

## Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências Faculdade de Engenharia

Elisângela Arêas Richter dos Santos

Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a carregamentos dinâmicos humanos rítmicos

> Rio de Janeiro 2022

Elisângela Arêas Richter dos Santos

## Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de pisos mistos (açoconcreto) submetidos a carregamentos dinâmicos humanos rítmicos

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.

Orientadores: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva

Rio de Janeiro 2022

# CATALOGAÇÃO NA FONTE

### UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

S237	Santos, Elisângela Arêas Richter dos. Análise de vibrações e Avaliação do conforto humano de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a carregamentos dinâmicos humanos rítmicos / Elisângela Arêas Richter dos Santos. – 2022. 150f.
	Orientador: José Guilherme Santos da Silva. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.
	1. Engenharia civil - Teses. 2. Construção mista - Teses. 3. Conforto humano - Teses. 4. Dinâmica estrutural - Teses. 5. étodo dos elementos finitos - Teses. I. Silva, José Guilherme Santos da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.
	CDU 624.016

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

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

Assinatura

Elisângela Arêas Richter dos Santos

## Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de pisos mistos (açoconcreto) submetidos a carregamentos dinâmicos humanos rítmicos

Dissertação de mestrado 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.

Aprovado em 22 de julho de 2022.

Banca Examinadora:

osé Guilhenne Suntos da Sitra

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

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

Prof. Dr. Rodrigo Bird Burgos Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Paulo Anderson Santana Rocha Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

Rio de Janeiro 2022 DEDICATÓRIA

À Deus e minha família.

### AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por seu sacrifício e infinito amor. Sem sua misericórdia nada seria possível.

Aos meus maravilhosos pais Rosângela e Flávio, que nunca medem esforços para me apoiar e sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos da minha vida. Para vocês todo meu amor e admiração.

Ao meu esposo Diego, por sempre acreditar em mim, ser meu apoio e por toda paciência e carinho. Este trabalho também é seu, e juntos colheremos os frutos de toda esta dedicação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Guilherme, por toda paciência em ensinar, pela amizade, incentivo, e direcionamento, mas principalmente por acreditar em mim, sua conduta educacional me inspira.

Ao Prof. Dr. Miguel Henrique por me ajudar a chegar até aqui, jamais esquecerei as palavras de motivação que não me deixaram desistir, serei sempre grata ao Sr.

Ao Prof. Dr. Soeiro pela disponibilidade em transmitir, sempre, tanto conhecimento. Suas aulas, inspiradoras, foram essenciais para um aprendizado que carregarei sempre comigo.

Aos amigos e companheiros de curso do PGECIV, por toda ajuda, parceria e amizade.

Às Agências de Fomento à pesquisa: CAPES, CNPq e FAPERJ

Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.

Martin Luther King

#### RESUMO

SANTOS, Elisângela Arêas Richter dos. *Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a carregamentos dinâmicos humanos rítmicos*. 2022. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Nas últimas décadas, um avanço significativo das diferentes áreas do conhecimento, nomeadamente em relação à Engenharia Civil, tem possibilitado o desenvolvimento e execução de projetos estruturais inovadores e desafiadores, contemplando soluções arrojadas no sentido do atendimento aos projetos arquitetônicos, com base em critérios de economia, estabilidade e segurança. Deste modo, este conjunto de fatores tem corroborado para a concepção e projeto de estruturas cada vez mais leves e esbeltas, o que pode vir a gerar níveis preocupantes no que tange ao conforto humano dos usuários. Assim sendo, este trabalho de pesquisa tem por objetivo a análise de vibrações e avaliação do conforto humano de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a carregamentos dinâmicos humanos rítmicos. De acordo com este contexto, objetivando representar as ações dinâmicas produzidas por pessoas praticando atividades humanas rítmicas foram utilizadas formulações matemáticas tradicionais para a representação das cargas dinâmicas (modelos de "força dura"); e, também, considerando-se o emprego de sistemas biodinâmicos, representados por meio de sistemas do tipo "massa-mola-amortecedor" com um grau de liberdade (S1GL), tendo em mente a incorporação das características dinâmicas dos indivíduos. O modelo estrutural investigado é representativo de um andar interior típico de um edifício comercial e corresponde a um piso misto (açoconcreto) com dimensões de 40m x 40m e área total de 1.600m<sup>2</sup>. A modelagem numérica da estrutura foi desenvolvida com base no emprego do programa de elementos finitos ANSYS. Inicialmente, mediante análise modal (autovalores e autovetores), verifica-se que frequência fundamental do piso encontra-se em faixa próxima aos harmônicos da freguência de excitação humana, indicando uma tendência de vibração excessiva e desconforto humano. Em seguida, com base na avaliação do comportamento dinâmico do piso em vibração forçada, foi verificado que os modelos de carregamento de "força-dura" produzem aumentos guantitativos significativos sobre a resposta do sistema (deslocamentos e acelerações), guando comparados aos modelos biodinâmicos. Por outro lado, cabe ressaltar que a modelagem das ações dinâmicas humanas, via emprego dos sistemas biodinâmicos, resultou em atenuações importantes sobre a resposta dinâmica do piso, conduzindo a resultados mais realistas. Finalmente, destaca-se que os resultados encontrados ao longo desta investigação indicam que a resposta dinâmica do piso misto (açoconcreto) analisado viola os critérios de projeto relativos ao conforto humano, para determinadas situações de carregamento.

Palavras-chave: Pisos mistos (aço-concreto). Modelagem em elementos finitos. Análise estrutural dinâmica. Modelos biodinâmicos. Conforto humano.

### ABSTRACT

SANTOS, Elisângela Arêas Richter dos. *Vibration analysis and assess the human comfort of (steel-concrete) composite floors subjected to rhythmic human dynamic loads.* 2022. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

In recent decades, a significant advance in different areas of knowledge, namely associated to Civil Engineering, has enabled the development and execution of innovative and challenging structural projects, contemplating dare solutions in order to attend the architectural design, based on economic, stability and safety criteria. This way, these factors has contributed to the conception and project of increasingly lighter and slender structures, which can generate worrying levels regarding the user's human comfort. Therefore, this research work aims to develop the vibration analysis and assess the human comfort of steel-concrete composite floors subjected to rhythmic human dynamic loads. According to this context, in order to represent the people dynamic actions practicing rhythmic human activities, traditional mathematical formulations were used to represent dynamic loads ("only-force" models); and, also, considering the use of biodynamic systems, represented by "mass-spring-damper" systems with one degree of freedom (S1GL), having in mind the incorporation of the dynamic characteristics of the people. The investigated structural model represents a typical interior floor of a commercial building and corresponds to a steel-concrete composite floor with dimensions of 40m x 40m and total area of 1.600m<sup>2</sup>. The structure numerical modelling was developed based on the use of the finite element program ANSYS. Initially, through modal analysis (eigenvalues and eigenvectors), it was verified that the floor fundamental frequency is in a range close to the harmonics of the human excitation frequency, indicating a tendency of excessive vibration and human discomfort. Then, based on the floor dynamic behavior assessment in forced vibration, it was verified that the "only-force" loading models have produced significant quantitative increases on the system response (displacements and accelerations), when compared to the biodynamic models. On the other hand, it is worth mentioning that the dynamic human actions modelling, through the use of biodynamic systems, resulted in important attenuations on the floor dynamic response, leading to more realistic results. Finally, it is noteworthy that the results found throughout this investigation indicate that the analysed steel-concrete composite floor dynamic response violated the design criteria related to human comfort for certain loading situations.

Keywords: Steel-concrete composite floor. Finite element modelling. Dynamic structural analysis. Biodynamic models. Human comfort.

### **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Ginástica aeróbica [1]	21
Figura 2 - Saltos a vontade [2]	22
Figura 3 - Escala modificada de Reiher - Meister [7]	26
Figura 4 - Direção das vibrações conforme ISO 2631-1 [44]	42
Figura 5 - Curva base de vibrações de edifícios para aceleração (eixos z) [41]	]45
Figura 6 - Curva base de vibrações de edifícios para aceleração (eixos x,y) [4	1]45
Figura 7 - Curva base de vibrações de edifícios para aceleração em	direção
combinada (eixos x, y e z) [41]	46
Figura 8 - Movimentos do corpo durante um salto [52]	49
Figura 9 - Aceleração no domínio do tempo durante o salto [52]	49
Figura 10 - Força no domínio do tempo durante um salto [52]	50
Figura 11 - Comportamento da carga em função do tempo para diferentes ati	ividades
[40]	52
Figura 12 - Redução do coeficiente de Fourier em relação ao número de partie	cipantes
[40]	54
Figura 13 - Função representativa de uma atividade com perda de contato [52	2]55
Figura 14 - Coeficiente de defasagem para atividades humanas [52]	56
Figura 15 - Representação da modelagem do sistema biodinâmico	57
Figura 16 - Validação do modelo biodinâmico proposto [53]	59
Figura 17 - Comparativo entre o modelo biodinâmico e o modelo de força-dur	a59
Figura 18 - Sistema estrutural do piso misto (aço-concreto). Dimensões em m	ı61
Figura 19 - Seção genérica dos perfis metálicos	62
Figura 20 - Nove disposições do carregamento analisado. Dimensões em m	63
Figura 21 - Modelos de carregamento I a IV. Dimensões em m	64
Figura 22 - Modelos de carregamento V a VII. Dimensões em m	65
Figura 23 - Modelos de carregamento IX a XII. Dimensões em m	66
Figura 24 - Modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto)	68
Figura 25 - Características geométricas do elemento BEAM44 [55]	69
Figura 26 - Características geométricas do elemento SHELL63 [55]	70
Figura 27 - Características geométricas do elemento COMBIN7 [55]	70
Figura 28 - Características geométricas do elemento COMBIN39 [55]	71

Figura 29 -	Características geométricas do elemento COMBIN40 [55]	71
Figura 30 -	1º modo: f <sub>01</sub> = 6,21 Hz [55]	76
Figura 31 - 2	2º modo: f <sub>02</sub> = 6,50 Hz [55]	77
Figura 32 - 3	3º modo: f <sub>03</sub> = 6,60 Hz [55]	78
Figura 33 - 4	4º modo: f <sub>04</sub> = 6,81 Hz [55]	79
Figura 34 -	5º modo: f <sub>05</sub> = 7,07 Hz [55]	80
Figura 35 - (	6º modo: f <sub>06</sub> = 7,19 Hz [55]	81
Figura 36 - <sup>-</sup>	7º modo: f <sub>07</sub> = 7,24 Hz [55]	82
Figura 37 - 8	8º modo: f <sub>08</sub> = 7,26 Hz [55]	83
Figura 38 - 9	9º modo: f <sub>09</sub> = 7,29 Hz [55]	84
Figura 39 -	10º modo: f <sub>10</sub> = 7,40 Hz [55]	85
Figura 40 - J	Análise harmônica do piso misto (aço-concreto)	87
Figura 41 -	Carga dinâmica modelada através do AISC [37]	90
Figura 42 -	Carga dinâmica modelada através do SCI [40]	90
Figura 43 -	Carga dinâmica modelada através do FAISCA [52]	90
Figura 44 -	Carga dinâmica do sistema biodinâmico [53]	91
Figura 45 -	Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-I	92
Figura 46 -	Deslocamento na seção A para o modelo AISC para MC-I	93
Figura 47 - J	Aceleração na seção A para o modelo AISC para MC-I	93
Figura 48 -	Deslocamento na seção A para o modelo SCI para MC-I	93
Figura 49 - J	Aceleração na seção A para o modelo SCI para MC-I	93
Figura 50 -	Deslocamento na seção A para o modelo Faisca para MC-I	94
Figura 51 - J	Aceleração na seção A para o modelo Faisca para MC-I	94
Figura 52 -	Deslocamento na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-I	94
Figura 53 - J	Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-I	94
Figura 54 -	Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-II	96
Figura 55 -	Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-III	97
Figura 56 -	Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-IV	98
Figura 57 -	Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-V1	00
Figura 58 -	Deslocamento na seção A para o modelo AISC para MC-V1	00
Figura 59 - J	Aceleração na seção A para o modelo AISC para MC-V1	01
Figura 60 -	Deslocamento na seção A para o modelo SCI para MC-V1	01
Figura 61 - J	Aceleração na seção A para o modelo SCI para MC-V1	01
Figura 62 -	Deslocamento na seção A para o modelo Faisca para MC-V1	01

