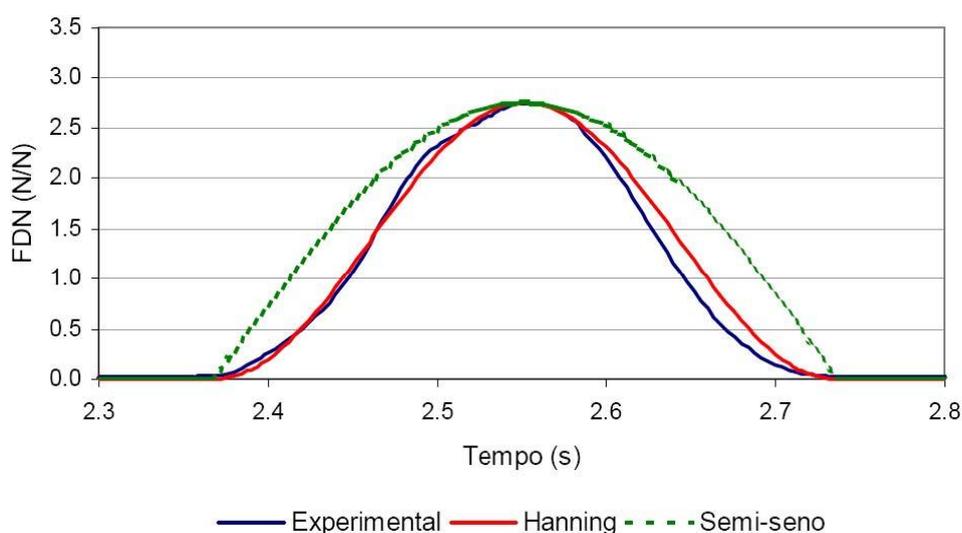


Figura 10 - Comparação do sinal experimental com as funções semisseno e Hanning (FAISCA, 2003)

A representação matemática da função Hanning é descrita a seguir:

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

$$F(t) = 0 \quad \text{Para } T_c \leq t \leq T$$
(13)

Onde:

$F(t)$: representação matemática do carregamento no tempo (N);

CD : coeficiente de defasagem;

K_p : coeficiente de impacto;

P : peso da pessoa (N);

T : período da atividade (s);

T_c : período de contato da atividade (s);

t : tempo (s).

O comportamento do carregamento dinâmico pela função Hanning é ilustrado na Figura 11. Tal representação gráfica expressa o melhor entendimento desta função matemática, os quais o eixo da ordenada representa o FDN (força dinâmica normalizada) que significa a razão entre a amplitude da carga dinâmica e da carga estática de cada indivíduo e o eixo da ordenada, o tempo. Além disso, observam-se dois intervalos de tempo bem definidos, que são o tempo de contato e sem contato com a estrutura.

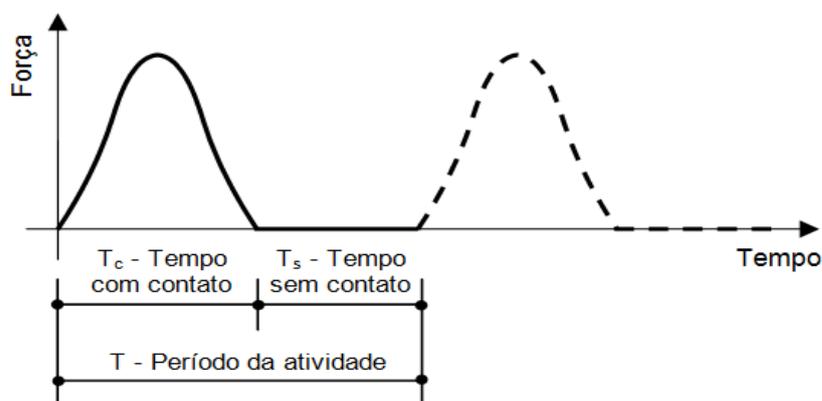


Figura 11 - Características da função Hanning

No que se refere aos parâmetros da função Hanning, o coeficiente de impacto (K_p) é determinado pelo gráfico $FDN \times Tempo$, calculando o pico máximo de cada salto. Este parâmetro é responsável por majorar o carregamento sobre a estrutura.

O parâmetro CD considera a defasagem entre os indivíduos, isto é, o grau de sincronismo na realização das atividades conforme o número de pessoas as praticando. A obtenção do CD ocorreu através da razão entre o máximo da soma da força dinâmica de várias pessoas e a soma de cada um dos máximos de cada sinal, sendo representada pela equação (14). Através dele são consideradas possíveis defasagens, variações de ritmo, etc., que levariam à redução do carregamento.

$$CD = \frac{\text{Pico do Sinal da Soma}}{\sum_{i=1}^n k_{pi}} \quad (14)$$

A Figura 12 exibe os valores de CD de acordo com o número de pessoas e o tipo de atividade rítmica realizada, de modo a ser utilizada para a representação de cargas de multidão através da extrapolação do gráfico.

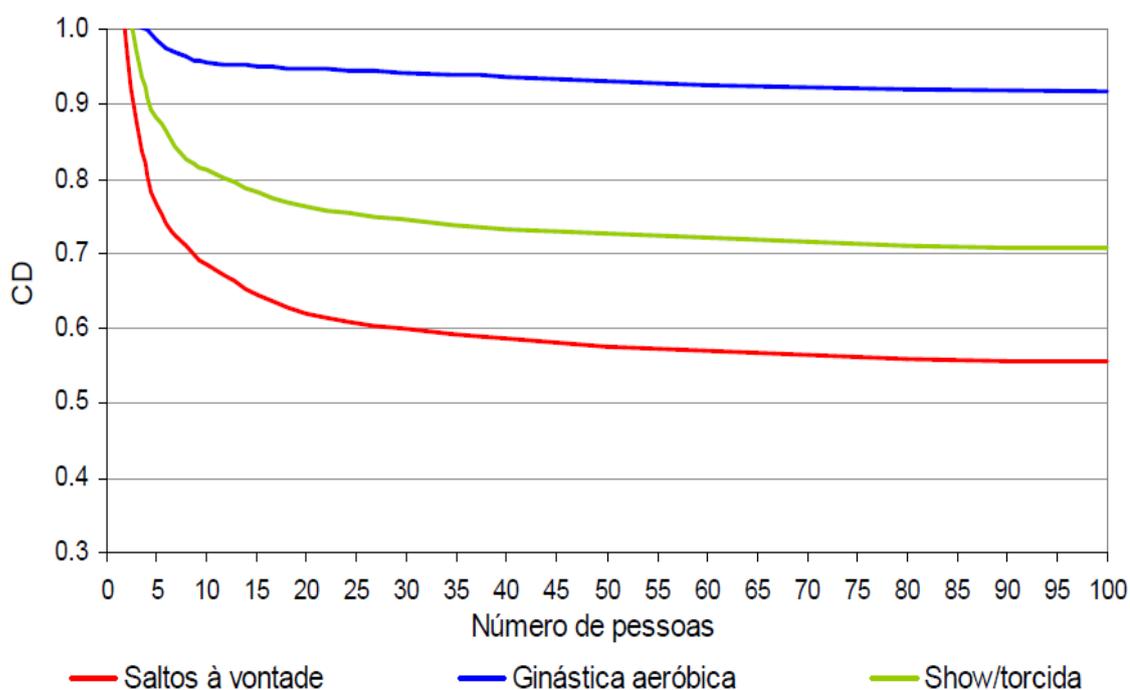


Figura 12 - Coeficiente de defasagem (CD) das atividades estudadas (FAISCA, 2003)

É possível analisar na Figura 12, a redução dos coeficientes de defasagem à medida que aumenta-se o número de pessoas. Os valores de CD da atividade aeróbica estão situados entre 0,9 a 1, bem como nos saltos à vontade variam de 0,56 a 1,0. Enquanto em shows e torcida apresentaram uma variação de 0,69 a 1,0 no valor de CD. Na Tabela 8, os valores do coeficiente de defasagem são apresentados de acordo com o número de pessoas que praticam ginástica aeróbica.

Tabela 8 - Valores de coeficiente de defasagem para ginástica aeróbica (FAISCA, 2003)

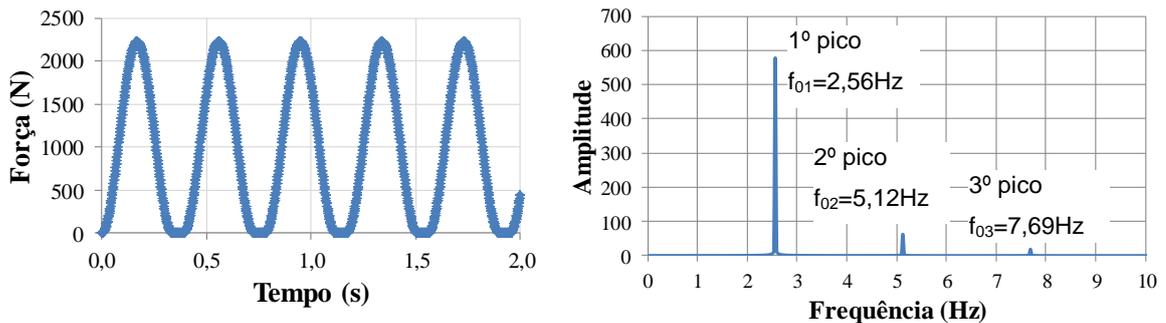
Nº de Pessoas	CD
	Ginástica aeróbica
1	1
4	1
8	0,965
16	0,95
32	0,94
64	0,92

Na Tabela 9 estão representados os valores médios e desvios-padrão dos parâmetros T, T_c e K_p, referentes a atividade de salto a vontade, ginástica aeróbica e torcida. É importante ressaltar que, Faisca (2003) investigou a influência da flexibilidade da estrutura sobre estes parâmetros, concluindo após realização de testes experimentais que ocorre uma pequena influência sobre estes parâmetros.

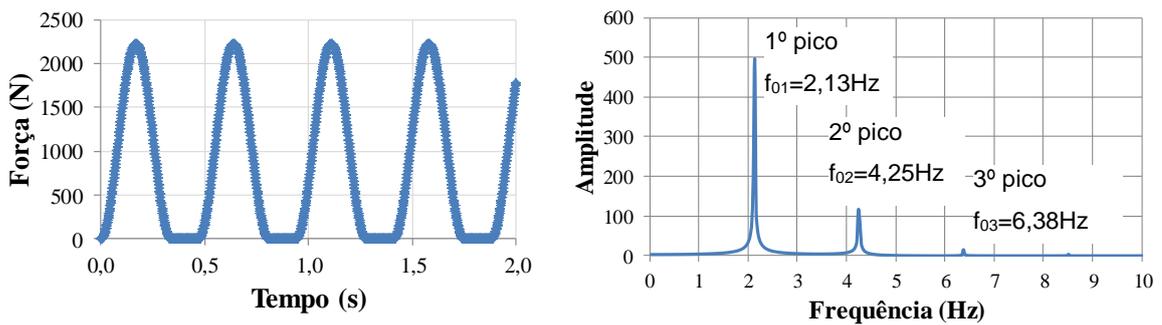
Tabela 9 - Parâmetros para representação de atividades rítmicas (FAISCA, 2003)

Atividade	T (s)	T _c (s)	K _p
Saltos à vontade	0,44 ± 0,15	0,32 ± 0,09	3,17 ± 0,58
Ginástica aeróbica	0,44 ± 0,09	0,34 ± 0,09	2,78 ± 0,60
Show/torcida	0,37 ± 0,03	0,33 ± 0,09	2,41 ± 0,51

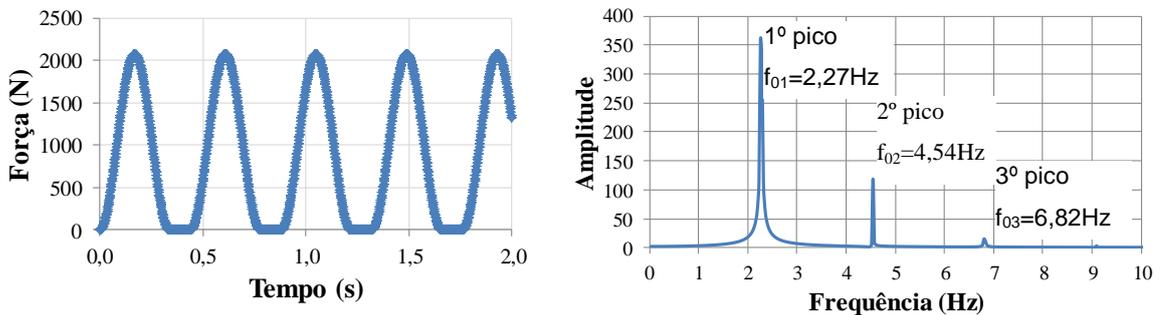
A Figura 13 apresenta os exemplos utilizando a função Hanning com os parâmetros destinados a ginástica aeróbica, mostrando a força pelo domínio do tempo e amplitude pelo domínio da frequência, respectivamente, sendo este último obtido através da transformadas de Fourier. Na realização desta modelagem, considerou-se o peso de cada indivíduo (P) a 800 N, conforme Bachmann (1995).



a) $T=0,39\text{s}$, $T_c=0,34\text{s}$, $k_p=2,78$ e $CD=1$



b) $T=0,47\text{s}$, $T_c=0,34\text{s}$, $k_p=2,78$ e $CD=1$



c) $T=0,44\text{s}$, $T_c=0,34\text{s}$, $k_p=2,78$ e $CD=0,93$

Figura 13 - Sinais de força no tempo e espectro de frequência para ginástica aeróbica. Modelo de carregamento I.

3.3 Modelo de Carregamento II (MC-II) (ELLIS & JI 2004)

O modelo proposto por Ellis e Ji (2004) foi desenvolvido para carregamentos gerados por multidões em atividades humanas rítmicas. Logo, 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.

Os experimentos consistiram na realização de testes, distribuindo espacialmente os grupos de até 64 pessoas em dois pisos. Os grupos estudados foram acomodados de forma segura na estrutura, onde realizaram saltos coordenados, que foram sincronizados ao som de uma música em numa determinada frequência, assim medindo a aceleração e deslocamento no centro do piso.

A equação do carregamento, conforme os resultados obtidos pelos testes experimentais, é descrita na equação (15) de acordo com Smith et al. (2009) e seus parâmetros estão representados na Tabela 10.

$$F(t) = G \left\{ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} r_{n,v} \sin(2n\pi f_p t + \phi_n) \right\} \quad (15)$$

Onde:

- F : função do carregamento dinâmico (N);
- G: : peso de uma pessoa (N);
- $r_{n,v}$: coeficiente de Fourier induzida por v pessoas;
- n : número de termos de Fourier;
- v : número de pessoas;
- ϕ_n : diferença de fase;
- f_p : frequência da atividade (Hz);
- t : tempo (s)

Tabela 10 - 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	$\pi/6$	$-\pi/6$	$\pi/2$	$-5\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$

Na Tabela 10, o parâmetro α é a relação entre período de contato e período do carregamento, de tal maneira que varia de acordo com a atividade exercida.

Conforme a realização dos testes experimentais, obteve-se os três primeiros coeficientes de Fourier (r) em função do número (v) de pessoas, onde estão apresentados nas equações (16), (17) e (18). De acordo com Ellis e Ji (1994), o incremento de precisão da equação (15) considerando 6 primeiros termos de Fourier, para uma função considerando apenas os 3 primeiros, é pouco significativa.

$$r_{1,v} = 1,61v^{-0,082} \quad (16)$$

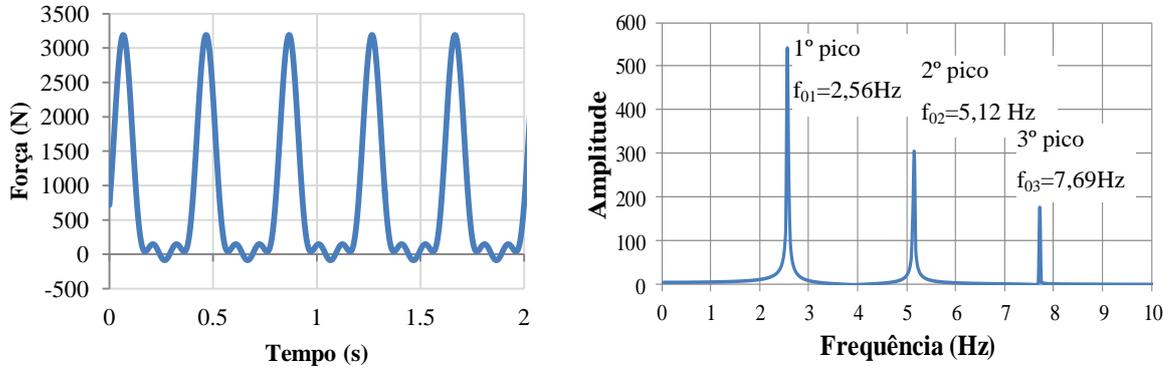
$$r_{2,v} = 0,94v^{-0,24} \quad (17)$$

$$r_{3,v} = 0,44v^{-0,31} \quad (18)$$

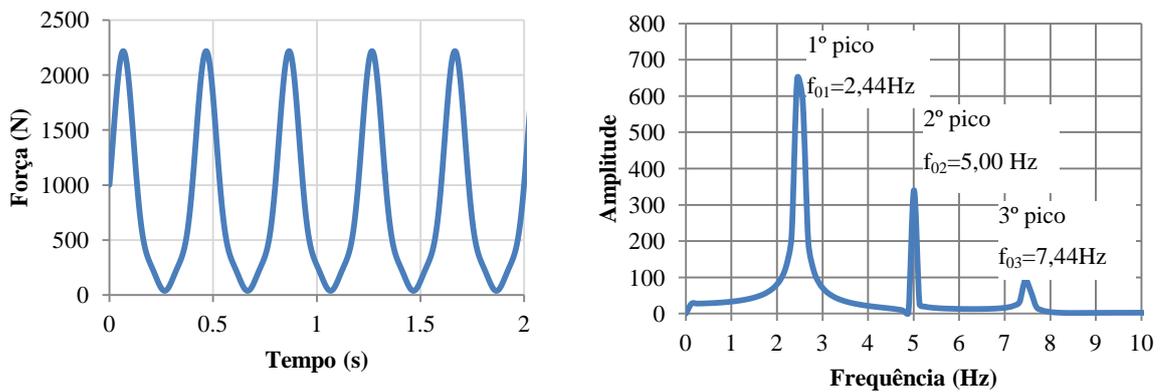
Os autores observaram, experimentalmente, a redução nos harmônicos (coeficientes de Fourier) da resposta dinâmica quando o número de pessoas praticando a atividade simultaneamente era aumentado. Portanto, esta redução contabiliza a falta de uma sincronização dos participantes, assim conduzindo para uma minoração do carregamento dinâmico.