Figura 63 - Aceleração na seção A para o modelo Faisca para MC-V......102 Figura 64 - Deslocamento na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-V.....102 Figura 65 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-V......102 Figura 67 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-VII ......105 Figura 70 - Deslocamento na seção A para o modelo AISC para MC-IX......108 Figura 71 - Aceleração na seção A para o modelo AISC para MC-IX......108 Figura 72 - Deslocamento na seção A para o modelo SCI para MC-IX ......108 Figura 73 - Aceleração na seção A para o modelo SCI para MC-IX ......109 Figura 74 - Deslocamento na seção A para o modelo Faisca para MC-IX......109 Figura 75 - Aceleração na seção A para o modelo Faisca para MC-IX......109 Figura 76 - Deslocamento na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-IX.....109 Figura 77 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-IX......110 Figura 78 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-X ......111 Figura 79 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-XI ......112 Figura 80 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-XII ......114 Figura 81 - Carga dinâmica para 48 pessoas modelada através do SCI [40] ...... 129 Figura 82 - Carga dinâmica para 64 pessoas modelada através do SCI [40] ......129 Figura 85 - Deslocamento na seção B para o modelo SCI para MC-II......133 Figura 86 - Aceleração na seção B para o modelo SCI para MC-II......133 Figura 89 - Deslocamento na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-II ..... 134 Figura 93 - Deslocamento na seção A para o modelo SCI para MC-III......135 Figura 94 - Aceleração na seção A para o modelo SCI para MC-III......135 

Figura 97 - Deslocamento na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-III ..... 136 Figura 99 - Deslocamento na seção A para o modelo AISC para MC-IV ...... 137 Figura 101 - Deslocamento na seção A para o modelo SCI para MC-IV ......137 Figura 103 - Deslocamento na seção A para o modelo Faisca para MC-IV......138 Figura 104 - Aceleração na seção A para o modelo Faisca para MC-IV......138 Figura 105 - Deslocamento na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-IV...138 Figura 106 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-IV......138 Figura 107 - Deslocamento na seção B para o modelo AISC para MC-VI......139 Figura 109 - Deslocamento na seção B para o modelo SCI para MC-VI ......139 Figura 111 - Deslocamento na seção B para o modelo Faisca para MC-VI......140 Figura 112 - Aceleração na seção B para o modelo Faisca para MC-VI.....140 Figura 113 - Deslocamento na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-VI...140 Figura 114 - Aceleração na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-VI......140 Figura 115 - Deslocamento na seção B para o modelo AISC para MC-VII......141 Figura 116 - Aceleração na seção B para o modelo AISC para MC-VII......141 Figura 117 - Deslocamento na seção B para o modelo SCI para MC-VII ......141 Figura 118 - Aceleração na seção B para o modelo SCI para MC-VII ......141 Figura 119 - Deslocamento na seção B para o modelo Faisca para MC-VII......142 Figura 120 - Aceleração na seção B para o modelo Faisca para MC-VII......142 Figura 121 - Deslocamento na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-VII..142 Figura 122 - Aceleração na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-VII......142 Figura 123 - Deslocamento na seção A para o modelo AISC para MC-VIII......143 Figura 124 - Aceleração na seção A para o modelo AISC para MC-VIII......143 Figura 125 - Deslocamento na seção A para o modelo SCI para MC-VIII ......143 Figura 127 - Deslocamento na seção A para o modelo Faisca para MC-VIII.......144 Figura 128 - Aceleração na seção A para o modelo Faisca para MC-VIII......144 Figura 129 - Deslocamento na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-VIII.144 Figura 130 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-VIII.....144

Figura 131 - Deslocamento na seção B para o modelo AISC para MC-X.....145 Figura 132 - Aceleração na seção B para o modelo AISC para MC-X......145 Figura 133 - Deslocamento na seção B para o modelo SCI para MC-X ......145 Figura 134 - Aceleração na seção B para o modelo SCI para MC-X ......145 Figura 135 - Deslocamento na seção B para o modelo Faisca para MC-X.....146 Figura 136 - Aceleração na seção B para o modelo Faisca para MC-X......146 Figura 137 - Deslocamento na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-X....146 Figura 138 - Aceleração na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-X......146 Figura 139 - Deslocamento na seção B para o modelo AISC para MC-XI......147 Figura 140 - Aceleração na seção B para o modelo AISC para MC-XI......147 Figura 141 - Deslocamento na seção B para o modelo SCI para MC-XI ......147 Figura 142 - Aceleração na seção B para o modelo SCI para MC-XI ......147 Figura 143 - Deslocamento na seção B para o modelo Faisca para MC-XI......148 Figura 144 - Aceleração na seção B para o modelo Faisca para MC-XI......148 Figura 145 - Deslocamento na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-XI...148 Figura 146 - Aceleração na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-XI......148 Figura 147 - Deslocamento na seção A para o modelo AISC para MC-XII......149 Figura 148 - Aceleração na seção A para o modelo AISC para MC-XII......149 Figura 149 - Deslocamento na seção A para o modelo SCI para MC-XII ......149 Figura 150 - Aceleração na seção A para o modelo SCI para MC-XII ......149 Figura 151 - Deslocamento na seção A para o modelo Faisca para MC-XII..........150 Figura 152 - Aceleração na seção A para o modelo Faisca para MC-XII......150 Figura 153 - Deslocamento na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-XII..150 Figura 154 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-XII......150

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de carregamento dinâmico para atividades rítmicas
Tabela 2 - Limites de aceleração recomendados para atividades rítmicas
Tabela 3 - Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de
estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas [37]
Tabela 4 - Valor de dose de vibração para edifícios residenciais entre probabilidades
de comentários adversos [41]40
Tabela 5 - Faixa dos fatores de multiplicação para magnitudes satisfatórias específicas
de vibrações de edifícios com respeito à resposta [40]43
Tabela 6 - Valor de dose de vibração para edifícios residenciais entre probabilidades
de comentários adversos [40]47
Tabela 7 - Tolerância para VDV47
Tabela 8 - Parâmetros de carregamento dinâmico para atividades rítmicas [36]51
Tabela 9 - Coeficientes de Fourier e ângulos de fase para as atividades [39]53
Tabela 10 - Parâmetros analíticos para atividades humanas [51]
Tabela 11 - Coeficiente de defasagem em relação ao número de pessoas [51]56
Tabela 12 - Propriedades geométricas dos perfis    62
Tabela 13 - Características do modelo de elementos finitos do piso       69
Tabela 14 - Parâmetros utilizados no amortecimento de Rayleigh       74
Tabela 15 - Características modais do piso misto75
Tabela 16 - Frequências fundamentais mínimas para prática de atividade rítmica86
Tabela 17 - Parâmetros de representação tradicional para a carga dinâmica89
Tabela 18 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-I95
Tabela 19 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-II96
Tabela 20 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-III97
Tabela 21 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-IV99
Tabela 22 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-V102
Tabela 23 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-VI104
Tabela 24 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-VII105
Tabela 25 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-VIII106
Tabela 26 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-IX110
Tabela 27 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-X111

### LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

American Institute of Steel Construction
Algoritmo genético
Swanson Analysis Systems
British Standard
Comité Euro-International du Béton
Estado limite de serviço
Estado limite último
Força dinâmica normalizada
International Organization for Standardization
Modelo de carregamento
Método dos Elementos Finitos
Norma Brasileira
Sistema de um grau de liberdade
Valor de dose de vibração

## LISTA DE SÍMBOLOS

a(t)	aceleração
ac	taxa de contato
ai	aceleração do indivíduo
a₀/p	valor limite para razão entre a aceleração de pico e gravidade
ap	aceleração de pico
a <sub>p</sub> /g	razão entre a aceleração de pico e gravidade
aw(t)	aceleração ponderada em função do tempo
aw,rms	aceleração rms ponderada
CD	coeficiente de defasagem
Ci	amortecimento do indivíduo
dB	decibéis
Ecs	módulo de elasticidade secante
Es	módulo de elasticidade
eVDV	valor de dose de vibração estimado
F(t)	função do carregamento dinâmico
f <sub>ck</sub>	resistência a compressão
fcrítica	frequência crítica da estrutura
fn	frequência natural da estrutura
fp	frequência de excitação (Hz)
f <sub>step</sub>	frequência de excitação
fy	tensão de escoamento
h	hora
Н	número de termos de Fourier
Hz	Hertz
i	número do harmônico
ki	rigidez do indivíduo
Kp	coeficiente de impacto
m/s <sup>1,75</sup>	metro por segundo elevado a 1,75
m/s²	metro por segundo ao quadrado
mi	massa do indivíduo

min	minutos
mm	milímetros
N	Newton
N	Número de harmônicos
р	número de participantes da atividade rítmica
Р	peso do indivíduo
Q	peso do indivíduo
S	segundo
SE	seção estrutural
Т	período fundamental da atividade
t	tempo
Т	período
Tc	período de contato da atividade
tdia	duração da exposição por dia
tn	duração da vibração para "n" episódios
$VDV_{b/d,\tau}$	valor de dose de vibração em função de "wb" ou "wd" e a amostra
	representativa de tempo "T"
VDVb/d,dia/noite	valor de dose de vibração em função de "w $_{ m b}$ " ou "w $_{ m d}$ " e o período
	do dia (dia ou noite)
VDV <sub>d/d,tn</sub>	valor de dose de vibração em função de "wb" ou "wd" e a duração
	da vibração "t <sub>n</sub> "
Vi	velocidade do indivíduo
Wb	coeficiente de ponderação para acelerações verticais
Wd	coeficiente de ponderação para acelerações horizontais
Xi	deslocamento do indivíduo
ν	coeficiente de Poisson
π	pi
ξ	taxa de amortecimento modal
<b>W</b> 0i	frequência natural circular referente ao modo i
γο	peso específico do concreto
фh	ângulo de fase do h-ésimo harmônico
αh	coeficiente de Fourier do h-ésimo harmônico
фi	ângulo de fase para o i-ésimo harmônico

αi	coeficiente dinâmico para o i-ésimo harmônico
γs	peso específico do aço

## SUMÁRIO

IN	ITRODUÇÃO	21
1.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.	AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES E CONFORTO HUMANO EM PISOS	33
	2.1 Guia de Projeto AISC:2016 Volume 11	33
	2.2 Norma Brasileira NBR 6118:2014	35
	2.3 Guia de Projeto SCI: 2009	36
	2.4 Norma Brasileira NBR 8800:2008	37
	2.5 Norma Britânica BS 6472-1:2008	38
	2.6 Norma ISO 10137:2007	41
	2.7 Outros critérios de conforto humano	47
3.	CARACTERIZAÇÃO DAS ATIVIDADES HUMANAS RÍTMICAS	48
	3.1 Considerações iniciais	48
	3.2 Caracterização das atividades humanas rítmicas	49
	3.3 Modelo de carregamento proposto no Guia AISC (2016)	50
	3.4 Modelo de carregamento proposto no Guia SCI (2009)	52
	3.5 Modelo de carregamento proposto por Faisca (2003)	54
	3.6 Modelo biodinâmico proposto por Campista (2019)	57
4.	MODELAGEM ESTRUTURAL E INVESTIGAÇÃO DAS CARGAS DINÂMICA	<b>\</b> \$60
	4.1 Considerações iniciais	60
	4.2 Modelo estrutural	60
	4.3 Posicionamento do carregamento dinâmico	62
5.	MODELAGEM NUMÉRICA DO PISO MISTO (AÇO-CONCRETO)	67
	5.1 Considerações iniciais	67
	5.2 Modelo numérico-computacional	67
	5.3 Elemento finito de viga tridimensional - BEAM44	69
	5.4 Elemento finito de casca - SHELL63	70
	5.5 Elemento finito de casca - COMBIN7	70
	5.6 Elemento finito de casca – COMBIN39	70
	5.7 Elemento finito de casca – COMBIN40	70
	5.8 Hipóteses simplificadoras	70
	5.9 Modelagem do amortecimento estrutural	72