Considerando apenas uma pessoa a praticar atividades rítmicas, o coeficiente de Fourier ($r_{n,1}$) pode ser utilizado de acordo com a Tabela 10, salvo esta exceção, é utilizada as equações 16, 17 e 18 para cargas de multidão. Além disso, apenas a diferença de fase (ϕ_v) para "salto normal", encontrada na Tabela 10, deve ser utilizada para grupo de pessoas realizando saltos.

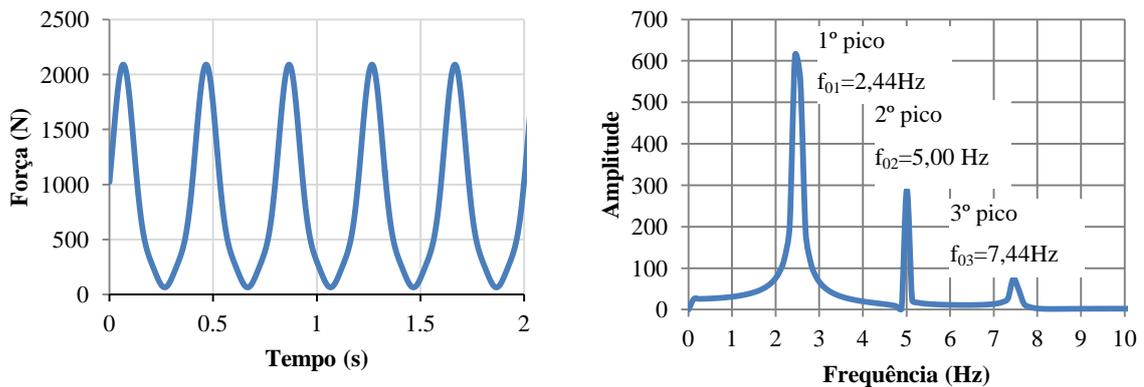
Na Figura 14 são apresentados os exemplos de sinais da força no tempo, referente ao carregamento dinâmico destinado à prática de ginástica aeróbica.



a) 1 pessoa: $v = 1$, $r_{1,v} = 1,61$, $r_{2,v} = 0,94$, $r_{3,v} = 0,44$



a) 32 pessoa: $v = 32$, $r_{1,v} = 1,21$, $r_{2,v} = 0,41$, $r_{3,v} = 0,15$



a) 64 pessoa: $v = 64$, $r_{1,v} = 1,14$, $r_{2,v} = 0,35$, $r_{3,v} = 0,12$

Figura 14 - Sinais de força no tempo e espectro de frequência para ginástica aeróbica. Modelo de carregamento II

3.4 Comparação entre os modelos de carregamento I e II (MC-I e MC-II)

A Figura 15 abaixo ilustra a comparação entre os modelos de carregamento dinâmicos I e II (MC-I e MC-II), referente a 1 pessoa praticando ginástica aeróbica.

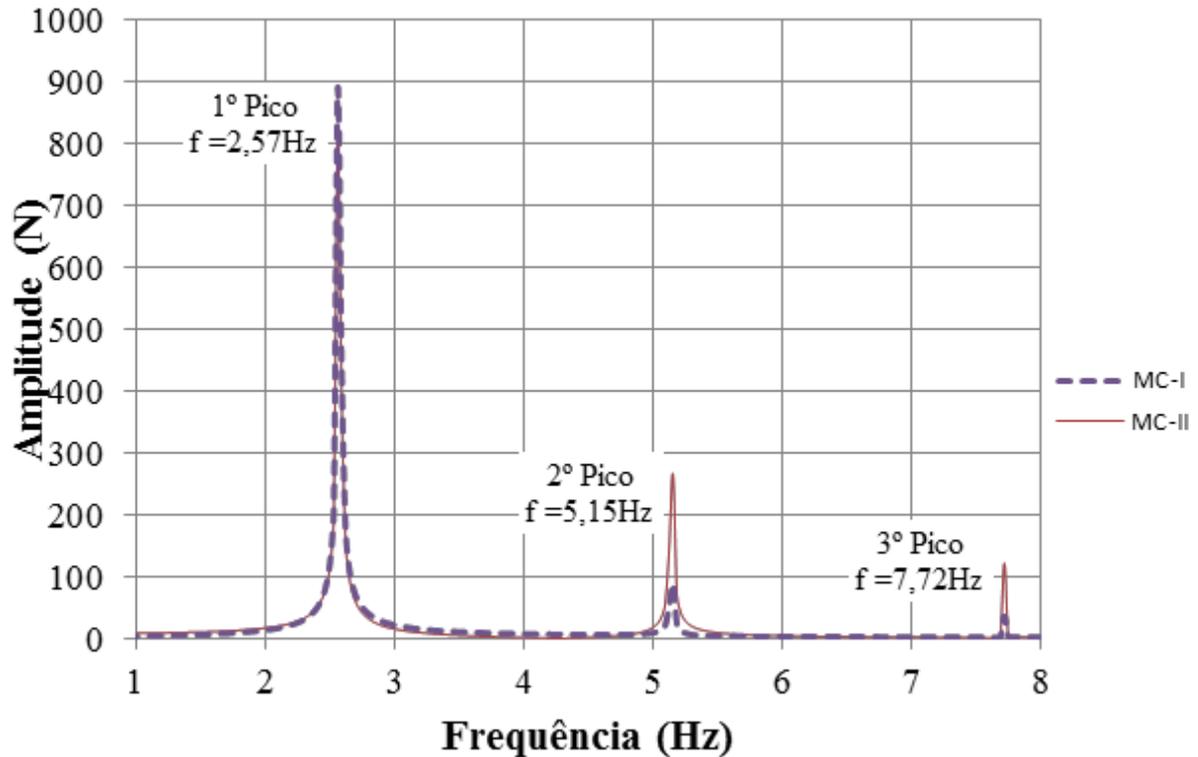
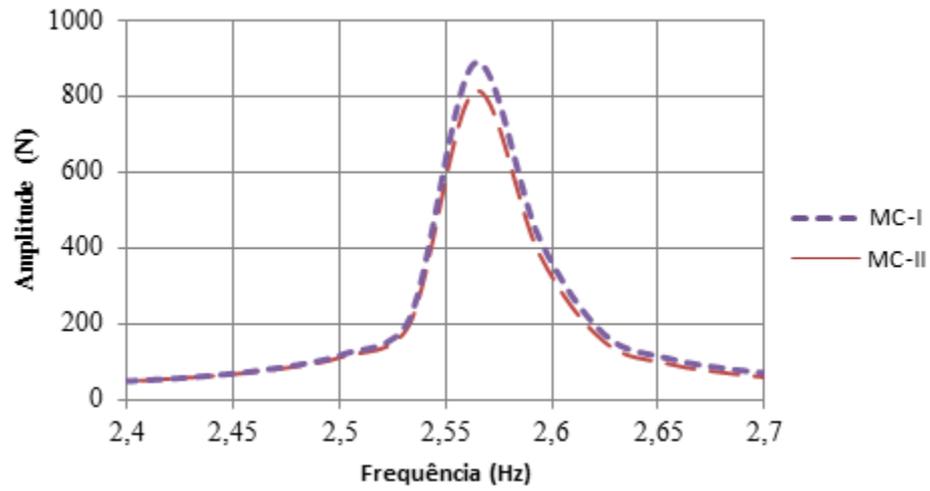
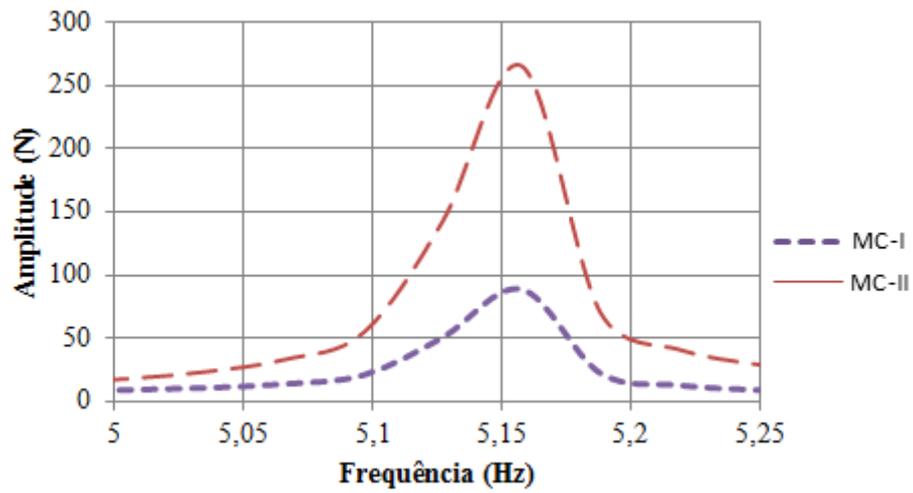


Figura 15 - Comparação dos espectros de frequências dos modelos de carregamento (MC-I e MC-II) referente a 1 pessoa praticando ginástica aeróbica.

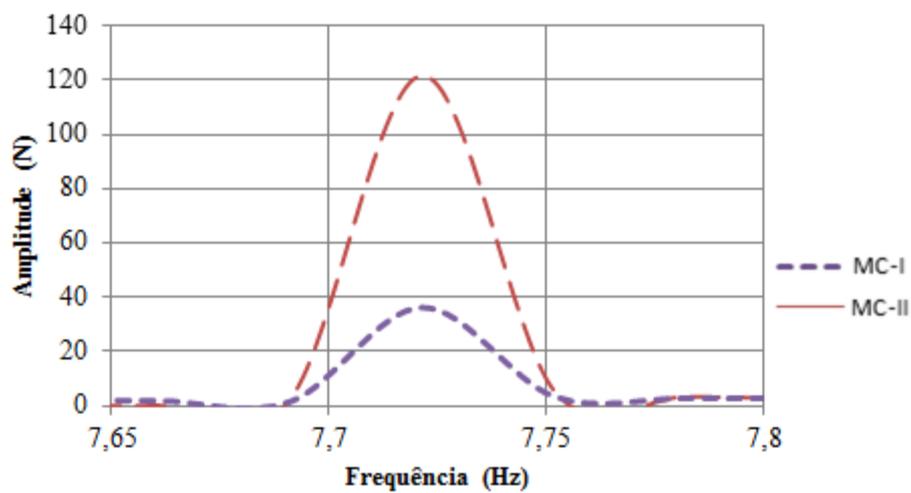
Analisando-se os resultados da Figura 15, observa-se que em ambos os modelos de carregamento (MC-I e MC-II), os três picos são bem definidos, diferenciando-se apenas pela amplitude das respostas no domínio da frequência. Cabe ressaltar que as maiores amplitudes de resposta ocorrem nas frequências de 2,57Hz, 5,15Hz e 7,72Hz, respectivamente, associados ao 1º, 2º e 3º pico. Em relação ao 1º pico, observa-se que a maior transferência de energia ocorre no modelo de carregamento I (MC-I). Por outro lado, quando são verificados o 2º e 3º picos, claramente, o modelo de carregamento II (MC-II) apresenta as maiores amplitudes de resposta (maior transferência de energia) em relação ao modelo de carregamento I (MC-I).



a) Detalhe do 1º Pico.



a) Detalhe do 2º Pico



c) Detalhe do 3º Pico.

Figura 16 - Aproximação dos picos da Transformada de Fourier

Neste estudo, a frequência de maior importância a se analisar quando as atividades de aeróbica são consideradas refere-se ao 3° pico da resposta ($f = 7,72\text{Hz}$), onde se encontra a décima quinta frequência do piso misto e também o 3° harmônico da atividade estudada (ginástica aeróbica). Deste modo, observa-se através da Figura 16, uma diferença significativa da ordem de 336% em relação a amplitude do pico de resposta (transferência de energia da resposta) do modelo de carregamento II (MC-II) em relação ao modelo de carregamento I (MC-I). Certamente, tal fato irá influenciar nas análises dinâmicas do piso, visto que o comportamento destes modelos de carregamento (MC-I e MC-II) são bastante distinto.

4 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

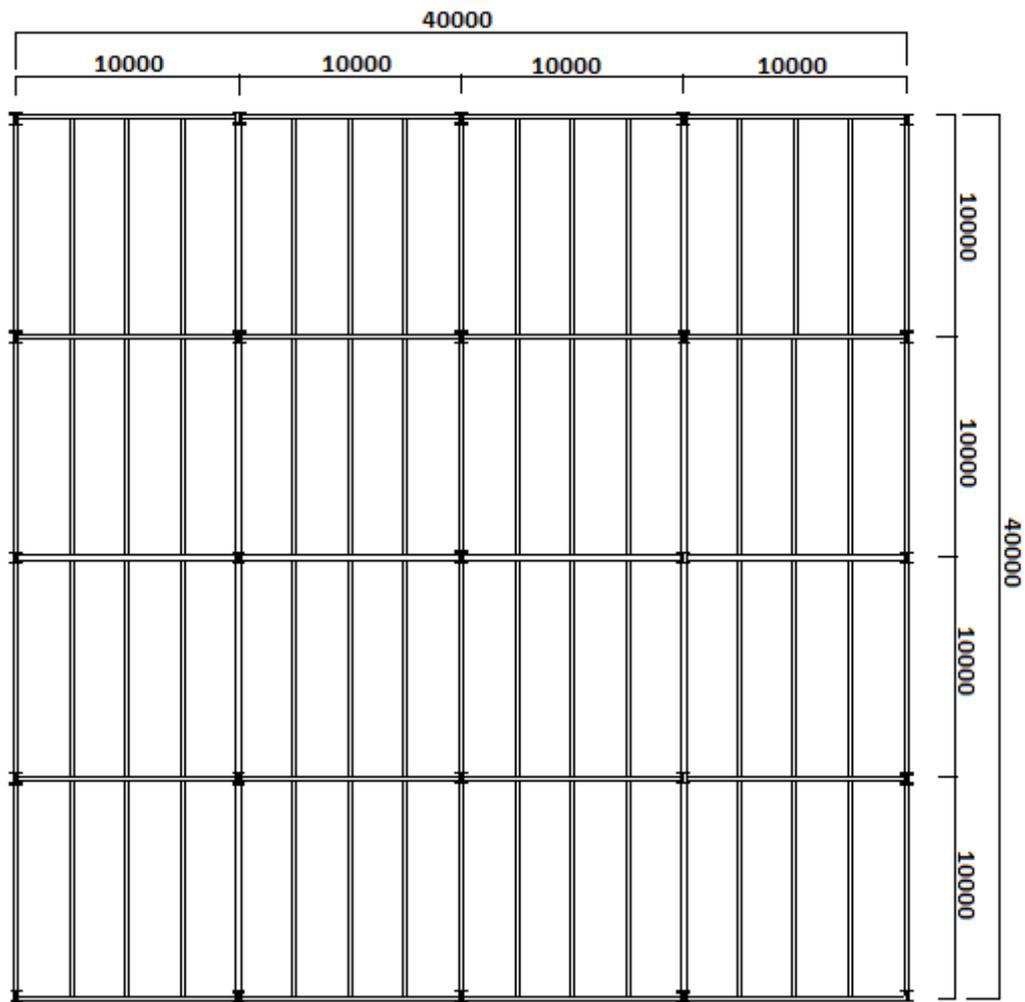
Este capítulo aborda a apresentação do sistema estrutural do piso misto investigado, através da descrição de suas características físicas referentes aos materiais constituintes e geometria. Seguidamente é apresentado o posicionamento das cargas dinâmicas sobre a estrutura e a localização dos pontos a se obter as repostas dinâmicas.

4.1 Descrição do modelo estrutural

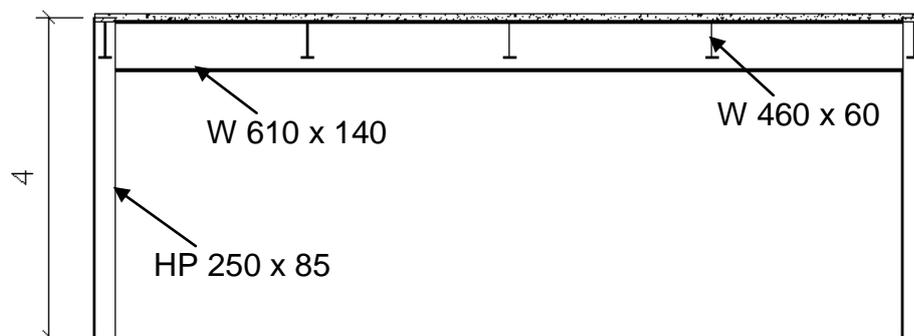
O sistema estrutural do piso é composto pela laje de concreto armado e por suas vigas (principais e secundárias) e pilares de perfis metálicos, representando assim a interação total do sistema misto (aço- concreto). A laje possui dimensões totais (eixo a eixo de colunas) de 40 m x 40 m, totalizando uma área de 1600 m², nos quais foram divididos em 16 painéis com dimensões de 10m x 10m. O espaçamento entre as vigas secundárias é igual a 2,5 m, enquanto nas vigas principais é 10 m. Os pilares tem uma altura de 4m e se situam nas extremidades dos painéis. A visualização da vista superior do piso misto e da seção transversal do painel, respectivamente, está ilustrada na Figura 17.

Os perfis metálicos utilizados nos elementos constituintes do piso misto, como as vigas principais, as quais se apoiam nos pilares, e secundárias, apoiadas nas vigas principais, são respectivamente W 610 x 140 e W 460 x 60, enquanto os pilares são representados pelo perfil HP 250 x 85. A Tabela 11 exhibe as propriedades geométricas dos perfis utilizados e na Figura 18 é ilustrada a seção genérica destes perfis. Em relação às suas propriedades físicas, os perfis metálicos são constituídos por um aço com tensão de escoamento de 345 MPa e módulo de elasticidade (E) de 205 GPa, e a laje de concreto armado possui espessura de 10 cm, resistência característica à compressão (fck) de 30 MPa e módulo de elasticidade secante (Ecs) de 26 GPa. O coeficiente de Poisson (ν) utilizado para o aço e o concreto é de 0,3 e 0,2; respectivamente (NBR 8800,2008).

As ligações entre os elementos estruturais no piso, que são as ligações viga-viga e viga-coluna são consideradas respectivamente flexíveis e rígidas. É importante notar que o sistema estrutural atende ao estado limite último (ELU) segundo a NBR 8800(2008).



a) Vista superior. Dimensões em (mm)



b) Seção Transversal do painel. Dimensões em (m)

Figura 17 - Modelo estrutural do piso misto (aço-concreto). Dimensões em metros

Tabela 11 - Características geométricas dos das vigas e colunas. Dimensões em milímetros

Tipo de perfil	Altura (d)	Largura da mesa (b _f)	Espessura da mesa superior (t _f)	Espessura da mesa inferior (t _f)	Espessura da alma (t _w)
Viga - W 610 x 140	617	230	22,2	22,2	13,1
Viga - W 460 x 60	455	153	13,3	13,3	8,0
Coluna - HP 250 x 85	254	260	14,4	14,4	14,4

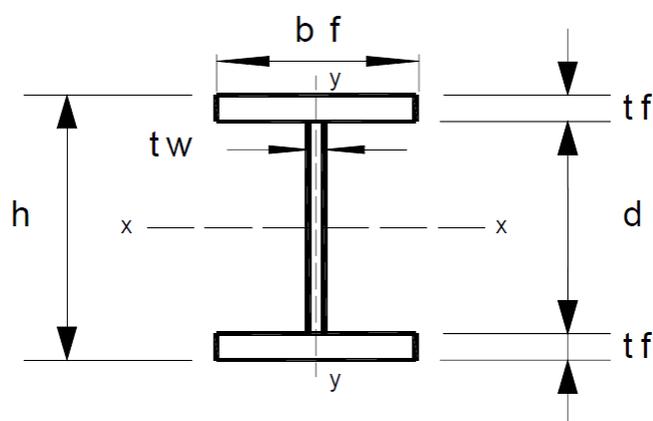


Figura 18 - Seção genérica dos perfis metálicos

4.2 Distribuição do carregamento dinâmico

O carregamento dinâmico, proveniente da prática de ginástica aeróbica, foi distribuído sobre os painéis do piso misto em quatro situações, conforme a ilustração da Figura 19, variando apenas o número de pessoas, sendo assim, a primeira situação correspondente a oito pessoas, a segunda, com dezesseis, a terceira com trinta e duas e, por fim, o quarto caso representando sessenta e quatro pessoas. Desse modo, pode-se verificar a influência da variação do número de pessoas na resposta dinâmica do piso misto.

A simulação das quatro situações descritas acima foram representadas pelos modelos de carregamento I e II (MC-I e MC-II), desenvolvidos respectivamente por

Faisca (2003) e Ellis e Ji (2004), no qual respeitou-se uma taxa de ocupação de 0,25 pessoas/m² (BACHMANN et al,1995) e também considerou-se nas funções matemáticas representativas destes modelos de carregamento o peso médio de um indivíduo igual a 800 N (BACHMANN & AMMANN, 1987).

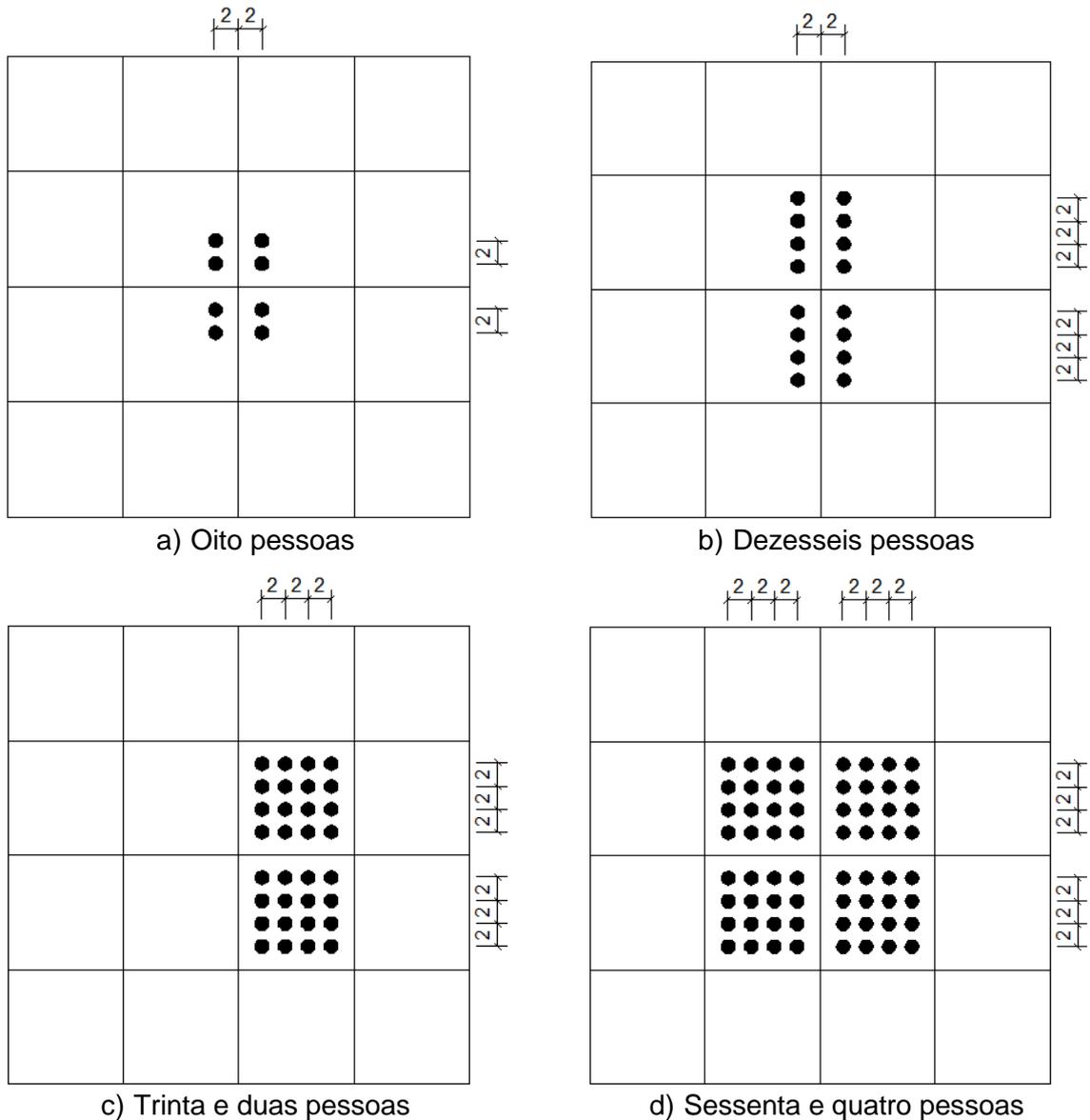


Figura 19 - Quatro situações de indivíduos praticando atividade aeróbica. Dimensões em metros

A resposta dinâmica do modelo foi obtida no centro de cada um dos nós dos 16 painéis, enumerados de A até P, da laje de concreto de acordo com a Figura 20.

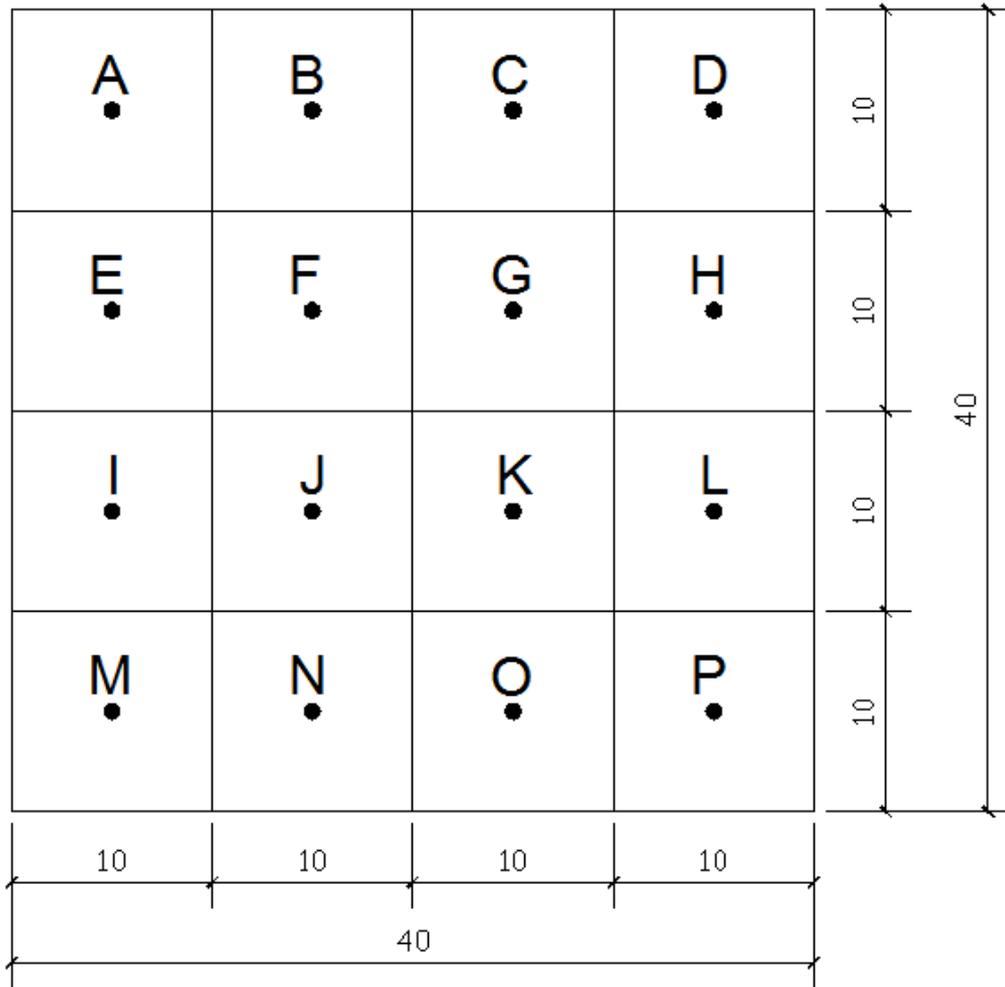


Figura 20 - Localização dos nós analisados no piso misto

5 MODELAGEM NUMÉRICA VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do modelo numérico-computacional da estrutura abordada no capítulo 4, de tal forma que simula por meio de elementos finitos os componentes tridimensionais (vigas, colunas e laje) da estrutura. A seguir são abordados a discretização em elementos finitos do modelo estrutural e o amortecimento estrutural referente ao piso misto (aço-concreto).

5.1 Descrição dos elementos finitos

A modelagem numérica foi realizada utilizando o programa ANSYS (2007), baseando-se no Método dos Elementos Finitos (MEF). O Método dos Elementos Finitos é um procedimento numérico destinado à solução de problemas da mecânica dentro de uma tolerância aceitável.

Neste modelo de piso misto utilizou-se o elemento finito tridimensional BEAM44, para representar as vigas e colunas, no qual os efeitos de flexão e de torção são considerados. A laje de concreto armado foi representada por elementos de casca do tipo SHELL63. A representação da estrutura modelada pelos elementos finitos está ilustrada na Figura 26. Com o propósito de simular a interação parcial entre a laje de concreto e as vigas, isto é, o deslizamento entre ambos, foi utilizado o elemento de mola não linear (COMBIN39) a fim de representar os conectores. Utilizou-se o elemento de mola (COMBIN7) para simular o comportamento das ligações estruturais viga-viga e viga-coluna.

O modelo do piso misto resultou em uma estrutura com 29874 nós, 3920 elementos tridimensionais de viga, 25600 elementos de casca, e 167069 graus de liberdade, de acordo com o modelo numérico desenvolvido no programa ANSYS (2007)

O elemento BEAM44, apresentado na Figura 21, representa as vigas e colunas de aço como um elemento uniaxial que expressa a capacidade de tensão, flexão nos nós I e J. O elemento possui seis graus de liberdade em cada nó, sendo três translações e três rotações nas direções x, y e z. Ele permite a utilização de

qualquer tipo de seção transversal, desde que se definam as propriedades necessárias para tal. Os eixos principais y e z estão localizados na seção transversal.

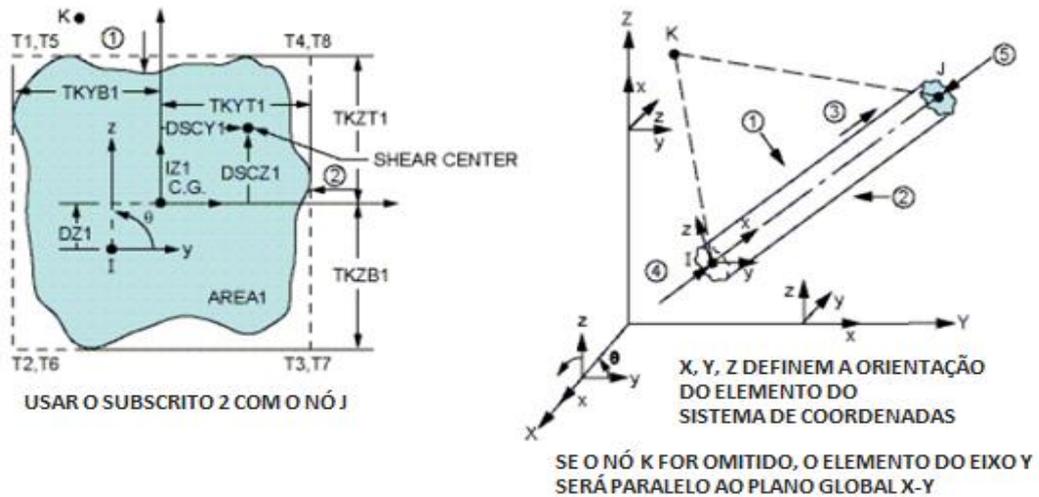


Figura 21 - Elemento BEAM44 (ANSYS, 2007)

É importante ressaltar este elemento permite levar em conta a excentricidade existente entre o eixo da viga e o plano médio da laje. Assim, esta excentricidade garante a compatibilidade de deformações entre os nós dos elementos de viga tridimensionais e os elementos de placa e influência de forma direta frequências naturais do modelo. Dessa forma, este modelo simula a situação real entre as lajes e as vigas, como apresentado na Figura 22.

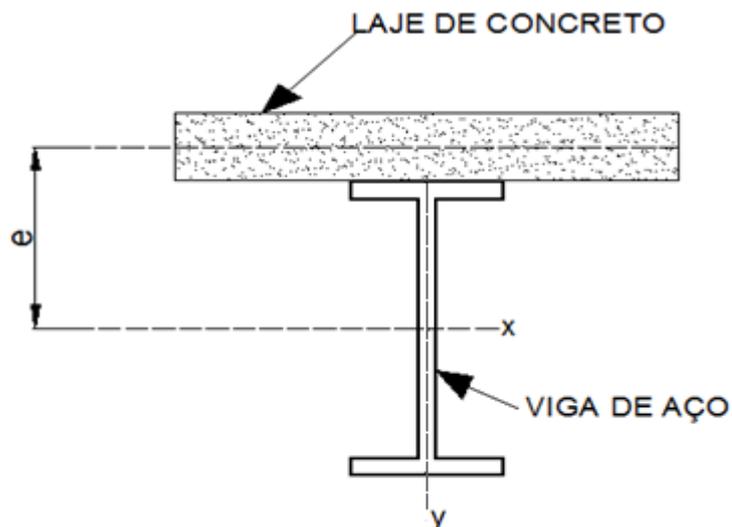


Figura 22 - Excentricidade entre a laje a viga

O elemento SHELL63, conforme mostrado na Figura 23, é definido por quatro nós. Este elemento considera os efeitos de flexão e membrana, como também se caracteriza por possuir seis graus de liberdade por nó sendo três translações e três rotações nas direções x , y e z . As cargas podem ser aplicadas ortogonalmente e também paralelamente sobre este elemento.

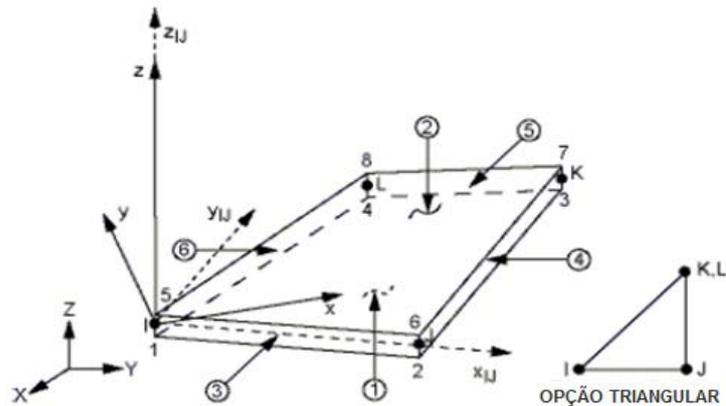


Figura 23 - Elemento SHELL63 (ANSYS, 2007)

O elemento COMBIN7 refere-se a um elemento de ligação 3-D que pode ser utilizado para ligar duas ou mais partes de um modelo em um nó coincidente. Este elemento, representado pela Figura 24, apresenta uma capacidade de flexibilidade, atrito e amortecimento. Tal elemento possui uma importante característica de deformação, em que um sistema de coordenadas local está fixado e se move com o conjunto. O elemento pode ser utilizado na simulação de rótulas em sistemas estruturais.

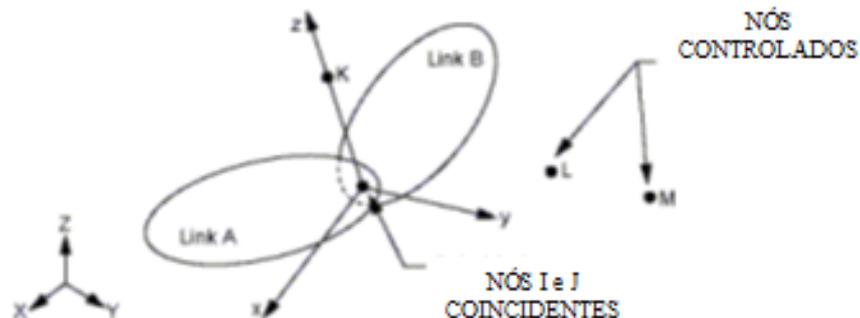


Figura 24 - Elemento COMBIN7 (ANSYS, 2007)

O elemento COMBIN39 é representado pela Figura 25, possuindo capacidade de força-deflexão generalizada que pode ser usado em qualquer.

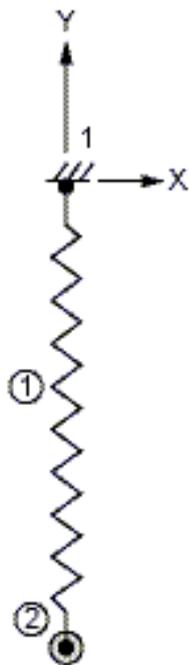


Figura 25 - Elemento COMBIN39 (ANSYS, 2007)

5.2 Considerações simplificadoras

O modelo computacional adotado considera as seguintes hipóteses: as seções transversais permanecem planas após as solicitações de carregamento (hipótese de Bernoulli); os materiais (aço-concreto) trabalham no regime elástico-linear e apresentam isotropia. A Figura 26 apresenta o modelo computacional do piso misto (aço-concreto).

No que concerne às ligações entre os elementos estruturais do piso, as ligações viga-viga do piso misto foram consideradas flexíveis, isto é, rotuladas através da liberação dos graus de liberdade relativos à rotação e as demais ligações (viga-coluna) foram consideradas como rígidas.

No que diz respeito às condições de contorno dos modelos, ambos foram considerados como apoiados, quer dizer, não foram restringidos os graus de liberdade relativos à rotação.

5.3 Modelagem numérico-computacional

O modelo numérico-computacional adotou uma malha de elementos finitos de 0,25 m, no que diz respeito aos elementos estruturais associados às vigas, colunas e a laje de concreto armado. Desse modo, os modelos numéricos possuem um grau de refinamento adequado, permitindo uma boa representação do comportamento estrutural (frequências naturais, modos de vibração) e precisão das análises realizadas (deslocamentos e acelerações), como também a distribuição das pessoas sobre o piso. Na sequência do texto, as Figuras 26, 27, 28,29 e 30 apresentam o piso misto estudado nesta dissertação, modelado e discretizado via elementos finitos, por meio do emprego do programa computacional ANSYS (2007).