6. ANÁLISE ESTRUTURAL	75			
6.1 Generalidades	75			
6.2 Análise modal	75			
6.3 Análise harmônica				
6.4 Análise de vibração forçada				
6.4.1 Cargas dinâmicas				
6.4.2 Modelos de carregamento de I a IV - 20	pessoas92			
6.4.2.1 Modelo de carregamento I (MC-I)	92			
6.4.2.2 Modelo de carregamento II (MC-II)	93			
6.4.2.3 Modelo de carregamento III (MC-III)	97			
6.4.2.4 Modelo de carregamento IV (MC-IV)				
6.4.3 Modelos de carregamento de V a VIII - 4	48 pessoas99			
6.4.3.1 Modelo de carregamento V (MC-V)				
6.4.3.2 Modelo de carregamento VI (MC-VI)				
6.4.3.3 Modelo de carregamento VII (MC-VI	<i>I</i> ) 104			
6.4.3.4 Modelo de carregamento VIII (MC-V	III) 106			
6.4.4 Modelos de carregamento de IX a XII - (	64 pessoas107			
6.4.4.1 Modelo de carregamento IX (MC-IX)				
6.4.4.2 Modelo de carregamento X (MC-X)				
6.4.4.3 Modelo de carregamento XI (MC-XI)				
6.4.4.4 Modelo de carregamento XII (MC-XI	I) 113			
6.4.5 Análise comparativa dos resultados e co	onforto humano115			
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS				
7.1. Introdução				
7.3. Conclusões alcançadas				
7.3. Sugestões para trabalhos futuros				
REFERÊNCIAS				
ANEXO 1	129			
ANEXO 2	130			
ANEXO 3	NEXO 3			

### INTRODUÇÃO

O desenvolvimento científico e tecnológico, ao longo dos anos, tem proporcionado o avanço da construção civil, seja no campo que envolve o conhecimento dos materiais e novas técnicas construtivas, seja no aprimoramento dos processos de cálculo. Esses fatores colaboram para a concepção de estruturas mais modernas e arrojadas, vencendo grandes vãos com peças estruturais cada vez mais leves e esbeltas que tornam maior sua flexibilidade.

Esta tendência, tem conduzido as estruturas a comportamentos dinâmicos de níveis preocupantes no que tange ao conforto humano de seus usuários. Além disso, uma outra consequência importante é a diminuição da frequência fundamental da estrutura, que fica mais próxima da faixa de frequências associadas às atividades humanas como andar, correr, saltar e dançar. Os exemplos das Figuras 1 e Figura 2 correspondem, respectivamente, às atividades de ginástica aeróbica e saltos a vontade e demonstram a importância de se considerar nos projetos estruturais das edificações os efeitos dinâmicos gerados por atividades rítmicas, a fim de se obter as cargas geradas por tais atividades e verificar, de acordo com especificações em normas, a viabilidade da execução da atividade na edificação.



Figura 1 - Ginástica aeróbica [1]



Figura 2 - Saltos a vontade [2]

Desse modo, o desenvolvimento de projetos de edificações a partir da técnica de pisos mistos leves, resulta em estruturas mais susceptíveis a sofrer vibrações excessivas pelo simples caminhar de pessoas, ou mais gravemente por atividades rítmicas. Essa situação pode levar ao desconforto do usuário ou até mesmo ao comprometimento da estrutura, gerando preocupação quanto à resposta dinâmica quando estes são submetidos a atividades humanas rítmicas.

Nesse contexto, torna-se fundamental a avaliação rigorosa das edificações quando submetidas a cargas dinâmicas. No que concerne à análise estrutural, devese realizar a análise dinâmica, bem como as verificações necessárias quanto ao estado limite de serviço sob o ponto de vista do conforto humano na estrutura, para tal, deve-se modelar as cargas provenientes da atividade humana rítmica.

Ademais, considerando o estado limite de serviço, sabe-se que as vibrações mais perturbadoras, em relação à percepção humana, encontram-se na faixa de 4 a 8 Hz [3] e, paralelamente, a maioria das frequências naturais dos sistemas estruturais relativos a pisos situam-se, também, nesta faixa. Além disso, as frequências de excitação em razão de atividades humanas ocorrem, igualmente, nesta região. Esta combinação torna os sistemas estruturais mais susceptíveis ao fenômeno da ressonância, ocasionando vibrações indesejáveis justamente na faixa de frequência mais perceptível ao ser humano.

Sendo assim, considerando os fatos citados nos parágrafos anteriores, este trabalho de pesquisa tem por objetivo analisar o comportamento estrutural dinâmico de um piso misto (aço-concreto) quando submetido a ações humanas rítmicas, além de avaliar o conforto humano dos ocupantes. Neste contexto, os focos principais desta investigação são, a saber: representação do carregamento dinâmico com base nos modelos de "força-dura" e com base no emprego dos sistemas biodinâmicos; avaliação das respostas dinâmicas em termos de acelerações de pico, rms e VDV; avaliação do conforto humano a partir da comparação das respostas dinâmicas com normas e critérios de projeto.

#### Motivação

Esta investigação apresenta como motivações principais a apresentação e caracterização, em termos qualitativos e quantitativos, acerca da relevância do desenvolvimento de pesquisas relacionadas à análise dinâmica de pisos de edifícios, de maneira a fornecer subsídios aos projetistas de estruturas no sentido de como os problemas de vibrações excessivas podem ser identificados ainda em fase inicial de projeto, fornecendo recomendações à prevenção destas vibrações, além de estabelecer atitudes de projeto visando garantir o conforto dos usuários.

### Objetivos

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo a análise de vibrações e avaliação do conforto humano de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a carregamentos dinâmicos humanos rítmicos (ginástica aeróbica). No que se refere à representação das ações dinâmicas humanas são utilizadas funções matemáticas harmônicas baseadas nos modelos tradicionais de "força-dura". De outra forma, objetivando incorporar as características dinâmicas das pessoas (massa, amortecimento e rigidez), para a modelagem do carregamento dinâmico humano rítmico este trabalho de pesquisa considera o uso de sistemas biodinâmicos do tipo "massa-mola-

amortecedor", com um grau de liberdade (S1GL), de maneira a simular o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura. Dentro deste contexto, a resposta estrutural dinâmica de um piso misto (aço-concreto) representativo de um pavimento de um edifício comercial é obtida e os valores máximos dos deslocamentos e acelerações da estrutura são confrontados com os valores limites estabelecidos por normas e recomendações de projeto.

#### Estrutura da dissertação

No capítulo um é apresentada uma revisão bibliográfica, onde são mencionados os trabalhos desenvolvidos por vários autores, relacionados ao conforto humano de pisos mistos (aço-concreto) quando submetidos às ações rítmicas.

No capítulo dois são apresentados de modo crescente quanto ao ano de publicação, os critérios e normas de projeto utilizados para avaliação do conforto humano.

No capítulo três são apresentadas as metodologias adotadas na modelagem dos carregamentos dinâmicos. Sendo assim, as formulações matemáticas utilizadas na representação da ação humana rítmica são descritas.

No capítulo quatro o modelo estrutural do piso misto (aço-concreto) analisado neste estudo é descrito, assim como suas propriedades físicas. Por fim, o posicionamento da carga dinâmica para os casos de carregamentos analisados é representado.

No capítulo cinco são apresentadas as características da modelagem numérica desenvolvida por meio do método dos elementos finitos, bem como as hipóteses simplificadoras adotadas e a modelagem do amortecimento estrutural.

O capítulo seis apresenta os resultados da análise dinâmica do piso em estudo, iniciando com a apresentação dos resultados para análise dos autovalores e autovetores, seguido pela avaliação da resposta harmônica do piso, para então, apresentar os resultados da análise transiente, onde são avaliados os casos de carregamento em estudo neste trabalho de pesquisa.

No capítulo sete apresentam-se as conclusões obtidas com este estudo, contendo as considerações e propostas para trabalhos futuros.

### **1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo tem como objetivo apresentar os estudos desenvolvidos por diversos autores no campo do conforto humano de estruturas mistas (aço-concreto) quando submetidas a atividades humanas rítmicas.

Neste sentido, os efeitos dinâmicos sobre pisos mistos (aço-concreto) é um assunto estudado e em constante evolução desde o século XIX. Nesse sentido, Wiss e Parmalee [4] foram um dos pioneiros, que com intuito de avaliar a percepção humana das vibrações que ocorrem em pisos comuns de edificações, realizaram investigações a partir de algumas funções de carregamento propostas. Em seus trabalhos de pesquisa, foi submetido um grupo de 40 pessoas a um tipo de onda projetada para simular a vibração normal encontrada em sistemas estruturais de pisos com o objetivo de estudar, experimentalmente, a reação humana às vibrações transientes verticais em termos de frequência, deslocamento máximo e amortecimento.

No entanto, foi a partir das pesquisas realizadas por Bachmann [5] sobre o comportamento dinâmico de passarelas, ginásios, salas de esporte, de dança e locais de shows quando submetidos a carregamentos provenientes de atividades humanas, que foi possível estabelecer recomendações para minimizar vibrações excessivas. Tendo como base nas análises efetuadas, o autor recomenda afastar a frequência fundamental da estrutura do harmônico de excitação crítico com o objetivo de evitar a ressonância. Neste contexto, estruturas em fase de concepção do projeto devem sofrer modificações e estruturas já existentes devem ser modificadas.

Ji e Ellis [6], ao estudarem carregamentos gerados por alguns tipos de danças rítmicas, concluíram que, em alguns casos, a multidão deve ser modelada como sistema massa-mola-amortecedor, por verificarem que quando há um contato relativamente curto entre as pessoas e a estrutura a massa do corpo não vibra juntamente com a estrutura. Tal consideração pode ser relevante em uma análise, quando se assume que um grupo de pessoas se encontra parado sobre uma estrutura, significa um aumento da massa total da estrutura, o que implicaria em uma redução da frequência natural da estrutura.

Allen e Murray [7] apresentaram um critério de cálculo para vibrações devido ao caminhar humano, baseado na resposta dinâmica da estrutura sujeita a essas excitações, bem como na sensibilidade e percepção dos usuários. Após a análise de vários pisos mistos, os autores sugeriram que estruturas com taxa de amortecimento entre 4% e 10% que estivessem acima da linha média da região de distintamente perceptível (conforme escala modificada de Reither-Meister) apresentada na Figura 3, gerariam desconforto aos usuários e os que se situassem na faixa fortemente perceptível seriam considerados como inaceitáveis para os ocupantes.



Figura 3 - Escala modificada de Reiher – Meister [7]

Murray, Allen e Ungar [3] foram os responsáveis pelo desenvolvimento do guia de projeto AISC (*Floor Vibrations due to Human Activity, Steel Design Guide Series*, Volume 11) com o objetivo de fornecer limites de conforto humano em estruturas submetidas às atividades de caminhar e rítmicas. Neste guia, o objetivo em expor cálculos analíticos e recomendações com o objetivo de avaliar e minimizar as vibrações estruturais nas situações descritas.