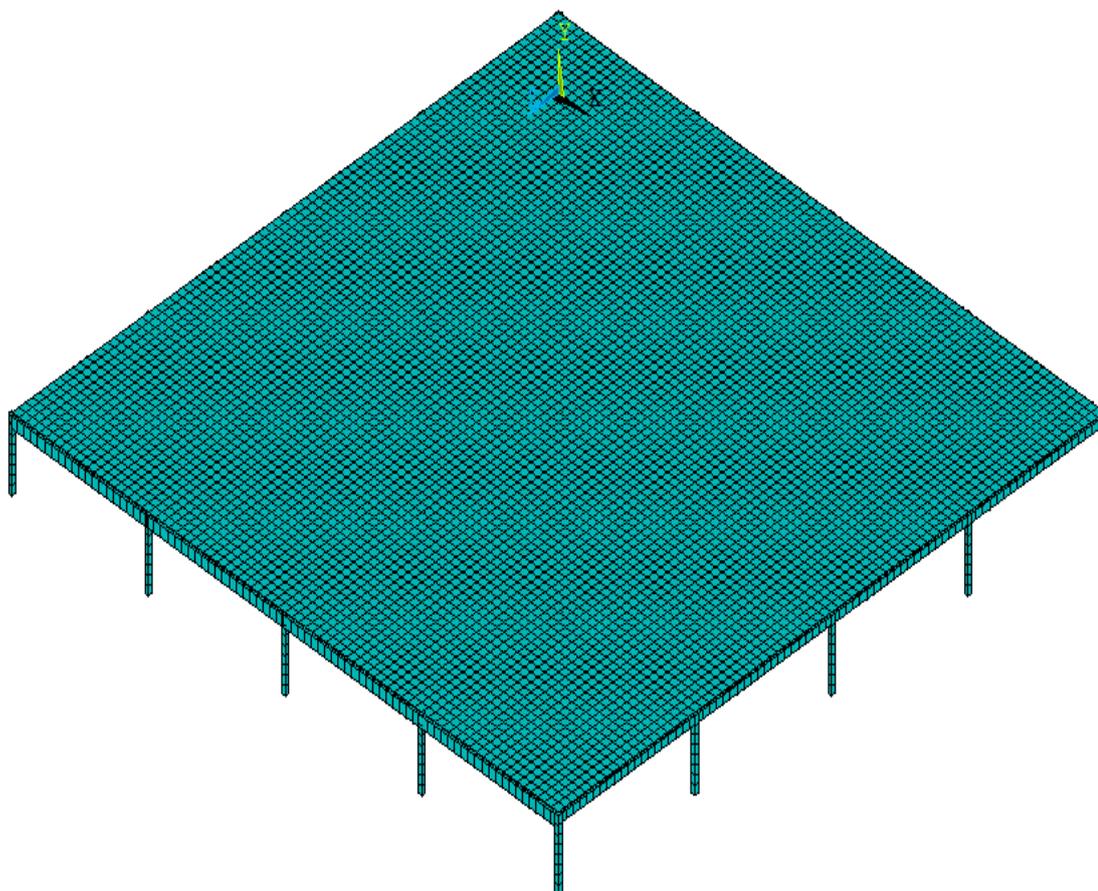


Figura 26 - Modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto) (ANSYS, 2007)

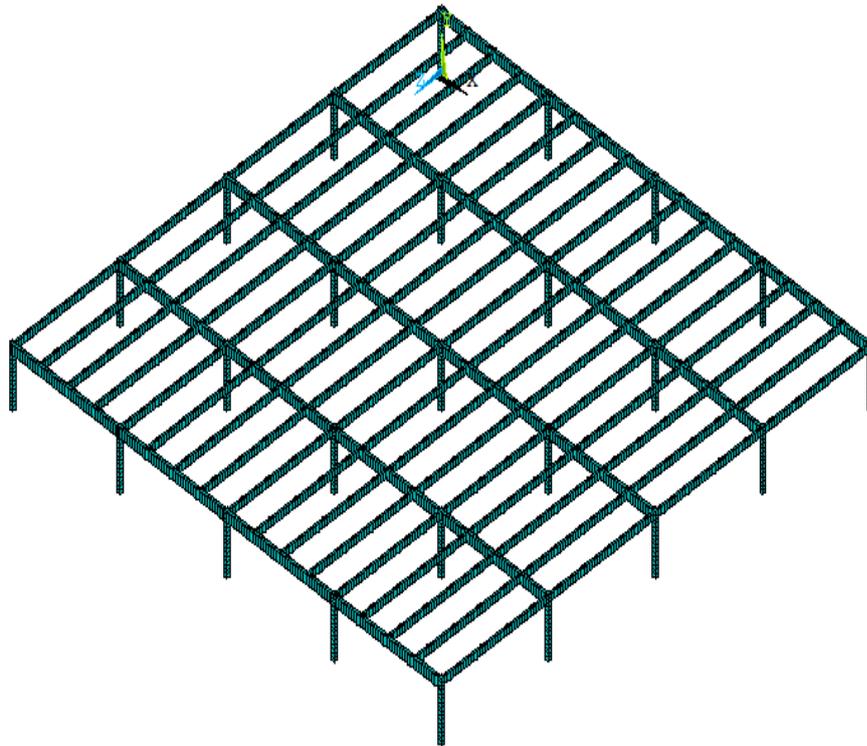


Figura 27 - Vista isométrica do modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto)
(ANSYS, 2007)

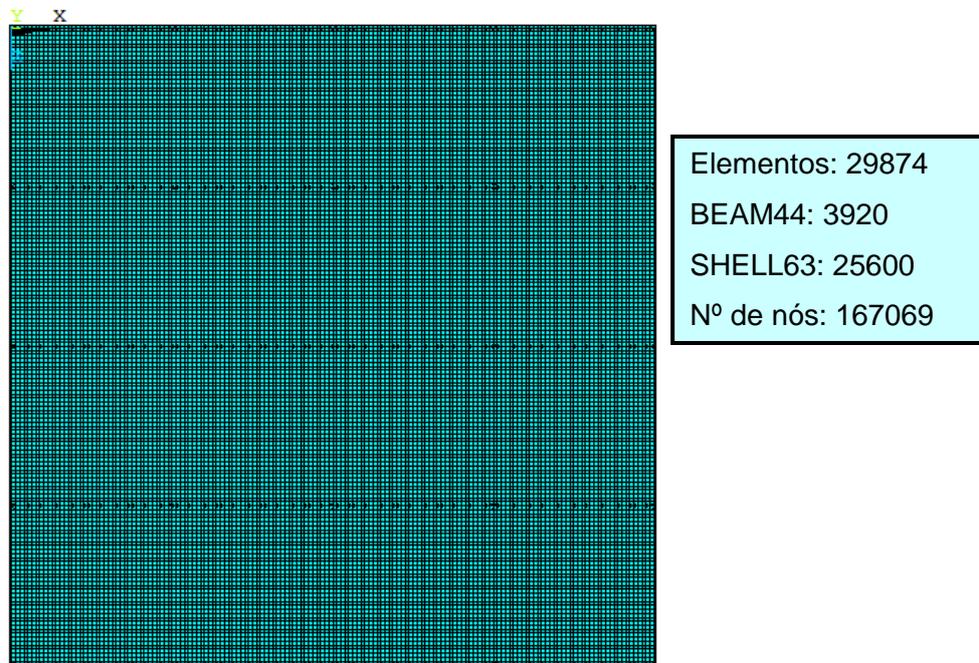


Figura 28 - Vista superior do modelo em elementos finitos (aço-concreto) (ANSYS, 2007)

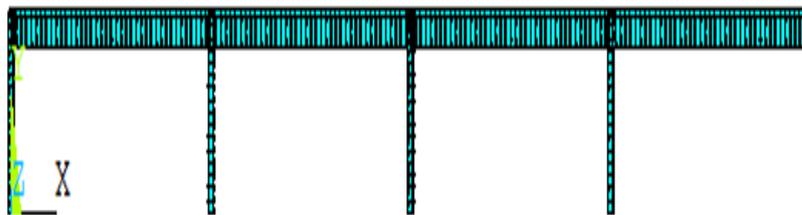


Figura 29 - Vista do plano XY do modelo em elementos finitos (aço-concreto) (ANSYS, 2007)

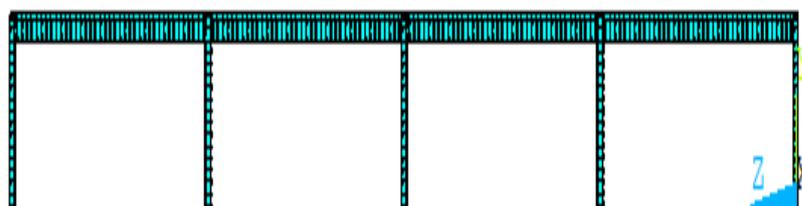


Figura 30 - Vista do plano ZY do modelo em elementos finitos (aço-concreto) (ANSYS, 2007)

5.4 Modelagem do amortecimento estrutural

O amortecimento é caracterizado pela dissipação da energia mecânica proveniente da vibração da estrutura. A definição deste amortecimento estrutural é uma tarefa com alta complexidade e dificuldade, pois não pode ser determinada através da geometria da estrutura, das dimensões dos elementos estruturais e do amortecimento dos materiais (alvenaria, acabamentos, divisórias e mobiliários), segundo Clough e Penzien (1993).

A maneira mais adequada de definição o amortecimento estrutural é utilizando a taxa de amortecimento modal em vez de obter os coeficientes da matriz de amortecimento, visto que a taxa de amortecimento modal ou contribuição pode ser determinada experimentalmente ou estimada com adequada precisão, de acordo com Clough e Penzien (1993). Entretanto, existem casos em que é necessária a determinação da matriz de amortecimento para a obtenção da resposta dinâmica. Nestes casos, a análise dinâmica transiente é realizada através do método de integração numérica de Newmark.

Exceto casos que necessitem determinar a matriz de amortecimento, utiliza-se a matriz de amortecimento de Rayleigh, que considera a uma taxa de contribuição da matriz de rigidez (β) e outra da matriz de massa (α), de acordo com a equação (19). De acordo com esta equação, considera-se M a matriz de massa e K a matriz de rigidez do sistema estrutural, segundo Clough e Penzien (1993) e Chopra (2007).

$$C = \alpha M + \beta K \quad (19)$$

A taxa de amortecimento para o i-ésimo modo é representada pela equação (20):

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2 \omega_{0i}} + \frac{\beta \omega_{0i}}{2} \quad (20)$$

Onde ω_{0i} representa a frequência natural circular em rad/s.

Isolando os parâmetros α e β da equação (19), para as duas frequências mais importantes adotadas como referência (ω_{01} e ω_{02}), são obtidas as equações (21) e (22), apresentadas abaixo.

$$\alpha = 2 \xi_1 \omega_{01} - \beta \omega_{01} \omega_{01} \quad (21)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_2 \omega_{02} - \xi_1 \omega_{01})}{\omega_{02} \omega_{02} - \omega_{01} \omega_{01}} \quad (22)$$

As deduções matemáticas para o amortecimento de Rayleigh são encontradas em Clough e Penzien (1993).

Os valores de α e β são obtidos a partir do conhecimento da frequência natural ω_{01} ou frequência fundamental da estrutura, e ω_{02} como a segunda frequência mais importante no carregamento. A partir desses valores, obtém-se a taxa de amortecimento estrutural adequada ao piso.

Conforme a ISO 10137 (2007), a taxa de amortecimento para pisos depende do tipo de construção, material, presença de elementos não estruturais, idade, qualidade da construção, amplitude e frequência da vibração. A presença ou

ausência de fissuras em estruturas de concreto é também significativa. A Tabela B.2 da ISO 10137 (2007, p. 29), apresenta os valores típicos da taxa de amortecimento para o modo fundamental de pisos mistos e de concreto armado. Deste modo, a taxa de amortecimento estrutural escolhida foi de 1% SCI (2009) para o piso investigado neste trabalho.

A utilização de uma taxa de amortecimento da ordem de 1% é citada no guia SCI (2009) para vários sistemas estruturais. Essa taxa refere-se ao sistema estrutural sem acabamento, onde poucos elementos não estruturais contribuem para o amortecimento, podendo ser útil na avaliação das vibrações pelo engenheiro na análise do conforto humano da estrutura antes da construção estar finalizada.

6 ANÁLISE ESTÁTICA

Esta análise consiste na determinação do deslocamento máximo que ocorre devido a um carregamento estático. Na realização desta análise utilizou-se o programa computacional ANSYS (2007), onde as respostas obtidas são avaliadas conforme o estado limite de serviço.

O carregamento estático é constituído pelas cargas provenientes das ações permanentes, relativo ao peso próprio e de elementos construtivos fixos, e variáveis, correspondentes ao tipo de utilização da estrutura. O peso próprio e revestimento permanente da estrutura utilizado foi de 1 kN/m², enquanto a carga de utilização do piso é de 5 kN/m², baseada na NBR 6120 (1980) no item 2.2 da Tabela 2. Desta maneira, o carregamento estático total é igual a 6 kN/m², uniformemente distribuído no piso misto (aço-concreto).

Em relação às normas de projeto vigentes, o anexo L da NBR 8800 (2008), referente à vibração de estruturas destinadas a atividades rítmicas, tais como academias, o deslocamento vertical total do piso causado pelas ações variáveis, calculado considerando-se as vigas como biapoiadas e usando-se as combinações frequentes de serviço, dadas em 4.7.7.3.3, não supere 5 mm. Por outro lado a mesma norma, no seu item Q.3.2.2, estabelece que o deslocamento vertical de lajes mistas de aço e concreto não pode ser maior que $L_F/350$, onde L_F é o vão teórico da laje na direção das nervuras.

6.1 Deslocamento Vertical

O comportamento da estrutura diante das cargas estáticas é representado pela sua deformada na Figura 31, e os deslocamentos obtidos no centro dos painéis do piso investigado apresentados na Tabela 12.

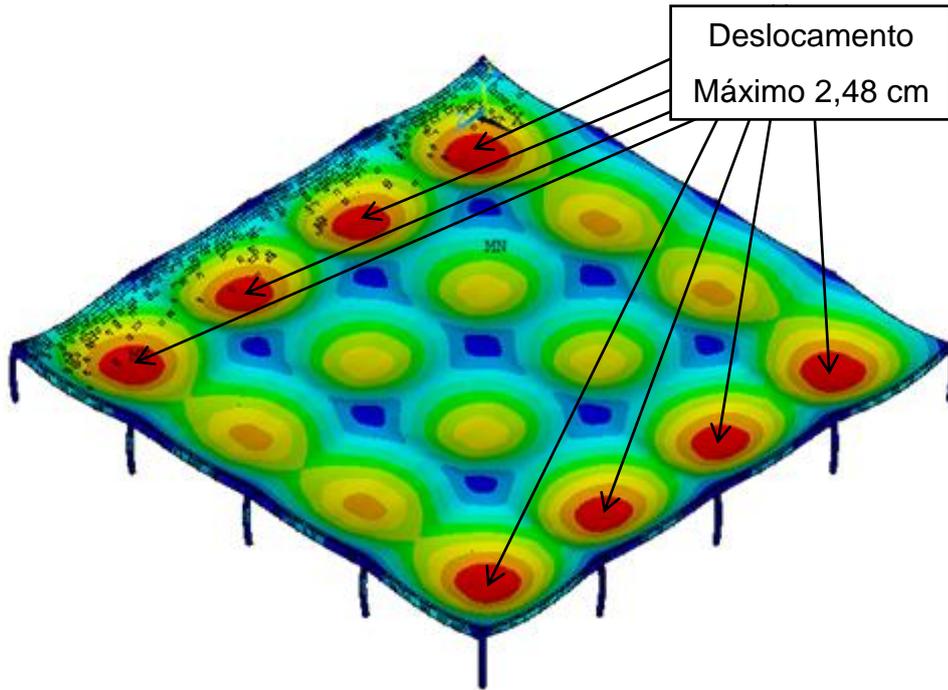


Figura 31 - Deslocamentos estáticos do piso misto (aço-concreto)

Tabela 12 - Deslocamentos dos nós de análise do piso misto

Nós	Deslocamentos (cm)
A	2,48
B	1,94
C	1,94
D	2,48
E	2,33
F	1,75
G	1,75
H	2,33
I	2,33
J	1,75
K	1,75
L	2,33
M	2,48
N	1,94
O	1,94
P	2,48

O deslocamento máximo do piso misto é encontrado nas extremidades, referentes aos nós A, D, M e P, no valor de 2,48 cm, conforme a Figura 31. Estes valores e dos outros nós analisados no estudo encontram-se na Tabela 12. Inicialmente, ao comparar-se o valor do deslocamento estático máximo do sistema, em relação ao valor recomendado pela NBR 8800 (2008), para estruturas destinadas a pratica de atividades aeróbica, percebe-se que o limite estabelecido pela referida norma foi excedido ($v_{\text{máx}} = 2,48 \text{ cm} > v_{\text{lim}} = 0,5 \text{ cm}$). Assim sendo, pode-se concluir que este piso é suscetível a vibrações desconfortáveis para as pessoas. Por outro lado, o estado limite de serviço da estrutura, utilizado correntemente na prática de projeto, no que diz respeito as cargas estáticas, é atendido devido ao fato de que o valor do deslocamento máximo da estrutura não ultrapassa o deslocamento máximo recomendado pela norma NBR 8800 (2008) ($v_{\text{máx}} = 2,48 \text{ cm} < v_{\text{lim}} = 2,86 \text{ cm}$).

6.2 Momentos Fletores

Nas Figuras 32 a 34 são apresentados os diagramas de momentos fletores das vigas principais e secundárias do piso misto estudado. A Tabela 13 mostra os valores máximos dos momentos fletores.

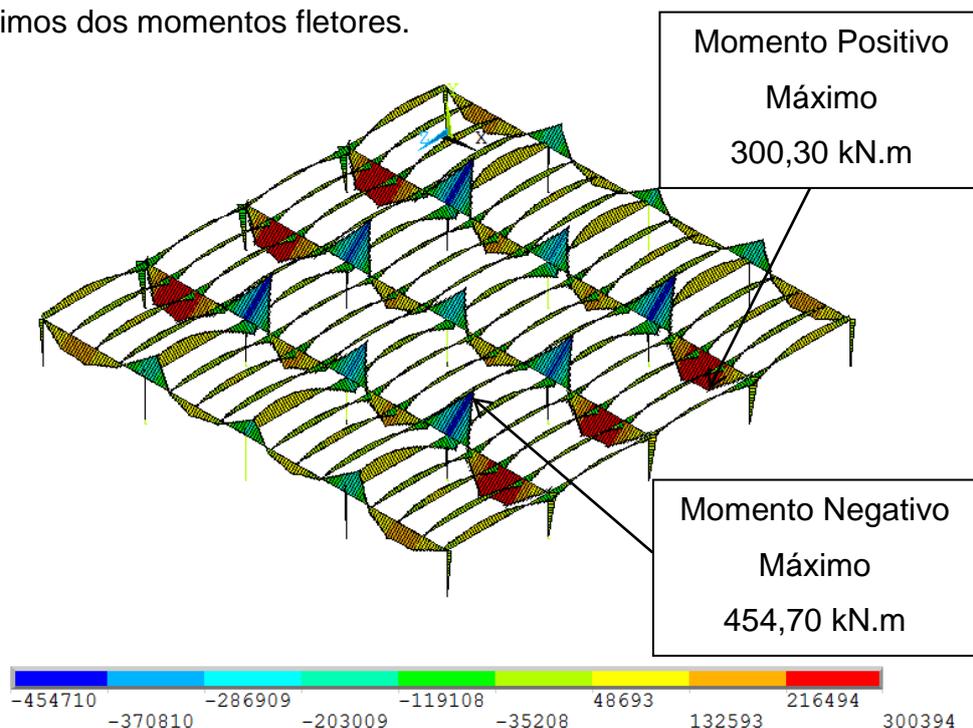


Figura 32 - Diagrama de momento fletor do piso misto

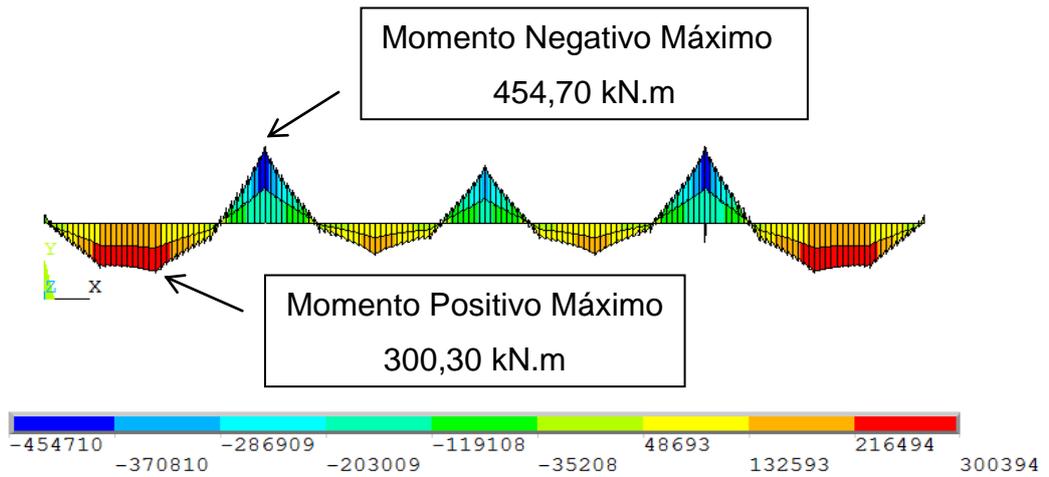


Figura 33 - Diagrama de momento fletor das vigas principais do piso misto

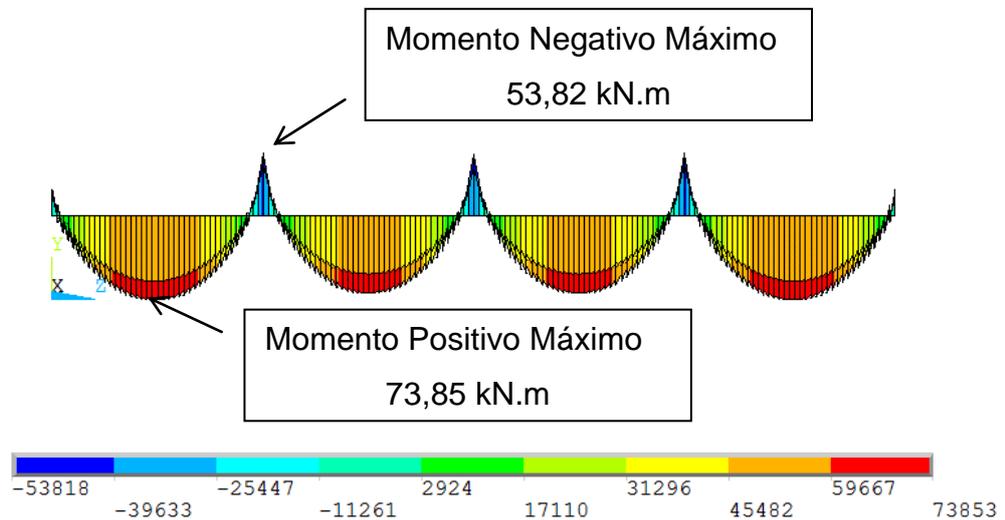


Figura 34 - Diagrama de momento fletor das vigas secundárias do piso misto

Tabela 13 - Valores dos momentos fletores máximos positivos e negativos do piso misto

Momentos Fletores (kN.m)			
Viga principal		Viga secundária	
Positivo	Negativo	Positivo	Negativo
300,30	454,70	73,85	53,82

7 FREQUENCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

Este capítulo tem o propósito de investigar o comportamento dinâmico do sistema estrutural, através da análise de vibração livre. Esta análise é realizada pelo emprego do programa computacional ANSYS (2007), onde são obtidas as frequências naturais (autovalores) e seus respectivos modos de vibração (autovetores). Segundo Avelino (2008), esta análise constitui uma indicação de como esta responderá ao carregamento atuante sobre a mesma.

Os valores das frequências naturais e os seus modos de vibração são apresentados, respectivamente na Tabela 14 e Figuras 35 e 36.

Tabela 14 - Frequências naturais do piso misto (aço-concreto)

Frequências Naturais f_{0i} (Hz)	Piso misto
f_{01}	6,06
f_{02}	6,36
f_{03}	6,44
f_{04}	6,65
f_{05}	6,92
f_{06}	7,05
f_{07}	7,11
f_{08}	7,12
f_{09}	7,13
f_{10}	7,27
f_{11}	7,35
f_{12}	7,44
f_{13}	7,55
f_{14}	7,62
f_{15}	7,72
f_{16}	7,79

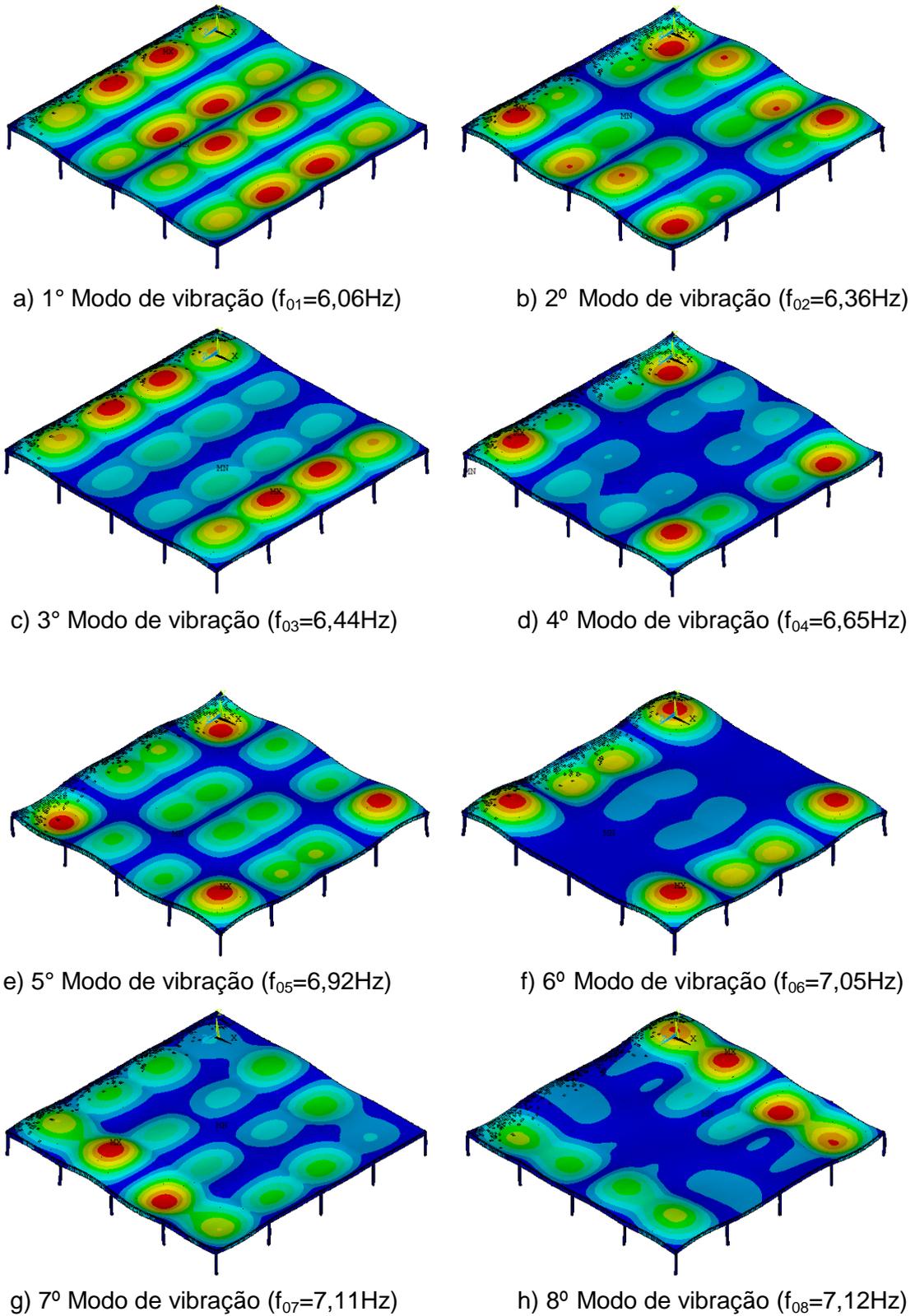


Figura 35 - 1º ao 8º modo de vibração do piso misto investigado

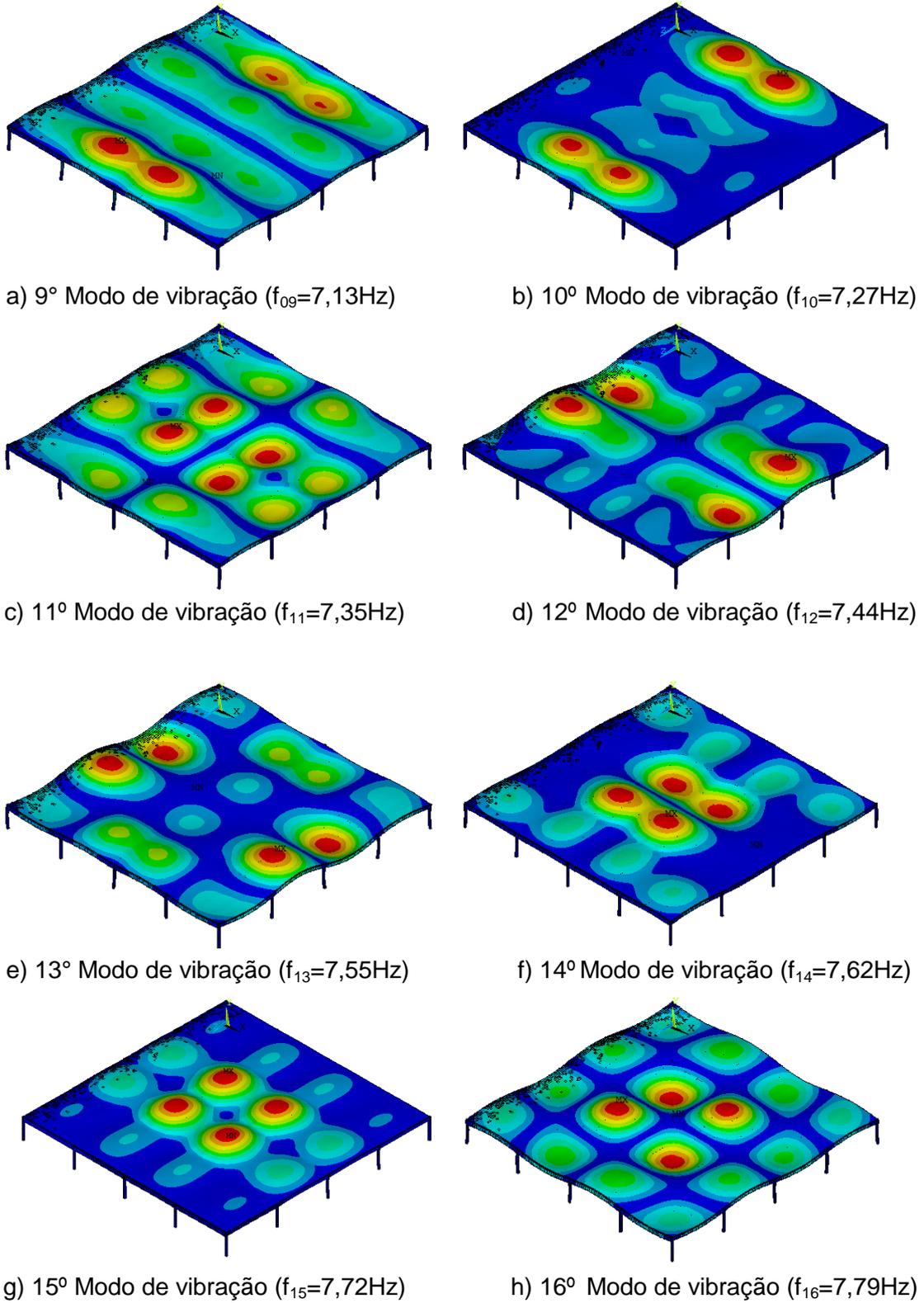


Figura 36 - 9° ao 16° modo de vibração do piso misto investigado

No que tange às características das formas modais, observa-se que os modos de vibração referentes às Figuras 35 e 36 correspondem à flexão do piso misto.

Através da análise modal, as dezesseis primeiras frequências naturais do piso misto, variando de 6,06 a 7,79Hz (Tabela 13), encontram-se próximo a faixa da frequência de excitação correspondente ao terceiro harmônico de atividades aeróbicas, variando de 5,66 a 8,57Hz (Faisca, 2003) e de 4,5 a 8,4Hz (Ellis e Ji, 2004). Em consequência, o piso pode entrar em ressonância caso a frequência de excitação se iguale a uma dessas frequências naturais. É importante observar que o posicionamento do carregamento contribui para a amplificação das vibrações, principalmente nos pontos de maior amplitude modal.

A Tabela 15 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.

Tabela 15 - Frequências naturais recomendadas para atividade aeróbica

Norma / Critérios de projeto	Atividade praticada	Frequência natural mínima (Hz)
NBR 8800	Ginástica aeróbica	8
NBR 6118	Ginásio de esportes	9,6
Guia AISC	Ginástica aeróbica para pisos leves	9,2

Comparando os valores indicados pelas normas e guia de projeto, presentes na Tabela 15, com a frequência fundamental do piso ($f_{01}=6,06\text{Hz}$), conclui-se que o piso está abaixo do valor mínimo recomendado. Esta situação remete a uma grande probabilidade de problemas relacionados a vibrações excessivas.

8 ANÁLISE HARMÔNICA

O objetivo desta análise é o de avaliar os modos de vibração que mais contribuem na resposta dinâmica estrutural. Neste intuito, aplica-se um carregamento que varia harmonicamente no tempo, de modo a se obter os resultados em termos de espectro de frequências dos deslocamentos nodais.

No piso misto estudado foi aplicada uma carga de 800 N (equivalente ao peso de uma pessoa) nos pontos de maiores amplitudes modais, os quais foram localizados no décimo quinto modo de vibração do piso misto ($f_{15} = 7,72\text{Hz}$) nos nós F, J, G e K (Figura 20). Esta análise é realizada com a frequência de excitação variando de 0 a 10Hz com um intervalo de discretização igual a 0,01Hz, além de considerar o amortecimento estrutural no valor de 1% (SCI, 2009).

Em seguida, as Figuras 37 e 38 são apresentadas os espectros de resposta do piso misto onde o eixo da ordenada representa a amplitude do deslocamento vertical e na abscissa, a frequência.

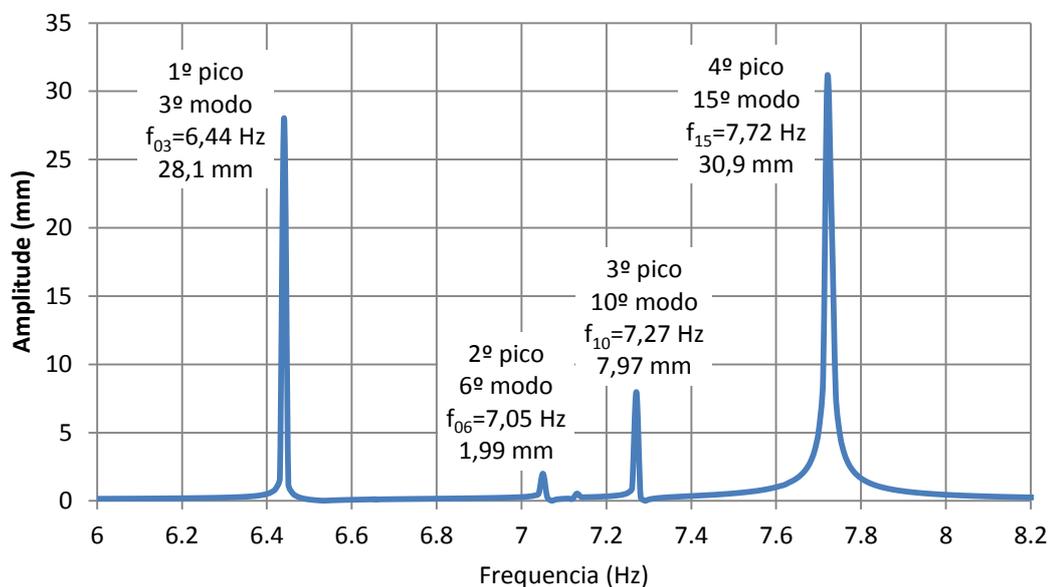


Figura 37 - Análise harmônica do piso misto nos nó F e J (aço-concreto)

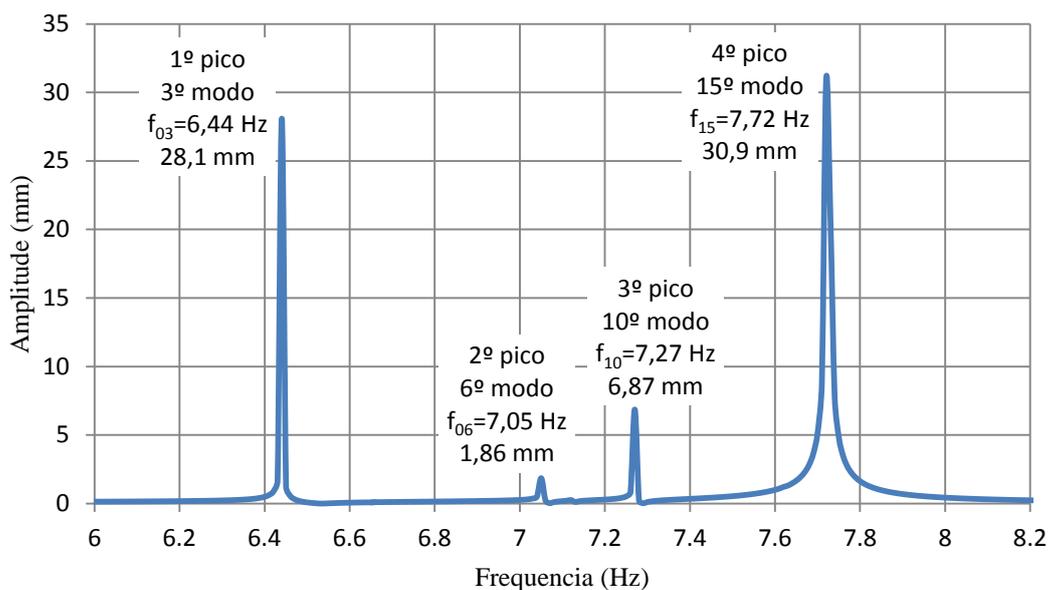


Figura 38 - Análise harmônica do piso misto nos nós G e K (aço-concreto)

A realização desta análise demonstrou que as respostas dinâmicas obtidas nas Figuras 37 (nós F e J) e Figura 38 (nós G e K) apresentam comportamentos semelhantes. Tal fato pode ser explicado pela simetria dos nós F e G em relação aos nós J e K, e também a localização bem próxima destes nós, conforme a Figura 20.