Hanagan e Murray [8] em seu trabalho de pesquisa, apresentaram a implementação de um sistema de controle de vibrações ativo baseado em um atenuador eletromagnético propagando uma força de controle sobre o sistema estrutural, de modo que a redução das vibrações por este mecanismo é avaliada analítica e experimentalmente. 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 à amplitude do pico de velocidade, reduziu-se em 12% em um sistema estrutural descontrolado.

Alves [9] analisou experimentalmente a influência da atividade humana em uma plataforma rígida. A partir de testes, obteve os valores dos coeficientes de Fourier para os primeiros harmônicos da carga dinâmica. Ao confrontar os valores obtidos com os parâmetros recomendados no CEB [10], alcançou uma resposta satisfatória pela proximidade dos valores obtidos experimentalmente com os recomendados. No mesmo contexto, foi avaliada a influência das características dos indivíduos e dos tipos de calçados utilizados durante as atividades na aquisição dos coeficientes de Fourier.

El-Dardiry et al. [11] compararam as frequências naturais dos pisos de um edifício construído em laboratório com as obtidas a partir de um modelo numérico desenvolvido com o uso do método dos elementos finitos. Os resultados obtidos indicaram melhor aproximação das respostas experimentais, se comparado ao numérico no modelo que considera a rigidez real das colunas.

Silva et al. [12] relataram um aumento significativo nos problemas de vibrações indesejáveis em estruturas resultante da inserção de tendências construtivas. A fim de avaliar estes problemas, os pesquisadores investigaram um piso de uma edificação submetido a ação rítmica humana a partir de uma análise dinâmica com auxílio do programa ANSYS [55]. Tendo em vista os resultados obtidos, após a comparação da resposta dinâmica com valores limites propostos por autores e guias de projeto, observou-se o cumprimento dos critérios, garantindo o conforto dos ocupantes do piso em questão.

Reynolds e Pavic [13] avaliaram o efeito do uso de pisos falsos frente a redução das propriedades dinâmicas de pisos de concreto com grandes vãos. Nesta conjuntura, foram obtidas as respostas dinâmicas referentes às frequências naturais, modos de vibração e amortecimento relacionado a cada modo, antes e depois da instalação dos pisos falsos. A partir deste estudo, foi observado um aumento de até 89% do amortecimento modal da estrutura, bem como o acréscimo significativo da rigidez dos pisos de concreto. Todavia, estas mudanças não foram constantes em todos os modos avaliados, não sendo possível antecipar para quais modos a

instalação dos pisos falsos se tornaria benéfica. Além disto, tal medida implementada nos pisos de concreto demonstraram a redução da resposta de vibração quando submetidos a atividade de caminhar humano.

Hanagan [14] analisou cinco situações onde ocorriam vibrações perturbadoras em razão do caminhar humano, incluindo escritórios, salas de aulas e espaços comerciais e constatou a importância da consideração desta ação em projetos estruturais sob o ponto de vista do estado limite de serviço. A autora determinou casos onde elementos arquitetônicos influenciaram no amortecimento estrutural, identificando os que promoveram ou não redução de vibrações. Segundo a autora, estas avaliações e recomendações relativas à avaliação das vibrações, ainda geram resistência por parte dos proprietários das construções e projetistas. Como consequência desta resistência, o custo de reparo se torna maior do que se fosse implementado em fase de projeto.

Ebrahimpour e Sack [15] realizaram um levantamento ao longo da história sobre os modelos representativos da ação dinâmica humana, bem como os critérios de percepção humana e das técnicas de atenuação das vibrações. Em acréscimo, foram expostas duas técnicas de controle de vibração utilizando materiais compósitos e visco elásticos.

Loose [16] avaliou a resposta dinâmica dos pisos mistos quando submetidos a ações humanas rítmicas, como ginástica aeróbica e saltos a vontade. Baseado nisto, a resposta dinâmica em termos de aceleração de pico foi confrontada com as recomendações internacionais referentes as distintas formas de ocupação da estrutura.

Melo et al. [17] expõe sobre a metodologia de avaliação do conforto humano dos pisos mistos de uma edificação com múltiplos andares, com vãos principais variando entre 5 e 10 m, quando submetidos ao caminhar humano. Neste sentido, são avaliados quatro modelos representativos do caminhar humano que com base nos resultados obtidos, comparou-se as acelerações de pico com os limites sugeridos as em normas e guias de projeto.

Silva et al. [18] apresenta o cenário de sistemas estruturais empregados, tendo como fatores principais a competitividade dos mercados internacionais e o avanço tecnológico, o que ocasiona o desenvolvimento de estruturas com menor peso e menor amortecimento, resultando no aparecimento de vibrações indesejadas quando as estruturas são submetidas a carregamentos dinâmicos. Neste estudo, os autores avaliam os pisos mistos (aço-concreto) quando submetido a atividades humanas rítmicas. Com base nesta avaliação, foi determinada a violação dos limites de vibrações no estado limite de serviço quando avaliada a velocidade máxima, no entanto, quando avaliada a aceleração, o piso satisfaz os critérios de conforto.

Brownjohn e Middleton [19] contrapondo a maioria dos autores, avaliaram estruturas rígidas com frequências superiores a 10 Hz e evidenciaram respostas dinâmicas significativas comparando os resultados de desconforto humano de outros autores para frequências abaixo de 8 Hz. A partir desta situação demonstra-se a influência dos mais altos harmônicos do caminhar humano, confirmando a necessidade de não subestimar a resposta de frequências naturais de até 20 Hz sob o ponto de vista de conforto do usuário. Ademais, os autores observam a importância da consideração de outros harmônicos além dos comumente propostos na avaliação do caminhar.

De Silva e Thambiratnam [20][21] avaliaram os aspectos de vibrações para um piso misto composto por múltiplos painéis, sob a ação de atividades rítmicas e consideração do amortecimento estrutural. A partir dos resultados alcançados, foi constatado que os harmônicos relacionados às atividades rítmicas excitam outros modos do piso além do fundamental. Nesta circunstância, os autores propõem sugestões complementares às normas e guias de projetos.

Han et al. [22] sugere limites de aceleração vertical para pisos submetidos ao caminhar humano e a saltos, baseado em testes experimentais desenvolvidos com 20 coreanos. Neste sentido, foram constatados quatro níveis de percepção humana quanto a aceleração vertical em residências, assim como o aparecimento de valores inferiores quando comparados a outros países, apresentando este fato como associação ao tipo de uso da estrutura e estilo de vida dos usuários.

Loose et al. [23] investigaram um sistema estrutural composto por um piso misto (aço-concreto) e confrontaram os resultados dinâmicos com as recomendações relacionadas ao conforto humano. Com base na avaliação e comparação, os valores mostram a violação dos limites recomendados para a maioria dos casos de atividades humanas consideradas (saltos a vontade e ginástica rítmica), expondo o desconforto humano do sistema estrutural quando submetido a estes carregamentos.

Zhen et al. [24] examinaram a importância da imperfeição da continuidade entre painéis de um piso misto por meio de uma análise experimental em laboratório e a comparação com o modelo numérico. Nesta conjuntura, as respostas dinâmicas foram obtidas em termos da análise modal e harmônica, onde as ligações semirrígidas entre os painéis do modelo numérico foram desenvolvidas com elementos de mola para que os resultados se aproximassem dos avaliados experimentalmente.

Setareh [25] avaliou as medições experimentais de um escritório com estrutura em balanço predisposto a vibrações excessivas, obtendo as respostas dinâmicas das frequências naturais e modos de vibração. Diante desta constatação, os resultados foram comparados com os obtidos do modelo numérico computacional, identificando uma defasagem do segundo e terceiro modo de vibração que, segundo o autor, se deve ao fato de existirem número insuficientes de pontos para análise e limitações nos testes, uma vez que a estrutura apresenta grande porte.

Cretu et al. [26] apresentaram um estudo paramétrico de um piso misto sob o ponto de vista das respostas dinâmicas no domínio da frequência e das frequências naturais medidas. Para isto, diversas condições de contorno são levadas em consideração, além da variação da intensidade do carregamento dinâmico e da rigidez da laje com base no uso do método dos elementos finitos. As respostas obtidas foram confrontadas com aquelas extraídas a partir da modelagem em elementos finitos. Diante de tal comparação, foi verificado a proximidade de ambas respostas.

Varela e Batista [27] criaram um protótipo em escala 1:1 em laboratório, de modo a realizar testes de submissão a ações humanas rítmicas, em especial o caminhar aleatório. Com o objetivo de diminuir as vibrações, foi instalado na estrutura avaliada um controle passivo. Com base nesta configuração, as acelerações do sistema estrutural foram avaliadas e comparadas entre si com e sem o uso dos controles de vibração. A partir dos resultados, foi identificada uma redução substancial nas respostas de estruturas com baixo amortecimento estrutural, como os pisos mistos. Como sugestão, os autores propõem o sistema de controle como uma alternativa de baixo custo e possível de incluir na fase do projeto estrutural.

Hudson e Reynolds [28] expõem o aumento da circunstância de violação dos níveis de vibração recomendados, ocasionados por ações rítmicas humanas em estruturas. Como forma de amenizar estes efeitos, os autores sugerem a utilização de um sistema de controle ativo para minimizar as vibrações e atender o critério de conforto humano. Além disso, o trabalho investiga aspectos ambientais e econômicos da incorporação do mesmo na estrutura.

Lee et al. [29] avaliaram uma vibração atípica nos andares superiores de um edifício localizado na Coréia. Para isto foram simuladas atividades rítmicas no 12º

andar experimentalmente e analiticamente, com objetivo de comparar as frequências naturais e as acelerações verticais. Após a avaliação dos resultados, conclui-se que o fenômeno de vibração atípico foi ocasionado devido a ocorrência de ressonância entre a frequência da estrutura e a frequência de excitação da atividade rítmica.

Costa Neves et al. [30] estudaram o comportamento de estruturas mistas cujas dimensões variavam entre 4m e 10m, a partir da utilização de dois modelos representativos da carga proveniente da atividade humana rítmica. Neste sentido, as respostas dinâmicas em termos de acelerações de pico se mostraram inaceitáveis.

Silva, Andrade e Lopes [31] verificaram o comportamento de um piso misto (aço-concreto) de 1,600 m<sup>2</sup> de um edifício comercial. Baseado no estudo desenvolvido a partir da modelagem numérica via método dos elementos finitos, além da inclusão dos conectores da laje e da variação do comportamento das conexões viga-viga e viga-pilar entre rígido, semirrígido e flexível, os autores indicaram baixa influência dos conectores entre a viga-laje quando considerado a interação entre o aço e o concreto foi considerada. Deste modo, quando observada a interação aço-concreto e a diminuição da rigidez das conexões, avaliou-se a diminuição nas frequências naturais do piso. Sendo assim, esta investigação demonstrou que as atividades humanas rítmicas podem conduzir o piso misto a níveis inaceitáveis de vibrações, levando a violação dos critérios de conforto humano.

Gaspar e Silva [32] avaliaram a resposta dinâmica de um piso misto de 10 x 10 m quando submetido a atividades humanas rítmicas. Neste sentido, foram analisados resultados em termos de aceleração de pico, aceleração rms e VDV, obtendo parâmetros de vibração excessiva que excedem os limites recomendados. Além disto, os autores afirmam que o uso da representação da carga dinâmica a partir da função matemática desenvolvida por Faisca evidencia economia para o projeto quando comparado as outras caracterizações do carregamento dinâmico.