Analisando a Figura 37, verificou-se a existência de quatro picos de respostas dinâmicas bem definidas, nos valores de 6,44Hz, 7,05Hz, 7,27Hz e 7,72Hz, respectivamente, da mesma forma que também ocorre na Figura 38. Estas figuras se diferem apenas nos valores da amplitude de deslocamento no segundo e terceiro pico de resposta (7,05Hz e 7,27Hz).

Observou-se que o modo de vibração correspondente a décima quinta frequência natural do piso misto ($f_{15} = 7,72\text{Hz}$) apresentou a maior contribuição na resposta dinâmica do sistema estrutural, tanto na Figura 37 (nós F e J) quanto na Figura 38 (nós G e K), constatando a coerência do resultado, visto que as maiores amplitudes modais do piso misto ocorreram nesta mesma frequência. Desta maneira, deve-se ter maior atenção a prováveis vibrações excessivas com esta frequência, principalmente o fato desta se encontra na faixa de frequência de excitação de atividades humanas.

9 ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO

Esta análise tem o propósito de investigar a situação mais crítica e desfavorável do sistema estrutural, no que tange ao desconforto humano oriundo de ações dinâmicas provenientes de atividades aeróbicas. Desta forma, a simulação das ações dinâmicas rítmicas nos quatro casos de carregamento (Figura 19) foram realizadas pela aplicação dos modelos de carregamento I e II (MC-I e MC-II), que foram sintonizados ao décimo quinto modo ($f_{15}=7,72\text{Hz}$), de modo a induzir um estado de ressonância com o piso misto. Em seguida, obteve-se os deslocamentos e acelerações nos nós G e K por meio do programa computacional ANSYS (2007), assim os comparando e confrontando-os com os valores limites sob o ponto de vista de conforto humano.

A determinação dos nós para realização desta análise foi baseada nos pontos que apresentaram as maiores amplitudes nodais no centro do piso misto, sendo assim, através da análise dos modos de vibração (Figura 35 e 36) foram encontrados os nós F, J, G e K. Nota-se que os nós F e J são simétricos ao G e K, respectivamente. Portanto, foram escolhidos de forma aleatória os nós G e K para representar e analisar os pontos de maior valor associados a vibrações excessivas prejudiciais ao conforto humano.

Os parâmetros utilizados na função matemática representando o modelo de carregamento I (MC-I), determinados experimentalmente por Faisca (2003) estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros do modelo de carregamento I (MC-I)

T_c (s)	T_s (s)	K_p
0,34	0,05	2,78

Diante destes parâmetros utilizados, resultou-se em período de atividade, T , de 0,39s ($f = 2,564\text{Hz}$), de modo que e seu terceiro harmônico ($3 \times 2,564 = 7,692\text{Hz}$) esteja próximo à ressonância com o décimo quinto modo do piso ($f_{15}=7,72\text{Hz}$).

No que diz respeito ao modelo de carregamento II (Ellis & Ji, 2004), a frequência de excitação (f_p) foi considerada igual a 2,57Hz de modo que seu terceiro harmônico iguale-se, também, ao décimo quinto modo.

O tempo total em que a atividade aeróbica foi realizada é igual a 10s, com o intervalo de integração de 0,002s para todos os casos de carregamento.

9.1 Análise no domínio do tempo

As respostas dinâmicas do piso misto, em termos dos deslocamentos translacionais verticais (mm) e acelerações (m/s^2), obtidas nos nós G e K para o modelo de carregamento I, nas Figuras 39 a 42, e modelo de carregamento II, nas Figuras 43 a 46, são apresentadas abaixo.

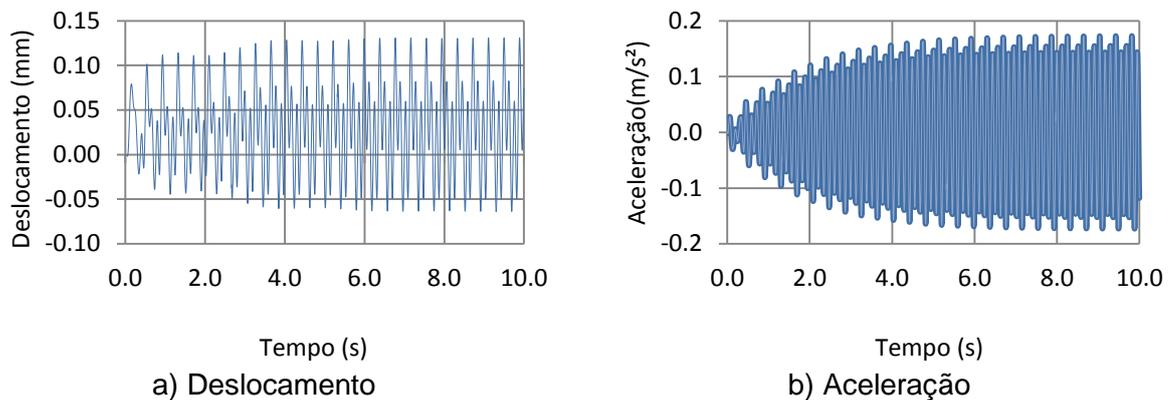


Figura 39 - Resposta dinâmica do piso misto para 8 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I

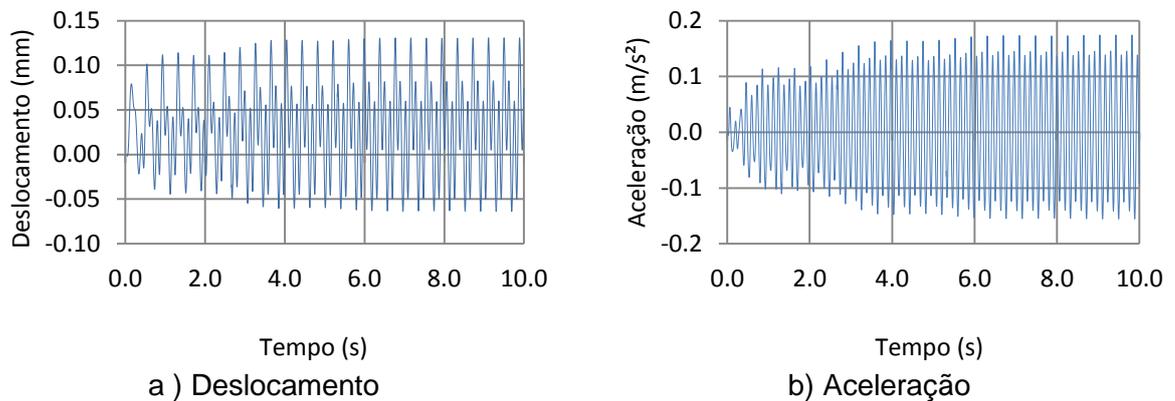
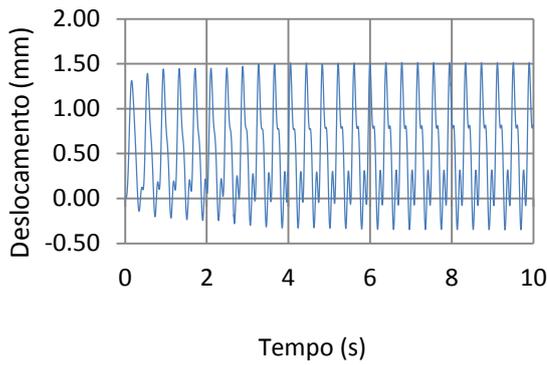
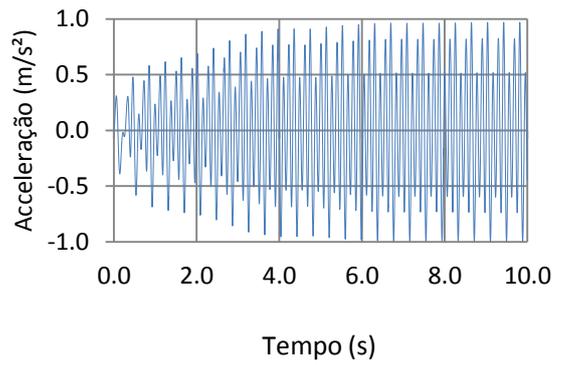


Figura 40 - Resposta dinâmica do piso misto para 16 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I

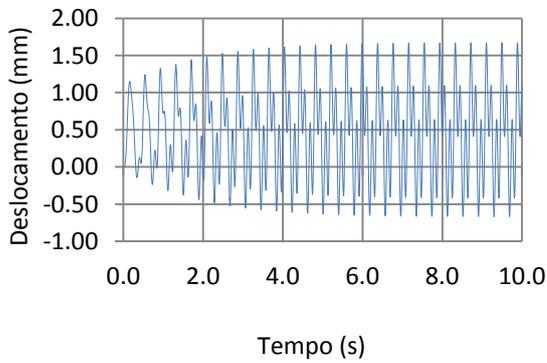


a) Deslocamento

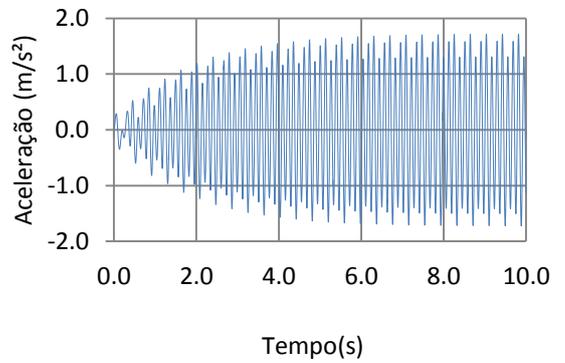


b) Aceleração

Figura 41 - Resposta dinâmica do piso misto para 32 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I

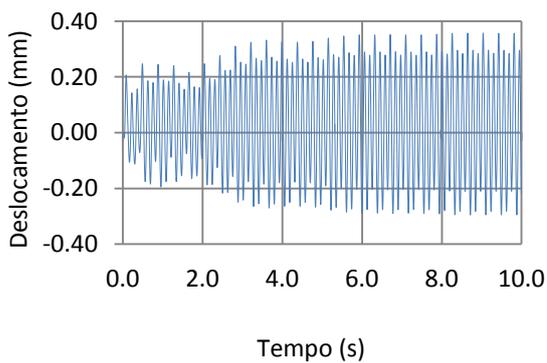


a) Deslocamento

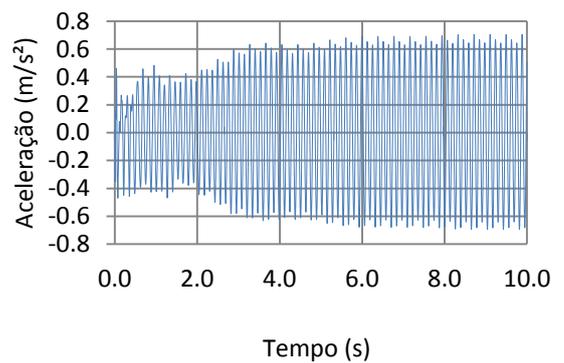


b) Aceleração

Figura 42 - Resposta dinâmica do piso misto para 64 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I

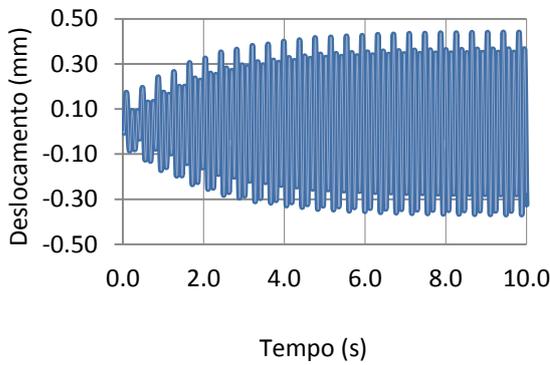


a) Deslocamento

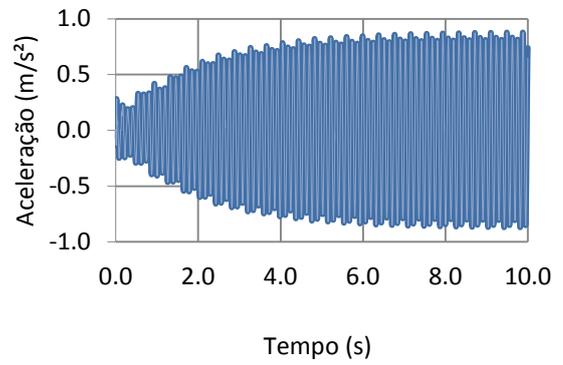


b) Aceleração

Figura 43 - Resposta dinâmica do piso misto para 8 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II

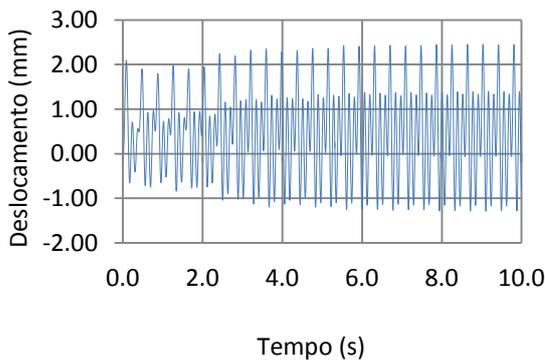


a) Deslocamento

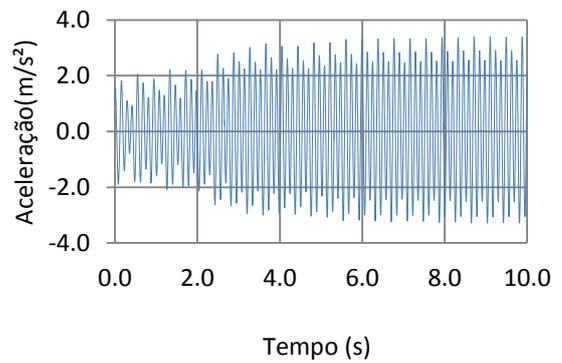


b) Aceleração

Figura 44 - Resposta dinâmica do piso misto para 16 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II

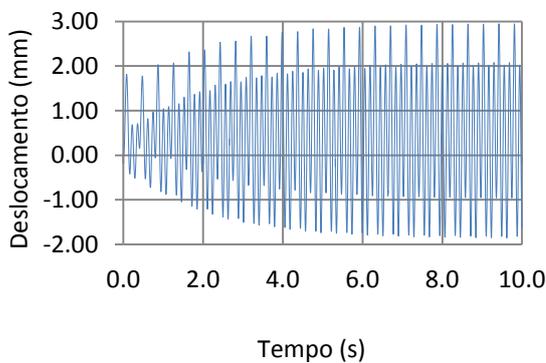


a) Deslocamento

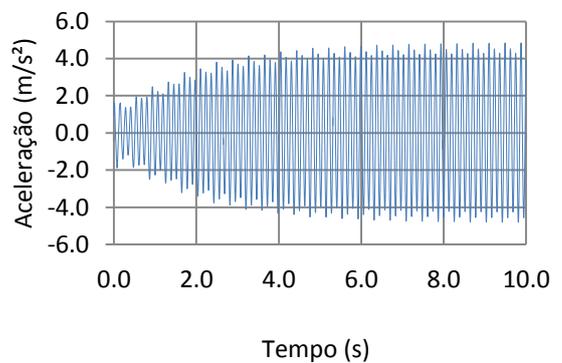


b) Aceleração

Figura 45 - Resposta dinâmica do piso misto para 32 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II



a) Deslocamento



b) Aceleração

Figura 46 - Resposta dinâmica do piso misto para 64 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II

Nas Figuras 39 a 46, nota-se que as respostas dinâmicas entram rapidamente em regime permanente. Nesse sentido, a avaliação através da amplitude em regime permanente é mais razoável, de modo que o guia prático do AISC (2003) a utiliza em seus cálculos de acelerações.

Quando se utiliza o modelo de carregamento I, desenvolvido por Faisca (2003), o máximo valor de aceleração e deslocamento encontrados foram $1,60\text{m/s}^2$ e $1,51\text{mm}$, respectivamente, no carregamento dinâmico referente a 64 pessoas praticando ginástica aeróbica, conforme a Figura 42. Em relação ao modelo de carregamento II, desenvolvido por Ellis e Ji (2004), a maior aceleração e deslocamento ocorrem também no carregamento de 64 pessoas, ilustrado pela Figura 46, na ordem de $4,8\text{m/s}^2$ e $2,9\text{mm}$. Percebe-se que o pico de aceleração mais elevado nesta análise encontra-se no carregamento dinâmico de 64 pessoas (Figura 46) aplicado pelo modelo de carregamento II, no valor de $4,8\text{m/s}^2$.

Observou-se nesta análise que os deslocamentos e acelerações encontrados pela aplicação do modelo de carregamento II apresentam as maiores amplitudes em vista das obtidas pelo modelo de carregamento I. A maior variação da resposta dinâmica do piso misto ao comparar-se os modelos de carregamento I e II, se refere ao caso de 16 pessoas atuando sobre a estrutura, verificado na análise das Figuras 40 e 44, onde observou-se uma diferença de 330% do MC-II sobre o MC-I.

Notou-se o crescente aumento das respostas dinâmico à medida que se adicionava mais indivíduos sobre o piso misto praticando atividade dinâmica rítmica, ginástica aeróbica, ou seja, os valores mínimos foram obtidos nos casos de carregamentos referentes a oito pessoas e os valores máximos se encontram nos carregamentos referentes a sessenta e quatro pessoas, tanto para o modelo de carregamento I (MC-I), nas Figuras 39 a 42, como no modelo de carregamento II (MC-II), nas Figuras 43 a 46.