Shahabpoor et al. [33] relataram a influência das propriedades dinâmicas na interação humano-estrutura a partir de testes experimentais com vários participantes caminhando de maneira aleatória sobre a estrutura em análise. Em oposição ao que se esperava, as frequências naturais obtidas experimentalmente foram mais altas durante o caminhar humano do que quando não foram performadas atividades sobre a mesma, e além disso, quando os participantes do ensaio ficavam apenas parados, os resultados para frequências naturais se apresentaram mais baixos. Desta maneira, concluiu-se que tanto as características dinâmicas dos participantes das atividades

quanto as propriedades modais da estrutura afetam diretamente a interação humanoestrutura. Além disso, conclui-se que o efeito de multidão sobre os parâmetros modais se torna maior conforme aumentaram os participantes do teste experimental.

Gaspar et al. [34] investigaram a importância da inclusão das características dinâmicas dos participantes que podem conduzir a análises mais realistas e projetos mais econômicos. Com base neste contexto, o uso de sistemas biodinâmicos para representar as características dinâmicas do indivíduo é recomendado. Portanto, foram desenvolvidos testes experimentais para obtenção dos parâmetros relacionados ao indivíduo quando desempenha atividades rítmicas de saltos e da rigidez e amortecimento do indivíduo a partir da resolução de um problema de otimização.

Campista e Silva [35] analisaram a resposta dinâmica de um piso misto (açoconcreto) quando submetido a atividade rítmica aeróbica segundo a representação da carga de maneira tradicional ("força-dura") e posteriormente, incluindo um sistema biodinâmico composto de massa-mola-amortecedor. As respostas dinâmicas foram obtidas em termos de aceleração de pico, aceleração rms e VDV. Neste contexto, a utilização do modelo biodinâmico retornou uma redução significativa na resposta quando comparadas com os modelos de força-dura.

Sousa et al. [36] avaliaram o comportamento dinâmico de um piso de concreto armado quando submetido a ação de atividades humanas rítmicas. Inicialmente, foram desenvolvidos testes experimentais para obtenção do amortecimento estrutural. Com base nisto, o piso apresentou vibrações excessivas quando utilizados os modelos de representação da carga mais conservadores, demonstrando desconforto humano. Por outro lado, o piso apresentou boas respostas quando comparado aos limites normativos sob o uso dos sistemas biodinâmicos, não apresentando desconforto aos ocupantes.

### 2. NORMAS DE PROJETO PARA AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM PISOS

Este capítulo visa apresentar as normas de projeto, bem como critérios, a fim de orientar a avaliação de vibrações em estruturas sob a ótica do conforto humano. As normas de projeto são dispostas em ordem cronológica decrescente.

2.1 Guia Prático de Projeto AISC:2016

Elaborado pelos autores Murray, Allen, Ungar e Davis, em sua segunda edição, este guia tem como objetivo principal fornecer princípios básicos e ferramentas analíticas simples para avaliar a capacidade de serviço de vibração de sistemas estruturais de aço submetidos a atividade humanas [37].

A partir da análise da resposta dinâmica, induzida pela atividade humana, definida por este guia é possível alcançar os parâmetros dos modos de vibração e suas respectivas frequências, amortecimento e massa modal. Para o caso em que esta frequência for muito baixa ao ponto de coincidir com um dos harmônicos de excitação, pode ocorrer o fenômeno da ressonância. A determinação das forças produzidas por atividades humanas é representada por uma série de Fourier, conforme equação (1).

$$F(t) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_{i} \text{Qsen}(2\pi f_{step} t - \phi_{i})$$
(1)

Onde:

- N: número de harmônicos considerados relevantes;
- Q: peso do indivíduo (N);
- fstep: frequência de excitação (Hz);
- i: número do harmônico;
- t: tempo (s);
- α<sub>i</sub>: coeficiente dinâmico para o i-ésimo harmônico;
- φ<sub>i</sub>: ângulo de fase para o i-ésimo harmônico.

No que tange a prevenção dos problemas de vibrações provocados atividades rítmicas, a frequência natural da estrutura é o parâmetro mais importante a ser considerado. Além disso, a determinação da função da carga relacionada a atividade e a transferência das vibrações nos locais onde as atividades são desempenhadas exercem grande influência, tendo sido definido previamente. A Tabela 1 apresenta os valores de frequência de excitação ( $f_{step}$ ), coeficientes dinâmicos ( $\alpha_i$ ) e os ângulos de fase ( $\phi_i$ ) relativos as variadas formas de atividades.

Atividade	Frequência de excitação	Coeficiente dinâmico	Ângulo de fase
<b></b>	(Tstep) - TTZ	(01)	(ψι) - ταυ
Dança:			
Primeiro harmônico	1,5 a 2,7	0,5	-
Segundo harmônico	3 a 5,4	0,05	-
Aeróbica:			
Primeiro harmônico	2 a 2,75	1,5	-
Segundo harmônico	4 a 5,50	0,6	-
Terceiro harmônico	6 a 8,25	0,1	-

Tabela 1 - Parâmetros de carregamento dinâmico para atividades rítmicas

É importante salientar que o critério de avaliação recomendado por este guia é baseado relação entre aceleração de pico e da gravidade (a<sub>p</sub>/g). Esta relação é determinada por uma inequação, onde o valor obtido deve ser menor que o valor limite (a<sub>o</sub>/p), sendo os limites recomendados vistos na Tabela 2 que determina os limites recomendados de aceleração e é proveniente de *2010 National Building Code of Canada*. O termo designado como "local afetado" sugere onde a atividade rítmica é realizada e a locais adjacentes.

Tabela 2 - Li	mites de ace	leração reco	omendados p	para atividade	s rítmicas

Local afetado	Aceleração limite	
	(% gravidade)	$m/s^2 (g = 9.81 m/s^2)$
Escritório ou residencial	0,5	0,49
Área de refeições	1,5 a 2,5	1,47 a 2,45
Academia ou área para levantamento de pesos	1,5 a 2,5	1,47 a 2,45
Apenas para atividade rítmica	4 a 7	3,92 a 6,86
### 2.2 Norma Brasileira NBR 6118:2014

Esta norma determina os requisitos mínimos necessários em projetos de estruturas de concreto simples, armado e protendido, com exceção àquelas em que são empregados concreto leve, pesado e outros especiais.

No que se refere a vibração de pisos, a norma determina parâmetros em relação a aceitabilidade sensorial no item 13.3, através da tabela 13.3 [38]. Este limite é definido para vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável, sendo determinado a partir do deslocamento-limite igual a L/350, sendo L o menor vão do piso e o deslocamento considerado devido a cargas acidentais. Neste contexto, com o propósito de prevenir estas vibrações em situações especiais de utilização, a limitação da flecha deve ser realizada conforme estabelecido no item 13.3 [38].

Na conjuntura da utilização de estruturas usuais, a verificação das vibrações pode ser efetuada em regime linear conforme item 23.3. De forma a garantir o comportamento satisfatório das estruturas submetidas a vibrações, deve-se afastar o máximo possível a frequência natural da estrutura (fn) da frequência crítica (f<sub>crítica</sub>). A relação entre a frequência natural (fn) e a crítica (f<sub>crítica</sub>) da estrutura é determinada segundo a equação (2).

$$f_n > 1, 2 \cdot f_{critica}$$
 (2)

A equação (2) é utilizada com o objetivo de afastar a frequência natural da estrutura da frequência crítica, e deste modo evitar o fenômeno da ressonância entre o sistema estrutural e a ação dinâmica atuante sobre a mesma, e, consequentemente, impedir o desconforto dos usuários. No caso de inexistência de valores determinados experimentalmente, os valores indicados na Tabela 3 podem ser adotados para f<sub>crítica</sub>.

Vale ressaltar que em casos específicos, onde as prescrições do item 23.3 não puderem ser atendidas, uma análise dinâmica mais detalhada deve ser realizada conforme normas internacionais, enquanto não houver Norma Brasileira própria.

Caso	f <sub>crítica</sub> (Hz)
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

Tabela 3 - Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais deestruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas [38]

A NBR 6118:2014 baseia-se somente no critério de frequência fundamental mínima da estrutura, entretanto, é afirmado por Varela [39]: "Uma análise baseada em frequências mínimas não é aconselhável porque a estrutura pode apresentar vibrações incômodas mesmo que não haja ressonância com a excitação".

2.3 Guia de Projeto SCI: 2009

Este guia viabiliza a diretriz para o desenvolvimento de projetos de pisos submetidos a vibrações e consolidou-se a partir da publicação do Steel Construction Institute (SCI), a P354.

No contexto deste guia de projeto [40], a avaliação das vibrações pela percepção humana é medida através da aceleração rms, sendo um valor com melhor representatividade da vibração no decorrer do tempo. Os critérios de obtenção da aceleração rms são os mesmos utilizados pela norma ISO 10137 [41] e pela norma britânica BS 6472-1 [42], que influem a frequência e a direção da vibração. Para isto, os coeficientes de ponderação utilizados para filtrar as acelerações são os fornecidos nas normas BS 6841 [43] e ISO 2631-1 [44].

Em circunstâncias que ocorrem vibrações intermitentes, como por exemplo em caminhadas, o guia de projeto SCI recomenda o uso de valores de dose de vibração (VDV) para a avaliação de vibrações conforme as normas ISO 10137 [41] e BS 6472 [45]. Quanto ao critério de avaliação do conforto humano quando o piso é submetido a atividades rítmicas, o guia cita que não existe um consenso em relação aos valores limites de aceleração para este tipo de atividade. Com base neste contexto, o guia recomenda as recomendações do guia prático de projeto AISC [37].

A norma estabelece as exigências mínimas que devem ser observadas nos projetos de estruturas de aço e mistas (aço-concreto) de edificações. No que tange a verificação do estado limite de serviço (ELS) referente as vibrações de pisos, o item 11.4.1 [46] define o dimensionamento de pisos suscetíveis a vibrações, como os de grandes áreas que não possuem divisórias ou outros elementos de amortecimento, devendo ser dimensionados de formar a evitar o aparecimento de vibrações transientes inaceitáveis, devido ao caminhar humano ou outras fontes, conforme o seu anexo L.

Relacionado ao item, 11.4.2 [46], considera-se que as vibrações contínuas como as induzidas por equipamentos mecânicos, veículos ou atividades humanas rítmicas devem ser verificadas quanto ao estado limite último (ELU), considerando a fadiga, conforme anexo K. Este item também faz referência ao anexo L para a verificação das vibrações no estado limite de serviço.

Sob a ótica do conforto humano e o adequado funcionamento de equipamentos, o anexo L [46] prevê um valor mínimo para as frequências fundamentais do piso não inferior a 3 Hz. O item L.2 deste mesmo anexo leva em conta uma avaliação precisa das vibrações a partir da realização de análises dinâmicas, tendo como base a inclusão da natureza das excitações dinâmicas (como as atividades rítmicas), dos critérios de aceitação para o conforto humano em função do uso das áreas do piso, da frequência fundamental da estrutura, da razão de amortecimento e dos pesos efetivos do piso.

Os procedimentos que devem ser considerados para realizar uma avaliação precisa das vibrações são obtidos através da bibliografia recomendada no item S.4 da mesma norma. Deste modo, além da avaliação precisa das vibrações, o mesmo anexo L, em seu item L.3, apresenta uma maneira simplificada para atividades humanas normais, alertando que a opção por esta avaliação é de escolha do projetista, podendo não constituir em uma solução adequada para o problema [46].

Sendo assim, a análise simplificada da norma NBR 8800 relaciona valores limites de deslocamento estático com a frequência natural do piso em função da atividade exercida sobre o mesmo, tendo como critério de conforto humano que estes limites sejam respeitados.

Tais parâmetros são apresentados em função do tipo de atividade exercida, conforme item L.3 do anexo L [46]. Para pisos em que existe um caminhar humano regular, como em residências, escritórios e similares, a menor frequência natural não pode ser inferior a 4 Hz. Este critério é atendido quando o deslocamento vertical total é menor que 20 mm, onde o mesmo leva em conta as ações permanentes, exceto as dependentes do tempo, e as ações variáveis, a partir da utilização de combinações frequentes de serviço.

No entanto, em pisos onde há a prática de saltos ou danças de forma rítmica, como academias, salões de dança, ginásios e estádios, o limite mínimo estabelecido para a menor frequência natural é de 6 Hz. Em situações onde as atividades rítmicas são performadas de maneira extremamente repetitiva, como nas atividades aeróbicas, o recomendado pela norma é aumentar o limite mínimo para a menor frequência natural de 6 Hz para 8 Hz. Este critério também é atendido a partir da avaliação do deslocamento vertical total, devendo este ser menor que 9 mm para o primeiro caso e menor que 5 mm para o segundo.

## 2.5 Norma Britânica BS 6472-1:2008

Este guia fornece normas a fim de garantir o conforto humano quando em edifícios submetidos a vibrações na faixa de frequência de 0,5 Hz a 80 Hz [42]. Esta norma considera a percepção das vibrações dependente de vários fatores, como a frequência de vibração e a sua direção. Neste sentido, a norma sugere que as acelerações devem ser filtradas de acordo com os coeficientes de ponderação W<sub>b</sub> (para acelerações verticais) e W<sub>d</sub> (para acelerações horizontais), cujo desenvolvimento matemático é descrito na norma BS 6841 [43]. Os coeficientes apresentam a informação quanto a percepção humana das acelerações. Quando na vertical, a faixa de frequência percebida encontra-se entre 4 e 12,5 Hz e quando na horizontal encontra-se na faixa de 1 a 2 Hz.

Considerando esta norma [42], a percepção da vibração contínua varia muito entre os indivíduos, ou seja, metade da população, quando em pé ou sentada, consegue perceber uma aceleração de pico na direção vertical de 0,015m/s<sup>2</sup>. Outro um quarto da população consegue perceber a aceleração de pico a partir de 0,01 m/s<sup>2</sup>

e o restante apenas consegue perceber a partir do valor de 0,02m/s<sup>2</sup>. Estes valores podem se apresentar ligeiramente maiores em situações com período de vibração menor que 1s.

A técnica de avaliação do efeito da vibração nas pessoas é feita a partir da determinação da dose de vibração apropriada, sendo afirmado que a melhor maneira para avaliar a vibração é a partir método do valor de dose de vibração (VDV). Este método prevê uma avaliação consistente das vibrações contínuas, intermitentes, ocasionais e impulsivas, e se correlaciona bem com respostas subjetivas.

O valor de dose de vibração (VDV) é definido pela BS 6472-1 [42], conforme equação (3) a seguir.

$$VDV_{b/d,dia/noite} = \left(\int_{0}^{T} a^{4}(t) dt\right)^{0,25}$$
(3)

Onde:

- VDV<sub>b/d,dia/noite</sub> : valor de dose de vibração (m/s<sup>1,75</sup>);
- a(t): aceleração ponderada a partir dos coeficientes W<sub>b</sub> e W<sub>d</sub>, conforme apropriado (m/s<sup>2</sup>);
- T: período total de tempo (s) do dia ou da noite, onde a vibração pode ocorrer.

No entanto quando a vibração é constante e regular, apenas uma amostra representativa de  $\tau$  segundos necessita ser medida. Desse modo, se o valor de dose de vibração for VDV<sub>b/d, $\tau$ </sub>, então o resultado total de dose de vibração para o dia é fornecido pela equação (4).

$$\mathsf{VDV}_{\mathsf{b/d,dia}} = \left(\frac{\mathsf{t}_{\mathsf{dia}}}{\mathsf{t}_{\tau}}\right)^{0.25} \times \mathsf{VDV}_{\mathsf{b/d,\tau}} \tag{4}$$

Onde t<sub>dia</sub> representa a duração de exposição por dia e é medido em segundos. Se durante qualquer período de avaliação, um total de n episódios de vibração de várias durações (t<sub>n</sub>) existir, cada um com seu respectivo valor de dose de vibração de VDV<sub>d/d,tn</sub>, então, o valor de dose de viração para dia ou noite é dado pela equação (5)

$$VDV_{b/d,dia/noite} = \left(\sum_{n=1}^{n=N} VDV_{b/d,tn}^{4}\right)^{0,25}$$
(5)

Na hipótese de vibrações contínuas, com amplitude constante e com uma relação entre a aceleração de pico e a rms entre 3 a 6, é possível realizar uma aproximação do valor de dose de vibração, chamada de valor de dose de vibração estimado (eVDV), conforme visto na equação (6). No entanto, mesmo que seja possível realizar essa estimativa, a norma diz que não é recomendado sua aplicação para vibrações que apresentam variações ao longo do tempo ou choques.

$$eVDV = 1,4 \times a(t)_{rms} \times t^{0,25}$$
(6)

No que se refere a pisos submetidos a vibrações, este guia normativo distingue a vibrações entre baixa e alta frequência baseado na resposta dinâmica das ações humanas. Pisos com frequências naturais entre 7 a 10 Hz, são chamados de pisos de baixa frequência, por isso são mais suscetíveis a ressonância proveniente de atividades humanas. Por outro lado, os pisos que possuem frequências naturais maiores que as expostas anteriormente são chamados de pisos de alta frequência, possuindo menor probabilidade de serem submetidos ao fenômeno da ressonância quando excitados por atividades humanas.

Quanto aos limites de vibração, visando avaliar o conforto humano, a norma BS 6472-1 [42] apresenta os valores vistos na Tabela 4.

Local e tempo	Baixa probabilidade de comentários adversos <sup>1</sup> (m/s <sup>1,75</sup> )	Possíveis comentários adversos (m/s <sup>1,75</sup> )	Prováveis comentários adversos <sup>2</sup> (m/s <sup>1,75</sup> )	
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	
<sup>1</sup> Comentários não são esperados abaixo desta faixa. <sup>2</sup> Comentários são muito prováveis acima desta faixa.				

Tabela 4 - Valor de dose de vibração para edifícios residenciais entre probabilidades de comentários adversos [42]

No caso de escritórios e oficinais, os fatores de multiplicação de 2 e 4, devem respectivamente, ser aplicados nos valores da Tabela para 16 horas diurnas. Tais valores limites são os que melhor representam o julgamento disponível atualmente, podendo ser utilizados tanto para vibrações verticais quanto horizontais, conforme afirma a norma. Porém, os valores limites não são discretos, sendo representados por uma faixa de variação. E também as características pessoas de cada indivíduo usuário da edificação e os fatores externos à ocorrência da vibração possuem influência sobre estes limites. Com base nisto, a norma considera que o julgamento da aceitabilidade sensorial jamais será feito de forma precisa.

Vale destacar que apesar desta norma não ser a mais usual ainda apresenta informações relevantes para a compreensão dos critérios de conforto humano. Atualmente, utiliza-se o Eurocode 4 [47] que dispõe de recomendações quanto às frequências naturais e faz referência às normas ISO 10137 [41] e a ISO 2631 [44] para maiores desenvolvimentos quanto às avaliações e percepção das vibrações.

# 2.6 Norma ISO 10137:2007

A norma da International Organization for Standardization estabelece recomendações quanto a avaliação de vibrações em edifícios e passarelas. A partir dos critérios e limites de vibrações relativos à aceitabilidade sensorial humana são encontrados no anexo C. diferentemente da norma descrita na seção anterior, a ISO 10137 [41] indica os critérios de avaliação usual como a aceleração *rms*.

A avaliação das vibrações, segundo o item 4.1 (ISO 10137, 2007, p. 4), considera 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).

O critério de definição do conforto humano desta norma, a aceleração rms ponderada (*weighted rms acceleration*) é determinado pela equação (7) conforme a ISO 2631-1 [44].

$$\mathbf{a}_{w} = \left[\frac{1}{T}\int_{0}^{T}\mathbf{a}_{w}^{2}(t)dt\right]^{\frac{1}{2}}$$
(7)

Onde,

- aw(t): aceleração ponderada em função do tempo;
- T: período de tempo em que a aceleração é medida.

O valor limite da aceleração rms é estabelecida pela multiplicação dos coeficientes da Tabela 5, em função do uso da estrutura, do período do dia e do tipo de vibração, a partir das curvas-base e da direção das acelerações, conforme visto na Figura 4.



Figura 4 - Direção das vibrações conforme ISO 2631-1 [44]

Deste modo, a vibração transmitida para o corpo é dada através das superfícies de apoio, ou seja, os pés, para uma pessoa de pé; pés, nádegas e costas, para uma pessoa sentada e as superfícies de apoio de uma pessoa recostada ou deitada. Além disso, vibração pode ser definida por três variáveis: a frequência (Hz), a aceleração máxima sofrida pelo corpo (m/s<sup>2</sup>) e a direção do movimento conforme a Figura 4, através de três eixos: x (das costas para frente), y (da direita para esquerda) e z (dos pés à cabeça)

Tabela 5 - Faixa dos fatores de multiplicação usados para magnitudes satisfatórias específicas de vibrações de edifícios com respeito à resposta [41]

		Fatores de multiplicação para a curva-base <sup>(a)</sup>		
Local	Tempo	Vibração contínua e intermitente <sup>(b)</sup>	Vibrações por excitação transiente com várias ocorrências ao dia	
Áreas de trabalho	Dia	1	1	
críticas (salas de operação de hospitais, laboratórios de precisão, etc.)	Noite	1	1 <sup>(c)</sup>	
Residências	Dia	2 a 4 <sup>(d)</sup>	30 a 90 <sup>(d), (e), (f)</sup>	
(apartamentos, casas e hospitais)	Noite	1,4	1,4 a 20	
Escritórios "silenciosos"	Dia	2	60 a 128 <sup>(g)</sup>	
(calmos)	Noite	2	60 a 128	
Escritórios em geral	Dia	4	60 a 128 <sup>(g)</sup>	
(escolas, etc.)	Noite	4	60 a 128	
Salões de conferências	Dia	8	90 a 128 <sup>(g)</sup>	
e oficinas	Noite	8	90 a 128	
NOTA 1: Para avaliar os efeitos de um sinal de vibração contendo dois ou mais componentes de freguência discretos, o método do valor médio a guarta potência ( <i>the root</i> -				

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-0,5T -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 5 - Curva base de vibrações de edifícios para aceleração (eixo z) [41]



Figura 6 - Curva base de vibrações de edifícios para aceleração (eixos x, y) [41]



Figura 7 - Curva base de vibrações de edifícios para aceleração em direção combinada (eixos x, y e z) [41]

Em situações onde a relação entre a aceleração de pico e a aceleração *rms* for maior que seis, a norma estabelece o uso de valor de dose de vibração (VDV) para avaliação do conforto humano, definido de acordo com a norma ISO 2631-1 [44], conforme visto na equação (8). Os valores limites para aceitabilidade sensorial em valor de dose de vibração são vistos na Tabela 6.

$$VDV = \left(\int_{0}^{T} (a_{w}(t))^{4} dt\right)^{\frac{1}{4}}$$
(8)

Onde:

- aw(t): aceleração ponderada em função do tempo;
- T: período de tempo em que a aceleração é medida.

Quanto a obtenção da resposta dinâmica em pisos submetidos a atividades humanas rítmicas, a norma ISO 10137 [41] recomenda a avaliação proposta por Murray et al. [48] e Wyatt [49].