9.2 Análise no domínio da frequência

A resposta dinâmica às vibrações está representada em termos da aceleração (m/s^2) no domínio da frequência (Hz) para o modelo de carregamento I, nas Figuras 47 a 50, e modelo de carregamento II, nas Figuras 51 a 54.

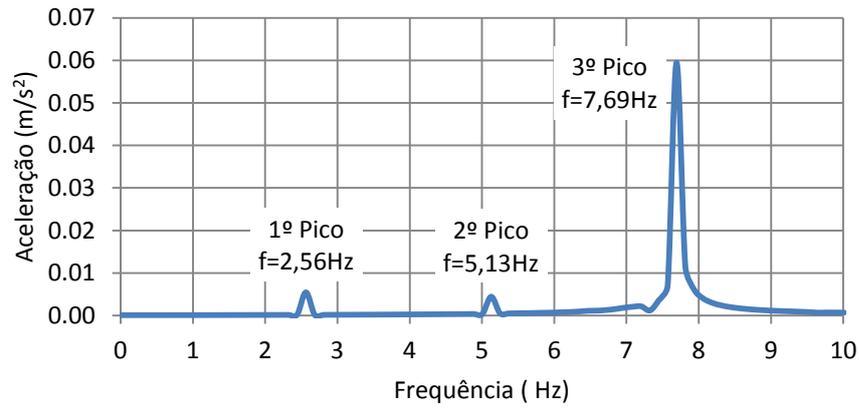


Figura 47 - Resposta dinâmica no domínio da frequência do piso misto para 8 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I

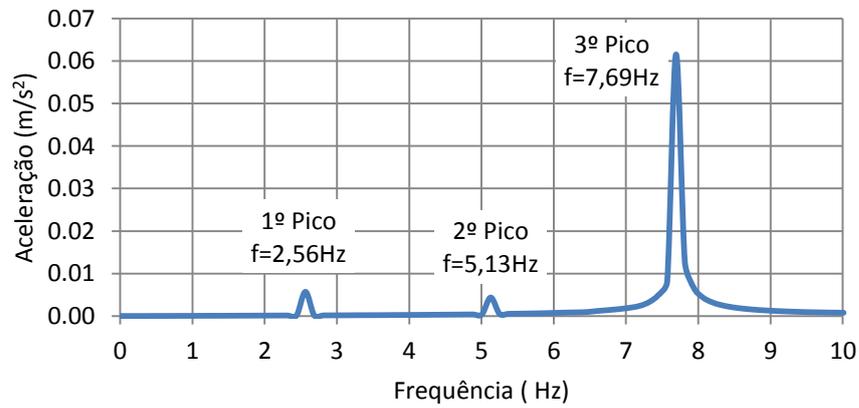


Figura 48 - Resposta dinâmica do piso misto para 16 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I

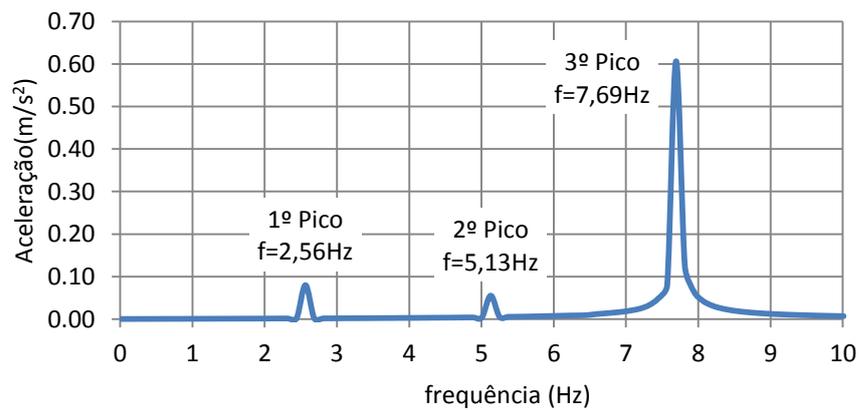


Figura 49 - Resposta dinâmica do piso misto para 32 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I

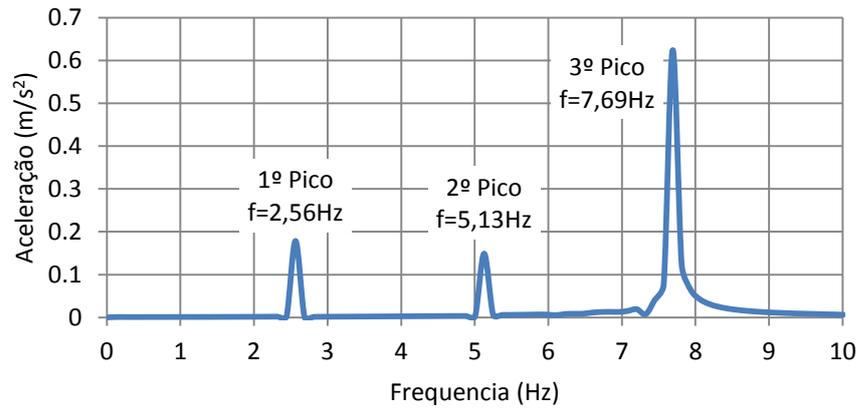


Figura 50 - Resposta dinâmica do piso misto para 64 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento I

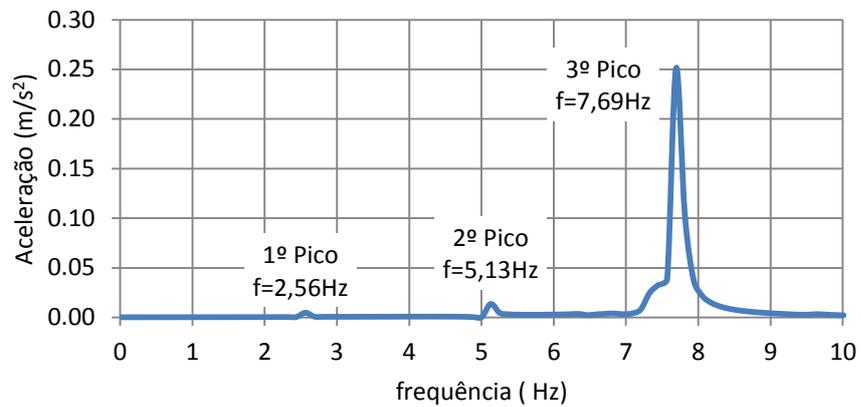


Figura 51 - Resposta dinâmica do piso misto para 8 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II

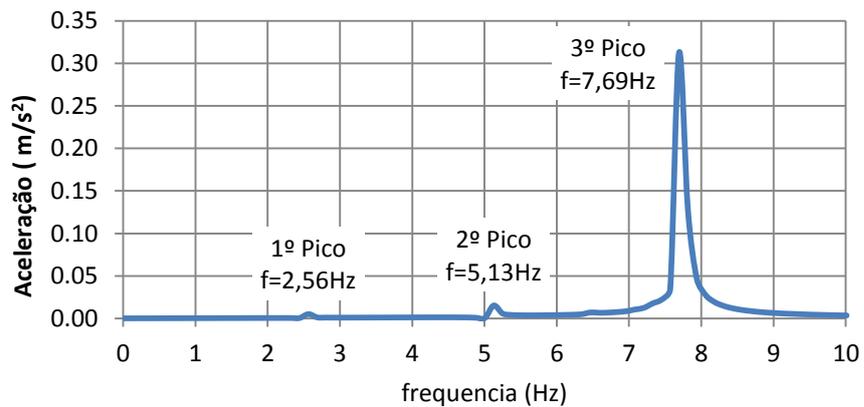


Figura 52 - Resposta dinâmica do piso misto para 16 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II

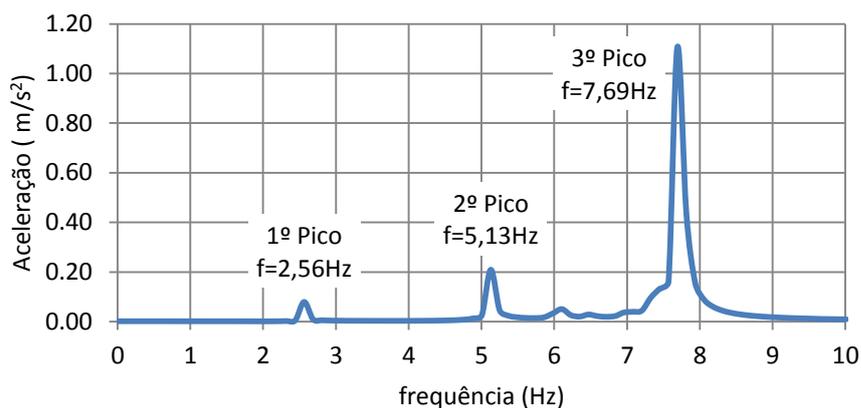


Figura 53 - Resposta dinâmica do piso misto para 32 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II

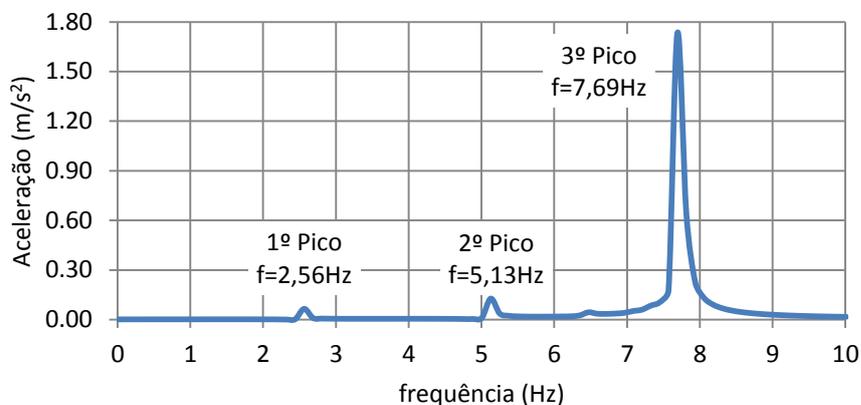


Figura 54 - Resposta dinâmica do piso misto para 64 pessoas. Nós G e K. Modelo de carregamento II

O espectro da aceleração no domínio da frequência, apresentadas nas Figuras 47 a 54, foi obtida por meio da Transformada Rápida de Fourier (TRF) (1996). Observou-se nestas Figuras, a identificação de três picos de aceleração bem definidos com suas respectivas frequências correspondentes (2,56Hz; 5,13Hz; 7,69Hz).

A resposta dinâmica do piso misto investigado, no domínio da frequência (nós G e K), para oito, dezesseis, trinta e duas e sessenta e quatro pessoas apresentaram um estado ressonante no seu 3º harmônico, tanto no modelo de carregamento I (Figura 47 a 50), proposto por Faisca (2003), quanto o modelo de carregamento II (Figura 51 a 54), proposto por Ellis e Ji (2004), devido a aproximação deste harmônico a décima quinta frequência natural do piso misto ($f_{15} = 7,72\text{Hz}$).

Nota-se que os valores das frequências encontradas nos três picos de aceleração são iguais em todos os gráficos das Figuras 47 a 54, sendo a frequência do primeiro pico de aceleração no valor de 2,56Hz, o segundo igual a 5,13Hz e por fim o terceiro pico com frequência de 7,69Hz. Entretanto, se diferenciam apenas pela amplitude de aceleração.

Analisando as Figuras 47 a 50, relacionadas a aplicação do modelo de carregamento I (MC-I), verificou-se um aumento da aceleração conforme aumentava-se o número de pessoas praticando ginástica aeróbica, onde o maior valor encontrado foi de $0,63\text{m/s}^2$ na atuação de 64 pessoas sobre o piso misto. Enquanto nas Figuras 51 a 54, encontrou-se a aceleração máxima de $1,73\text{m/s}^2$, referente também a 64 pessoas pelo modelo de carregamento II (MC-II).

9.3 Critérios de avaliação 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. 1995; Murray et al. 2003; Ellis & Littler 2004; Smith et al. 2009; Setareh 2012) têm estabelecido limites de conforto em função dos métodos de avaliação das acelerações.

Neste trabalho, considerando estes aspectos, as acelerações do piso foram avaliadas com base nas acelerações de pico no regime permanente (steady-state), a_p , acelerações filtradas rms, $a_{w,rms}$, e valores de dose de vibração, VDV. A Tabela 17 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), Setareh (2012), respectivamente. O limite referente para as acelerações de pico (a_p) é igual a $0,5\text{ m/s}^2$ (5%g), associado a atividades aeróbicas (Murray et al., 2003).

As respostas dinâmicas do piso misto, em termos das acelerações de pico, aceleração rms e VDV, para os quatro casos de carregamento (Figura 19) em que foram aplicados os modelos de carregamento I e II estão apresentados nas Tabelas 18, 19, 20 e 21.

Tabela 17 - Critérios de conforto humano para atividades humanas rítmicas

Smith et al. (2009)	Ellis & Littler (2004)	Setareh (2012)	Reação das pessoas
$a_{w,rms}$ (m/s ²)	VDV (m/s ^{1.75})	VDV (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

Tabela 18 - Resposta dinâmica dos modelos de carregamento para 8 pessoas

Nós	Modelo de Carregamento I			Modelo de Carregamento II		
	Aceleração (m/s ²)		VDV (m/s ^{1.75})	Aceleração (m/s ²)		VDV (m/s ^{1.75})
	a_p	$a_{w,rms}$		a_p	$a_{w,rms}$	
A e M	0,021	0,012	0,025	0,099	0,065	0,132
B e N	0,045	0,027	0,055	0,193	0,132	0,267
C e O	0,045	0,027	0,055	0,193	0,132	0,267
D e P	0,021	0,012	0,025	0,099	0,065	0,132
E e I	0,065	0,041	0,085	0,326	0,214	0,438
F e J	0,173	0,106	0,219	0,881	0,568	1,161
G e K	0,173	0,106	0,219	0,881	0,568	1,161
H e L	0,065	0,041	0,085	0,326	0,214	0,438

Aceleração limite = 0,5m/s² (Murray et al., 2003)

Tabela 19 - Resposta dinâmica dos modelos de carregamento para 16 pessoas

Nós	Modelo de Carregamento I			Modelo de Carregamento II		
	Aceleração (m/s ²)		VDV (m/s ^{1,75})	Aceleração (m/s ²)		VDV (m/s ^{1,75})
	a _p	a _{w,rms}		a _p	a _{w,rms}	
A e M	0,030	0,013	0,028	0,151	0,057	0,118
B e N	0,046	0,024	0,051	0,181	0,106	0,215
C e O	0,055	0,032	0,065	0,235	0,121	0,247
D e P	0,032	0,019	0,038	0,191	0,07	0,145
E e I	0,065	0,041	0,084	0,263	0,166	0,334
F e J	0,155	0,102	0,209	0,626	0,422	0,859
G e K	0,175	0,101	0,207	0,706	0,459	0,931
H e L	0,088	0,047	0,099	0,454	0,216	0,437
Aceleração limite = 0,5m/s ² (Murray et al., 2003)						

Tabela 20 - Resposta dinâmica dos modelos de carregamento para 32 pessoas.

Nós	Modelo de Carregamento I			Modelo de Carregamento II		
	Aceleração (m/s ²)		VDV (m/s ^{1,75})	Aceleração (m/s ²)		VDV (m/s ^{1,75})
	a _p	a _{w,rms}		a _p	a _{w,rms}	
A e M	0,100	0,060	0,130	0,56	0,244	0,507
B e N	0,210	0,120	0,260	0,743	0,461	0,938
C e O	0,210	0,130	0,270	0,876	0,459	0,934
D e P	0,110	0,060	0,130	0,67	0,251	0,535
E e I	0,330	0,220	0,440	1,203	0,737	1,491
F e J	0,840	0,540	1,100	2,867	1,878	3,825
G e K	1,000	0,550	1,150	3,404	2,029	4,17
H e L	0,360	0,210	0,430	1,277	0,783	1,593
Aceleração limite = 0,5m/s ² (Murray et al., 2003)						

Tabela 21 - Resposta dinâmica dos modelos de carregamento para 64 pessoas

Nós	Modelo de Carregamento I			Modelo de Carregamento II		
	Aceleração (m/s ²)		VDV (m/s ^{1,75})	Aceleração (m/s ²)		VDV (m/s ^{1,75})
	a _p	a _{w,rms}		a _p	a _{w,rms}	
A e M	0,187	0,119	0,244	0,547	0,359	0,726
B e N	0,384	0,248	0,507	1,033	0,704	1,424
C e O	0,384	0,248	0,507	1,033	0,704	1,424
D e P	0,187	0,119	0,244	0,547	0,359	0,726
E e I	0,648	0,407	0,835	1,789	1,175	2,386
F e J	1,725	1,045	2,155	4,831	3,078	6,285
G e K	1,725	1,045	2,155	4,831	3,078	6,285
H e L	0,648	0,407	0,835	1,789	1,175	2,386

Aceleração limite = 0,5m/s² (Murray et al., 2003)

As Tabelas 18, 19, 20 e 21 estão apresentadas em três tipos de aceleração, referentes às acelerações de pico, acelerações filtradas RMS ($a_{w,rms}$) e valores de dose de vibração (VDV). Em relação ao valor *rms*, tais acelerações foram filtradas de acordo com a ISO 2631-1 (1997) por intermédio do programa computacional MATLAB e do código desenvolvido por Ton Irvine (2013). Os valores escritos em vermelho estão representando as acelerações que ultrapassaram o valor limite de conforto humano de 0,5m/s².

Na análise da aceleração de pico, é importante ressaltar que tais valores são considerados conservadores, visto que ocorre num curto espaço de tempo e rapidamente já entra em regime permanente (ver Figura 39 a 46). Nesse sentido, a avaliação através da amplitude em regime permanente é mais aceitável. Por outro lado, a avaliação através das acelerações (*rms*) filtradas é mais adequada, pois considera a variação ao longo do tempo, a direção da vibração e a faixa de frequência.

Analisando e confrontando os resultados dos dois modelos de carregamento dinâmico investigados neste trabalho de pesquisa (Tabelas 18, 19, 20 e 21) verificou-se que o modelo de carregamento proposto por Ellis e Ji (MC-II)

apresentou maiores valores de acelerações de pico, acelerações filtradas RMS ($a_{w,rms}$) e valores de dose de vibração (VDV) que o modelo de carregamento I, desenvolvido por Faisca (2003). Além disso, observou-se o crescente aumento das acelerações conforme se aumentava o número de indivíduo sobre o piso misto, em ambos os carregamentos utilizados.

No que diz respeito ao carregamento de oito e dezesseis pessoas, o piso misto ao ser submetido ao modelo de carregamento II apresentou acelerações de pico, acelerações RMS e VDV superiores ao limite recomendado nos nós F, G, J e K, enquanto o modelo de carregamento I se enquadrou nos limites impostos.