Local e tempo	Baixa probabilidade de comentários adversos <sup>1</sup> (m/s <sup>1,75</sup> )	Possíveis comentários adversos (m/s <sup>1,75</sup> )	Prováveis comentários adversos <sup>2</sup> (m/s <sup>1,75</sup> )
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

Tabela 6 - Valor de dose de vibração para edifícios residenciais entre probabilidades de comentários adversos [41]

# 2.7 Outros critérios de conforto humano

Em seu projeto de pesquisa, Setareh [50] avaliou diferentes guias de projeto sob o ponto de vista de vibrações produzidas por atividades humanas, no que concerne a aceitabilidade das vibrações pelos usuários da estrutura. Baseado nisto, o autor propõe limites relacionados ao conforto humano. Ellis e Littler [51] também propuseram limites sob o ponto de vista do conforto humano baseado nos valores de dose de vibração (VDV), os valores propostos foram obtidos a partir de um extenso estudo. Os valores de tolerância propostos nos trabalhos podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 -	Tolerância	para	VDV
------------	------------	------	-----

Reação dos	VDV (m/s <sup>1,75</sup> )	VDV (m/s <sup>1,75</sup> )
usuários	Setareh [50]	Ellis e Littler [51]
Aceitável	< 0,50	< 0,66
Perturbador	0,50 a 3,5	0,66 a 2,38
Inaceitável	3,5 a 6,9	2,38 a 4,64
Pânico	> 6,9	> 4,64

# 3. CARACTERIZAÇÃO DAS ATIVIDADES HUMANAS RÍTMICAS

### 3.1 Considerações iniciais

As atividades humanas rítmicas são fonte de excitação com magnitude, direção e posição variável no tempo, isto é, são carregamentos dinâmicos, que são desconsiderados em grande parte dos projetos estruturais, por serem representados como majoração do carregamento. Sendo assim, mesmo atendendo o estado limite último (ELU), não leva em consideração o ponto de vista do estado limite de serviço (ELS) visando o conforto humano.

Deste modo, a representação da vibração proveniente de atividades humanas torna-se uma tarefa complexa se considerada apenas como carga estática, devido ao fato de que as características de cada indivíduo praticante da atividade influenciam diretamente na resposta dinâmica. Além disto, o tipo de atividade performada também tem influência direta na resposta uma vez que, atividades mais intensas onde o tempo de contato entre os pés dos indivíduos e o chão é menor, produz respostas diferentes de tempos de contato maiores. Estas atividades podem caracterizar-se como: caminhar, saltos, corridas, danças e atividades aeróbicas.

Ademais a modelagem da carga produzida por estas atividades é realizada de duas maneiras neste estudo: através dos modelos tradicionais de força-dura e através do uso de sistemas biodinâmicos. A primeira metodologia conhecida como "forçadura", consiste na aplicação direta da carga obtida das funções matemáticas representativas do carregamento sobre a estrutura. Por outro lado, o uso de sistemas biodinâmicos visa incorporar a interação entre o indivíduo e a estrutura durante a prática da atividade aeróbica através da representação de cada indivíduo por um sistema massa-mola-amortecedor.

Este capítulo visa caracterizar as atividades humanas rítmicas para então explanar quatro diferentes métodos de representação e modelagem do carregamento humano rítmico, presentes nos guias AISC [37] e SCI [40] e nos trabalhos de Faisca [52] e Campista [53], cujas metodologias foram utilizadas na avaliação do piso misto em estudo sob o ponto de vista do conforto humano.

# 3.2 Caracterização das atividades humanas rítmicas

As atividades rítmicas possuem a particularidade de alternância entre o contato dos pés do indivíduo e a perda do mesmo com a estrutura. Logo, por um curto período de tempo, o indivíduo encontra-se no ar e em outro instante, está em contato com a estrutura. A Figura 8 mostra os movimentos do corpo humano durante um salto.



Figura 8 - Movimentos do corpo durante um salto [52]

Tendo em vista na compreensão do movimento de um salto, é possível ilustrar o comportamento graficamente em termos de força e aceleração durante a prática da atividade, conforme a Figura 9 e Figura 10.



Figura 9 - Aceleração no domínio do tempo durante o salto [52]

Durante o instante em que o indivíduo permanece no ar, está submetido a uma aceleração de aproximadamente 9,81 m/s<sup>2</sup> e no momento em que toca a estrutura totalmente, atinge uma aceleração de aproximadamente 19 m/s<sup>2</sup>, conforme estudo de Faisca [52], visto na Figura 9. Quanto ao comportamento da força aplicada sobre a estrutura onde o indivíduo realiza o salto, a característica do movimento pode ser vista na Figura 10.



Figura 10 - Força no domínio do tempo durante um salto [52]

3.3 Modelo de carregamento proposto no Guia AISC (2016)

O modelo de carregamento proposto pelo guia de projeto AISC é caracterizado por uma série de Fourier que considera três harmônicos associados à frequência de excitação produzida pela ação das pessoas, bem como um coeficiente dinâmico para cada harmônico [37]. Uma série de Fourier trata-se do somatório de ondas senoidais e consiste em uma boa representação para previsão de respostas de ressonância. A determinação das forças produzidas por atividades humanas é representada por uma série de Fourier, conforme equação (9).

$$F(t) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i Qsen(2\pi f_{step} t - \phi_i)$$
(9)

Onde:

- F(t): função do carregamento dinâmico (N);
- N: número de harmônicos;
- Q: peso do indivíduo (N);
- fstep: frequência de excitação (Hz);
- i: número do harmônico;
- t: tempo (s);
- α<sub>i</sub>: coeficiente dinâmico para o i-ésimo harmônico;
- φ<sub>i</sub>: ângulo de fase para o i-ésimo harmônico.

O limite mais relevante a ser considerado na prevenção de problemas de vibrações estruturais devido a atividades humanas rítmicas, consiste na frequência fundamental natural da estrutura. Além disso, a determinação da função da carga relacionada a atividade e a transferência das vibrações nos locais onde as atividades são performadas são de extrema importância, tendo sido definido previamente [37]. A Tabela 8 apresenta os valores de frequência de excitação ( $f_{step}$ ), coeficientes dinâmicos ( $\alpha_i$ ) e ângulos de fase ( $\phi_i$ ) relacionados a diferentes tipos de atividades.

Atividade	Frequência de excitação	Coeficiente dinâmico	Ângulo de fase
	(Istep) - I IZ	(tti)	(ψι) - ταυ
Dança:			
Primeiro harmônico	1,5 a 2,7	0,5	-
Segundo harmônico	3 a 5,4	0,05	-
Aeróbica:			
Primeiro harmônico	2 a 2,75	1,5	-
Segundo harmônico	4 a 5,50	0,6	-
Terceiro harmônico	6 a 8,25	0,1	-

Tabela 8 - Parâmetros de	carregamento	dinâmico para	atividades	rítmicas	[37]

3.4 Modelo de carregamento proposto no Guia SCI (2009)

O guia SCI tem como característica principal a consideração do esforço de multidão sobre o piso quando submetido a atividades sincronizadas, como o caso de dança e atividades aeróbicas. Ellis e Ji [54] sugeriram a avaliação e consideração das seguintes faixas de frequência para estes tipos de atividades: 1,5 a 3,5 Hz para indivíduos e 1,5 a 2,8 Hz para grupos. Estas faixas de frequência também consideram o aumento na resposta devido a saltos, que são considerados a pior situação esperada quando são analisadas as cargas de multidão. A faixa de frequência sugerida para grupos é menor devido ao fato de altas frequências serem difíceis de serem mantidas por uma multidão de participantes [40].

O carregamento em função do tempo é representado por uma função semiseno, onde por um período possui uma resposta alta seguida de resposta nula, quando os pés estão fora do piso. A força transferida durante o impulso é caracterizada pela taxa de contato (ac), cuja definição é representada pela razão entre a duração do contato com o piso e o período da atividade. Para isso, cada atividade é representada por uma taxa de contato e quanto menor esta taxa, mais intensa é a atividade. A Figura 11 mostra o comportamento da função, conforme o guia SCI [40].



Figura 11 - Comportamento da carga em função do tempo para diferentes atividades [40]

No que concerne a determinação da carga dinâmica, o guia SCI expressa em termos de uma série de Fourier, de acordo com a equação (10). Visando a definição das cargas dinâmicas, os coeficientes de Fourier e os ângulos de fase da Tabela 9 devem ser adotados.

$$F(t) = Q \left\{ 1 + \sum_{h=1}^{h} \alpha_{h} \text{sen} \left[ 2h\pi f_{p} t + \phi_{h} \right] \right\}$$
(10)

Onde:

- F(t): função do carregamento dinâmico (N);
- Q: peso do indivíduo (N);
- h: número de termos de Fourier;
- α<sub>h:</sub> coeficiente de Fourier do h-ésimo harmônico;
- f<sub>p</sub>: frequência de excitação (Hz);
- $\phi_h$ : ângulo de fase do h-ésimo harmônico.

Tabela 9 - Coeficientes de Fourier e ângulos de fase para as ativida	ιdes [40]

Atividade Taxa de			Harmônicos		
Alividade	contato (ac)		<b>1</b> º	2º	3º
Aeróbica de baixo	2/2	αh	9/7	9/55	2/15
impacto	2/3	φh	-π/6	-5π/6	-π/2
Acrébico do alta imposto	ata 1/0	αh	π/2	2/3	0
Aerobica de alto impacto	1/2	φh	0	-π/2	0
Soltas a ventado 1/2		αh	9/5	9/7	2/3
Sallos a voltade	1/3	φh	π/6	-π/6	-π/2

Ao considerar análises no estado limite último, apenas os três primeiros harmônicos necessitam serem considerados. Além disso, os coeficientes de Fourier ( $\alpha_h$ ) apresentados na Tabela 9 são apropriados para pequenos grupos. Para grupos maiores, a falta de coordenação entre os participantes da atividade tende a diminuir os primeiros três coeficientes de Fourier [40]. Sendo assim, visando incluir esta falta de coordenação, estes devem ser substituídos por as equações (11) mantendo os ângulos de fase da tabela para saltos a vontade.

$$\begin{array}{c} \alpha_1 = 1,61 \cdot p^{-0,082} \\ \alpha_2 = 0,94 \cdot p^{-0,24} \\ \alpha_3 = 0,44 \cdot p^{-0,31} \end{array}$$
(11)

Onde p representa o número de participantes na atividade rítmica, variando entre 2 e 64 participantes. A Figura 12 representa esta tendência de redução do coeficiente de Fourier com o aumento de praticantes da atividade.



Figura 12 - Redução do coeficiente de Fourier em relação ao número de participantes [40]

## 3.5 Modelo de carregamento proposto por Faisca (2003)

Neste modelo de carregamento desenvolvido por Faisca [52] a partir de bases experimentais, sendo desenvolveu-se uma função de carregamento que tem como fundamento a função Hanning. Conforme visto na seção 3.2 deste capítulo, as atividades rítmicas são caracterizadas pela perda de contato entre o indivíduo e a estrutura, o que pode ser aproximado por uma função semi-seno, como pode ser visto na Figura 13, onde FDN significa força dinâmica normalizada, que é a relação entre a força dinâmica e a força estática.



Figura 13 - Função representativa de uma atividade com perda de contato [52]

No entanto, no desenvolvimento de sua pesquisa, Faisca identificou uma melhor representação por uma função Hanning do sinal medido experimentalmente [52]. A equação (12) representa a função matemática desenvolvida.

$$F(t) = CD\left\{K_{p}P\left[0, 5 - 0, 5\cos\left(\frac{2\pi}{T_{c}}t\right)\right]\right\} \rightarrow t \leq T_{c}$$

$$F(t) = 0 \rightarrow T_{c} \leq t \leq T$$
(12)

Onde:

- F(t): função do carregamento dinâmico (N);
- CD: coeficiente de defasagem;
- K<sub>p</sub>: coeficiente de impacto;
- P: peso do indivíduo (N);
- T: período fundamental da atividade (s);
- T<sub>c</sub>: período de contato da atividade (s);
- T: tempo (s).