Em relação ao carregamento de trinta e duas pessoas, as acelerações de pico, aceleração RMS e VDV ultrapassaram os valores recomendados no modelo de carregamento I nos nós F, G, J e K e também em todos nós do modelo de carregamento II, exceto os nós A, M, D e P na aceleração rms.

No que diz respeito ao pior caso de carregamento (64 pessoas, modelos I e II), nos quais ocorrem nos nós localizados nos painéis centrais F, G, J e K, foram obtidos os valores de $1,72m/s^2$; $1,05m/s^2$ e $2,15m/s^{1,75}$ para o modelo I (aceleração de pico, aceleração RMS e VDV, respectivamente) e de $4,83m/s^2$; $3,08m/s^2$ e $6,28m/s^{1,75}$ para o modelo II (aceleração de pico, aceleração RMS e VDV, respectivamente). Estes valores indicam níveis de vibrações extremamente desconfortáveis aos praticantes da atividade aeróbica segundo a Tabela 21, localizados nos painéis centrais F, G, J e K.

As Figuras 55 e 56, apresentadas a seguir, representam de forma ilustrativa as respostas dinâmicas dos modelos de carregamento I e II (MC-I e MC-II) em termos da aceleração filtrada ($a_{w,rms}$), referente às Tabelas 18 a 21.

A	B	C	D
E	F	G	H
I	J	K	L
M	N	O	P

a) Oito pessoas

A	B	C	D
E	F	G	H
I	J	K	L
M	N	O	P

b) Dezesesseis pessoas

A	B	C	D
E	F	G	H
I	J	K	L
M	N	O	P

c) Trinta e duas pessoas

A	B	C	D
E	F	G	H
I	J	K	L
M	N	O	P

d) Sessenta e quatro pessoas

ACEITÁVEL
 PERTUBADOR
 INACEITÁVEL
 PÂNICO

Figura 55 - Quatro casos de pessoas praticando atividade aeróbica. Modelo de carregamento I

A	B	C	D
E	F	G	H
I	J	K	L
M	N	O	P

a) Oito pessoas

A	B	C	D
E	F	G	H
I	J	K	L
M	N	O	P

b) Dezesseis pessoas

A	B	C	D
E	F	G	H
I	J	K	L
M	N	O	P

c) Trinta e duas pessoas

A	B	C	D
E	F	G	H
I	J	K	L
M	N	O	P

d) Sessenta e quatro pessoas

ACEITÁVEL
 PERTUBADOR
 INACEITÁVEL
 PÂNICO

Figura 56 - Quatro casos de pessoas praticando atividade aeróbica. Modelo de carregamento II

Analisando-se as Figura 55 e 56, observa-se a divisão do piso misto em 16 painéis, nos quais atuam os carregamentos referentes a oito, dezesseis, trinta e dois e por fim sessenta e quatro pessoas praticando atividade aeróbica, conforme a ilustração da Figura 19.

Na Figura 55, percebe-se que nos carregamentos referentes a oito e dezesseis pessoas, o critério de conforto humano é respeitado. Entretanto, a partir de trinta e duas pessoas, os painéis centrais (F, G, J e K) do piso misto apresentaram vibrações perturbadoras. Em relação ao caso de sessenta e quatro pessoas, apenas os painéis A, B, C, D, M, N, O não violaram os limites aceitáveis de vibração.

Segundo a Figura 56, observa-se que os casos de carregamento relacionados a oito e dezesseis pessoas, de forma idêntica ao de trinta e duas pessoas no modelo de carregamento I (MC-I), apresentaram vibrações perturbadoras apenas nos painéis centrais (F, G, J e K). Em seguida, os níveis de vibração relacionados a trinta e duas pessoas praticando atividade aeróbica foram considerados inaceitáveis nos painéis centrais (F, G, J e K), perturbadoras nos painéis B, C, E, I, H, L, N e O e por fim, aceitáveis A, D, M e P. Em relação a sessenta pessoas, ocorre o pior caso, de modo que se alcançam vibrações que geram pânico nos painéis centrais (F, G, J e K) e os adjacentes a estes com vibrações perturbadoras.

Verifica-se na Figura 19 que os carregamentos atuantes sobre o piso misto são posicionados nos painéis centrais (F, G, J e K). Deste modo, nota-se a que uma crescente influência destes carregamentos sobre painéis adjacentes tanto na Figura 55 quanto na Figura 56, à medida que se aumentava o número de pessoas praticando atividade aeróbica sobre a estrutura. É interessante notar que, nestes painéis, outras atividades poderiam ser realizadas, tais como: atividades relacionadas a equipamentos de academia, escritório, lanchonete. Portanto, um desconforto maior poderia ser sentido por estas pessoas.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

10.1 Introdução

Esta dissertação desenvolveu um estudo relacionado a avaliação do conforto humano em um piso misto (aço-concreto), submetido as ações dinâmicas provenientes das atividades humanas rítmicas, especificamente a prática de ginástica aeróbica. Tal atividade tem ocasionado problemas de vibrações excessivas em sistemas estruturais e assim tornou-se importante e necessário o estudo do comportamento dinâmico em regime de serviço de pisos mistos (aço-concreto). Neste intuito, realizou-se a modelagem computacional do piso misto (aço-concreto) por meio do programa ANSYS (2007), de modo a se obter as respostas estáticas (deslocamentos) e dinâmicas (frequências naturais, modos de vibração e acelerações), comparando os valores encontrados com os limites propostos por normas e critérios de projeto, sob o ponto de vista do conforto humano.

10.2 Conclusões Alcançadas

São apresentadas as conclusões alcançadas com base na realização das análises frequências naturais e modos de vibração, estática, harmônica e do conforto humano no piso misto (aço-concreto) estudado, respaldado pelas normas e critérios de projeto.

a) Análise estática

Diante das respostas obtidas em termos dos deslocamentos translacionais verticais pela análise estática, pode-se concluir que o piso misto investigado apresentou deslocamento máximo de 2,48cm, sendo assim, superior ao valor recomendado de 5 mm anexo L da NBR 8800 (2008), ao mesmo tempo que atende o estado limite de serviço conforme o item Q.3.2.2 no valor de 2,86cm.

Entretanto, esta análise (análise estática) não é adequada para a avaliação dinâmica de pisos, visto que o carregamento real atuante sobre o sistema estrutural apresenta natureza essencialmente dinâmica (atividades humanas rítmicas). Além disso, para ratificar tal consideração, ao longo do trabalho foram verificados, através da análise dinâmica, os níveis de vibrações excessivas no piso investigado.

b) Frequências e modos de vibração

A realização desta análise constatou a suscetibilidade do piso misto a problemas relacionados a vibrações excessivas, pelo fato da sua frequência fundamental ($f_{01}=6,36\text{Hz}$) ter apresentado valor abaixo do mínimo recomendado pela NBR 8800 (8Hz), NBR 6118 (9,6Hz) e guia prático do AISC (9,2Hz). Os valores das frequências naturais do piso misto apresentaram uma variação na faixa de 6,06Hz a 7,79Hz, de modo que correspondem a mesma faixa de frequência do terceiro harmônico das atividades aeróbicas. Deste modo, piso pode ser submetido ao fenômeno da ressonância, ocasionando assim vibrações excessivas e consequentemente o desconforto humano dos usuários da estrutura.

c) Análise Harmônica

Esta análise revelou que o décimo quinto modo de vibração do piso misto (aço-concreto) investigado, referente a frequência natural de 7,72Hz, apresentou a maior transferência de energia (maior contribuição) na resposta dinâmica do piso ou seja, na ocorrência de prováveis problemas relacionados a vibrações excessivas.

c) Análise do conforto humano

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 dos Modelos de Carregamento I e II (MC-I e MC-II), nos que tange aos casos de 8, 16, 32 e 64 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 [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 dos deslocamentos e acelerações no domínio do tempo, percebe-se que o modelo de carregamento II (MC-II) Ellis e Ji (2004), apresenta acelerações com valores muito superiores aqueles fornecidos pelo modelo de carregamento I (MC-I) Faísca (2003). Além disso, observou-se o crescente aumento destes valores (acelerações) à medida que aumenta-se o número de pessoas atuando sobre a estrutura.

Observando-se a resposta dinâmica do piso misto (aço-concreto), em termos da aceleração, no domínio da frequência, com base no uso dos modelos MC-I e MC-II, o sistema estrutural apresentou um quadro de ressonância a partir da aproximação do 3º harmônico da excitação das atividades rítmicas (ginástica aeróbica) com a frequência natural associada ao décimo quinto modo de vibração do piso misto (aço-concreto) em estudo ($f_{15} = 7,72\text{Hz}$).

Em relação a avaliação do conforto humano da estrutura, o pior caso de carregamento (MC-I e MC-II: 64 pessoas), foram obtidos os valores de $1,72\text{m/s}^2$; $1,05\text{m/s}^2$ e $2,15\text{m/s}^{1,75}$ para o modelo MC-I (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 MC-III (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.

10.3 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar uma análise experimental objetivando comparar os resultados obtidos pela análise numérica;
- Realizar a implementação de um sistema de controle de vibrações para redução dos deslocamentos e acelerações;
- Desenvolver um estudo paramétrico acerca dos modelos de carregamento dinâmicos (MC-I e MC-II), propostos por Faísca (2003) e Ellis e Ji (2004), respectivamente, tais como: período de contato, período da atividade e coeficiente de impacto;

- Modelar as ligações viga-viga e viga-coluna como sendo semirrígidas e rígidas, pois na maioria dos casos da prática corrente de projeto essas ligações assumem este comportamento;
- Adotar outras dimensões para os elementos estruturais, como vigas e pilares ou mesmo a espessura da laje do modelo e também outros valores de amortecimento estrutural.

REFERÊNCIAS

ALLEN, D.E. Floor vibration from human activities. *Concrete International: Design and Construction*, v.12, n.6, p. 66-73, 1990.

ALVES, N. K. C. Cargas Dinâmicas devido a Pessoas em Movimento. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 1997

ANSYS Swanson Analysis Systems, Inc., 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, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2007. 221 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6120*: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações Rio de Janeiro, 1980. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800*: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 237 p.

AVELINO, Alves Filho. Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE: Análise Dinâmica. Ed Érica, 2008. 304 p.

BACHMANN et al. *Vibration problems in structures - practical guidelines*, Basel (Switzerland):Institut für Baustatik und Konstruktion, Birkhäuser; 1995.

BACHMANN, H. & AMMANN, W. *Vibrations in structures induced by man and machines*, IABSE Structural Engineering Document 3E, International Association for Bridges and Structural Engineering, ISBN 3-85748-052-X, 1987.

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

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *BS 6472*: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1Hz to 80 Hz), United Kingdom, 1992.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *BS 6472-1*: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings: Vibration sources other than blasting, United Kingdom, 2008.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *BS 6841*: Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock, United Kingdom, 1987.

B. R. Ellis and T. Ji. The response of structures to dynamic crowd loads. *Digest*, 426, 2004.

B. R. Ellis and T. Ji. Loads generated by jumping crowds: numerical modelling. *The Structural Engineer*, 7:35–40, September 2004.

BROWNJOHN, J.M.W.; MIDDLETON, C.J. Procedures for vibration serviceability assessment of high-frequency floors. *Engineering Structures*, v. 30, iss. 6, p. 1548–1559, jun. 2008.

CHOPRA, A. K. *Dynamics of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering*. 3rd ed., Pearson Education, Inc., New Jersey, 2007.

CLOUGH, R. W., PENZIEN, J; *Dynamics of Structures*; McGraw-Hill, 1993. 634 p.

COSTA-NEVES, L.F.; SILVA, J.G.S. da.;de; LIMA, L.R.O;. JORDÃO,S. Multi-storey, multi-bay buildings with composite steel-deck floors under human-induced loads: the human comfort issue . *Journal of constructional steel research*, v.136, p. 34–46, 2014.

D. CREȚU, D.; TULEI, E.; GHINDEA, C.; CRUCIAT, R. Vibrations induced by human activities in composite steel floor decks. Case study. In: *Steel Structures: Culture & Sustainability*, 2010, Istanbul, Turkey.

DE SILVA, S.; and THAMBIRATNAM, D. P. Dynamic characteristics of steel–deck composite floors under human-induced loads. *Journal of Computers and Structures*, v. 87, iss. 17-18, p. 1067–1076, sep. 2009.

DE SILVA, S.; and THAMBIRATNAM, D. P. Vibration characteristics of concrete-steel composite floor structures. *ACI Structural Journal*, v. 108, n. 6, nov./dec. 2011.

EBRAHIMPOUR, A.; SEEK R.L. A review of vibration serviceability criteria for floor structures. *Journal of Computers and Structures*, v. 83, iss. 28–30, p. 2488–94, nov. 2005.

EL-DARDIRY, E.; JI, T. Modelling of the dynamic behaviour of profiled composite floors. *Journal of Engineering and Structures*, v. 28, iss. 4, p. 567–579, mar. 2006.

EL-DARDIRY, E.; WAHYUNI, E.; JI T.; ELLIS, B. R. Improving FE models of a long-span flat concrete floor using natural frequency measurements. *Journal of Computers and Structures*, v. 80, iss. 27-30, p. 2145–2156, nov. 2002.

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

HAN,W.H.; LEE,M.;MOON,K. Acceleration thresholds of vertical floor vibrations according to human perception levels in korea . *Advances in Structural Engineering*, v. 12, n. 4, 2009.

HANAGAN, L.M.; MURRAY, T.M.; active control approach for reducing floor vibrations.*Journal of structural engineering*,v.123,n.11,p.1497-1505,nov.1997(3 referencia)

HANAGAN, L.M.; MURRAY, T.M.;Experimental implementation of active control to reduce annoying floor vibrations.*Engineering Journal / Fourth Quarter*, p.123-127, 1998

HANAGAN, L. M. Walking-Induced Floor Vibration Case Studies. *Journal of Architectural Engineering*, v. 11, n. 1, mar. 2005.

HICKS,S;PELTONEM,S. Design of slim floor construction against human induced vibrations. Erstelldatum, 2014

HUDSON, M.J.; REYNOLDS, P. Implementation considerations for active vibration control in the design of floor structures. *Engineering Structures*; v. 44, p. 334–358, nov. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations*, Switzerland, 2007.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 2631-1: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements*, Switzerland, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 2631-2: Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 to 80 Hz)*, Switzerland, 1989.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 2631-2: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 to 80Hz)*, Switzerland, 2003.

IRVINE, TOM. ISO 2631 Matlab Scripts. Disponível em: <http://vibrationdata.wordpress.com/2012/10/21/iso-2631-matlab-scripts>. Acesso em: 26 jul. 2013.

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

T. Ji and B. R. Ellis. Floor vibration induced by dance-type loads: theory. *The Structural Engineer*, 72:37–44, 1994.

T. Ji and B. R. Ellis. Floor vibration induced by dance-type loads: verification. *The Structural Engineer*, 72:45–50, 1994

LAMAN, J.A.; MURRAY, T.M.; Design aids for walking vibrations in steel framed floors. *Engineering Journal / Second Quarter*, p.82-101,1999

LEE, k; LEE,S; WOO,S. Global vertical resonance phenomenon between steel building and human rhythmic excitations . *Journal of Constructional Steel Research*, v.92, p. 164–174, 2013.

LOOSE, J. K.. *Análise dinâmica de pisos mistos em aço-concreto submetidos a atividades humanas rítmicas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Vitória, 2007.

LOOSE,J.K; FERREIRA,W.G.;DA SILVA,J.G.S. Influência das atividades humanas rítmicas sobre a resposta dinâmica de pisos mistos (aço concreto).*Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*, Passo Fundo, v. 5, n. 2/3, p. 7-25, maio/dez. 2008

MATLAB. Versão R2012a. MathWorks, 2012.

MELLO, A.V.A.; SILVA, J.G.S. da; VELLASCO, P.C.G. da S.; ANDRADE, S.A.L. de; LIMA, L.R.O. de. Dynamic analysis of composite systems made of concrete slabs and steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 64, p. 1142–1151, 2007.

MOREIRA, B. C., *Avaliação Comparativa de Pisos e Edificações em Estrutura Metálica quanto ao Critério de Vibração*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, 2004

MURRAY, T.M. Acceptability Criterion for Occupant- Induced Floor Vibrations. *Engineering Journal of American Institute of Steel Construction*, v. 18, n.2, p. 62-70, 1981.

MURRAY, T.M.; ALLEN, D.E.; UNGAR, E.E. Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations due to Human Activity. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 1997.

MURRAY, T.M.; ALLEN, D.E.; UNGAR, E.E. Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations due to Human Activity. 2nd printing. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 2003.

RANA, R.; SOONG, T.T. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers. *Engineering Structures*, v. 20, n. 3, p. 193–204, jun. 1998.

REYNOLDS, P.; PAVIC, A. Effects of false floors on vibration serviceability of buildings floors. II: Response to pedestrian excitation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 17, n. 2, p. 87–96, may. 2003.

REYNOLDS, P.; PAVIC, A. Effects of false floors on vibration serviceability of buildings floors. II: Modal Properties. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 17, n. 2, p. 75–86, may. 2003.

SAIDI, I.; GADA, E.F.; WILSON, J.L.; HARITOS, N. Development of passive viscoelastic damper to attenuate excessive floor vibrations. *Engineering Structures*, v. 33, iss. 12, p. 3317–3328, dec. 2011.

SETAREH, M. Vibration serviceability of a building floor structure. i: dynamic testing and computer modeling. *Journal of performance of constructed facilities*. p. 497–507, 2010

SETAREH, M. 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, 2012.

SILVA, J.G.S. da; VELLASCO, P.C.G. DA S.; ANDRADE, S.A.L. DE; Soeiro, F.J. da C.P.; WERNECK, R.N. An evaluation of the dynamical performance of composite slabs. *Journal of Engineering and Structures*, v. 81, p. 1905–1913, fev. 2003.

SILVA, J.G.S. da; VELLASCO, P.C.G. da S.; ANDRADE, S.A.L. de. Vibration analysis of orthotropic composite floors for human rhythmic activities. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering*, v. 30, n. 1, p. 56-65, 2008.

SMITH, A.L.; HICKS, S.J.; DEVINE, P.J. Design of floors for vibrations: A new approach. SCI Publication P354, Ascot, 2009.

SOEIRO, N. S. Curso de Análise de Ruído e Vibrações. Belém: Curso de Especialização em Engenharia e Segurança do Trabalho. UFPA, 2009.

VARELA W.D.; BATTISTA, R.C. Control of vibrations induced by people walking on large span composite floor decks. *Engineering Structures*, v. 33, iss. 9, p. 2485–2494, sep. 2011.

VARELA, W. D. Modelo Teórico-Experimental para Análises de Vibrações Induzidas por Pessoas Caminhando sobre Lajes de Edifícios. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2004.

WYATT, T.A. Design guide on the vibration of floors. SCI Publication 076. The Steel Construction Institute, Berkshire. UK, 1989, 32 p.

ZHENG, T.; JI, T.; ELLIS, B. R. The significance of continuity in a multi-panel composite floor. *Journal of Engineering and Structures*, v. 32, iss. 1, p. 184–194, jan. 2010.