No contexto dos parâmetros apresentados na função, o coeficiente de defasagem (CD) considera a falta de sincronismo entre os indivíduos praticantes da atividade, na aeróbica este comportamento que tende a estabilizar o coeficiente a partir de grupos com 10 indivíduos, conforme Figura 14.



Figura 14 - Coeficiente de defasagem para atividades humanas [52]

A Tabela 10 apresenta os valores dos parâmetros analíticos propostos por Faisca para o projeto de estruturas submetidas a atividades humanas, sendo período fundamental (T), período de contato (T<sub>c</sub>) e coeficiente de impacto (K<sub>p</sub>). Para atividades aeróbicas, o coeficiente de defasagem foi desenvolvido, ver Figura 13, seus valores podem ser obtidos na Tabela 11 relacionado ao número de praticantes.

Tabela 10 - Parâmetros analíticos para atividades humanas [52]

Atividade	T (s)	T <sub>c</sub> (s)	Kp
Saltos a vontade	0,44 ± 0,15	$0,32 \pm 0,09$	3,17 ± 0,58
Ginástica aeróbica	0,44 ± 0,09	$0,34 \pm 0,09$	$2,78 \pm 0,60$
Show/torcida	0,37 ± 0,03	$0,33 \pm 0,09$	2,41 ± 0,51

Número de pessoas	CD analítico
5	0,99 ± 0,14
12	$0,95 \pm 0,09$
16	$0,95 \pm 0,06$
20	$0,94 \pm 0,04$
48	$0,92 \pm 0,04$
64	0,91 ± 0,02

Tabela 11 - Coeficiente de defasagem em relação ao número de pessoas [52]

3.6 Modelo biodinâmico proposto por Campista (2019)

O modelo desenvolvido por Campista [53] envolve o uso de um sistema biodinâmico do tipo "massa-mola-amortecedor" com um grau de liberdade (S1GL) com o objetivo de representar de maneira mais realista as ações humanas sobre uma estrutura. A partir deste objetivo, o modelo foi desenvolvido através da combinação de testes experimentais e a resolução de um problema de otimização.

Deste modo, obtêm-se os valores de força, aceleração, velocidade e deslocamento a partir das campanhas de testes experimentais desenvolvidos por Campista [53]. Por outro lado, as características dinâmicas do modelo biodinâmico, ou seja, rigidez (k<sub>i</sub>) e amortecimento (c<sub>i</sub>) do indivíduo foram determinadas a partir da resolução de um problema clássico de otimização, com base no uso do algoritmo genético (AG) via MATLAB [53]. Em relação a massa do indivíduo (m<sub>i</sub>), considerou-se a massa determinada através da pesagem durante os testes experimentais. Observase que a Figura 15 representa a interação ser humano-estrutura como o próprio indivíduo. Identifica-se, ainda, os parâmetros obtidos a partir da série de testes e desenvolvidos a partir da solução do problema de otimização.



Figura 15 - Representação da modelagem do sistema biodinâmico [53]

No que tange a utilização do modelo envolvendo os sistemas biodinâmicos visando a determinação das características dinâmicas dos praticantes da atividade aeróbica, é necessária a resolução da equação de equilíbrio dinâmico, conforme equação (13). Cabe ressaltar que a rigidez e o amortecimento foram determinados a partir do emprego das equações (14) e (15).

$$F_{i}(t) = k_{i}x_{i}(t) + c_{i}v_{i}(t) + m_{i}a_{i}(t)$$
(13)

$$k_i = 4\pi^2 f_i^2 m_i \tag{14}$$

$$\mathbf{c}_{i} = 4\pi \mathbf{m}_{i} \boldsymbol{\xi} \mathbf{f}_{i} \tag{15}$$

Onde:

- ki: rigidez do indivíduo i (N/m);
- ci: amortecimento do indivíduo i (Ns/m);
- mi: massa do indivíduo i (kg);
- x<sub>i</sub>: deslocamento do indivíduo (m);
- vi: velocidade do indivíduo (m/s);
- ai: aceleração do indivíduo (m/s<sup>2</sup>);
- f<sub>i</sub>: força do indivíduo;
- ξ: taxa de amortecimento modal.

É importante ressaltar que o modelo biodinâmico [53] foi comprovado a partir da comparação entre o resultado obtido experimentalmente e o resultado calculado numericamente. Primeiramente, foram aplicados os sinais no domínio do tempo referentes à aceleração, velocidade e deslocamento obtidos experimentalmente e em seguida a força experimental, com objetivo de simular os testes experimentais de forma numérica através do emprego do programa computacional ANSYS. Os resultados obtidos para o ensaio simulado referente a uma pessoa apresentaram excelente correlação entre as acelerações experimentais e numéricas no domínio do tempo e da frequência, validando o modelo biodinâmico, conforme Figura 16.



Figura 16 - Validação do modelo biodinâmico proposto [53]

Em contra partida aos modelos tradicionais conhecidos como modelos de "força-dura", onde a carga é aplicada diretamente sobre a estrutura, o modelo biodinâmico incorpora as características dinâmicas dos indivíduos, produzindo o sistema de interação humano-estrutura. A Figura 17 demonstra de forma comparativa a diferença entre os modelos.



Figura 17 - Comparativo entre o modelo biodinâmico e o modelo de força-dura

# 4. MODELO ESTRUTURAL E INVESTIGAÇÃO DAS CARGAS DINÂMICAS

#### 4.1 Considerações iniciais

No presente capítulo, são caracterizados os aspectos do projeto estrutural referente ao piso misto investigado, no qual sua utilização destina-se a viabilizar uma área para a prática de atividades humana rítmicas. Além disso são apresentados o posicionamento das cargas dinâmicas na estrutura e as seções investigadas para obtenção das respostas.

### 4.2 Caracterização do modelo estrutural

O sistema estrutural investigado consiste em um piso misto (aço-concreto), composto por uma laje de concreto armado sobre vigas (principais e secundárias), e pilares de perfis metálicos, que proporcionam interação total entre si e a estrutura. O piso possui dimensões totais de 40 m x 40 m, perfazendo uma área de 1.600 m<sup>2</sup>, composta por 16 painéis com dimensões de 10 m x 10 m, e pilares com pé-direito de 4 m que situam-se nas extremidades dos painéis. A visualização da vista superior e a seção transversal do painel, respectivamente, é ilustrada na Figura 18.

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 12 exibe as propriedades geométricas dos perfis utilizados e na Figura 19 é ilustrada a seção genérica destes perfis.

Em relação às propriedades físicas, os perfis metálicos utilizados no modelo são constituídos por um aço com tensão de escoamento ( $f_y$ ) de 345 MPa e módulo de elasticidade ( $E_s$ ) de 205 GPa, coeficiente de Poisson (v) igual a 0,3 e peso específico ( $\gamma_s$ ) de 78,5kN/m<sup>3</sup>. O concreto utilizado possui resistência à compressão ( $f_{ck}$ ) igual a 26 MPa, módulo de elasticidade ( $E_{cs}$ ) igual a 31,7 GPa, coeficiente de Poisson (v)

igual a 0,2 e peso específico ( $\gamma_c$ ) de 25 kN/m<sup>3</sup>. É importante notar que a estrutura atende aos critérios de dimensionamento no estado limite último (ELU) segundo a NBR 8800 [46].



b) Vista lateral do piso misto (aço-concreto)



c) Perspectiva do modelo estrutural

Figura 18 - Sistema estrutural do piso misto (aço-concreto). Dimensões em m.

Tipo de perfil	Altura (d)	Largura da mesa (bf)	Espessura da mesa superior (tf)	Espessura da mesa superior (ti)	Espessura da alma (tw)
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

Tabela 12 - Propriedades geométricas dos perfis



Figura 19 - Seção genérica dos perfis metálicos

## 4.3 Posicionamento do carregamento dinâmico

Com o objetivo de simular o comportamento dinâmico da atividade humana rítmica tal como ocorre usualmente em academias de ginástica, foram distribuídos carregamentos correspondentes a vinte (20), quarenta e oito (48) e sessenta e quatro (64) pessoas distribuídas em quatro áreas (planos de laje 10 x 10 m) com diferentes localizações na laje do piso misto (aço-concreto), gerando doze modelos de carregamento (MC), conforme Figura 20.

Assim sendo, é possível verificar a influência da localização do carregamento humano rítmico na resposta dinâmica do piso. As seções analisadas foram escolhidas com base nos modos de vibração do piso e são descritas pelas letras de "A" a "I" (Figura 22 a Figura 27).



Figura 20 - Nove disposições do carregamento analisado. Dimensões em m.

A modelagem da carga dinâmica foi desenvolvida a partir de doze carregamentos que se diferem em número de indivíduos e posicionamento das cargas. Desse modo, foram posicionadas vinte (20), quarenta e oito (48) e sessenta e quatro (64) pessoas, igualmente distribuídas em quatro planos de laje subsequentes de cinco (5), doze (12) e dezesseis (16) pessoas.

Como exemplo, as Figuras 21a, 22a e 23a ilustram o posicionamento dos participantes da atividade em um plano de laje, para cada uma das situações de carregamento. Além disso, foi determinado o peso de cada pessoa igual a 800N (0,800 kN) nos modelos tradicionais (força-dura) de representação do carregamento dinâmico.

As simulações das doze situações de carregamento, são analisadas conforme a modelagem da carga dinâmica, de acordo com os modelos tradicionais de "forçadura" e com o modelo biodinâmico, que visa incorporar as características dinâmicas dos participantes da atividade rítmica. A partir da Figura 21 a Figura 23 são vistos os modelos de carregamento (MC-I a MC-XII), no qual respeitou-se uma taxa de ocupação de 0,25 pessoas/m<sup>2</sup> [5]

Deste modo, a partir deste estudo, pode-se verificar a influência da variação do número de pessoas, bem como do posicionamento das cargas na resposta dinâmica do piso misto.



a) Detalhamento da carga dinâmica por plano de laje.



b) Modelo de carregamento I (MC-I).





c) Modelo de carregamento II (MC-II).



d) Modelo de carregamento III (MC-III).

e) Modelo de carregamento IV (MC-IV).

Figura 21 - Modelos de carregamento I a IV. Dimensões em m.



a) Detalhamento da carga dinâmica por plano de laje.



b) Modelo de carregamento V (MC-V).

•••	•••	•••	•••	_
•••	•••			40
		0		

d) Modelo de carregamento VII (MC-VII).



c) Modelo de carregamento VI (MC-VI).



e) Modelo de carregamento VIII (MC-VIII).

Figura 22 - Modelos de carregamento V a VIII. Dimensões em m.



a) Detalhamento da carga dinâmica por plano de laje.



d) Modelo de carregamento IX (MC-IX)



d) Modelo de carregamento XI (MC-XI)



d) Modelo de carregamento X (MC-X)



d) Modelo de carregamento XII (MC-XII)

Figura 23 - Modelos de carregamento IX a XII. Dimensões em m.

## 5. MODELAGEM NUMÉRICA DO PISO MISTO (AÇO-CONCRETO)

#### 5.1 Considerações iniciais

No capítulo quatro, foram apresentadas todas as propriedades referentes ao sistema estrutural do piso misto (aço-concreto). A partir destas características foi desenvolvido o modelo numérico-computacional, bem como a representação do comportamento estrutural do piso em estudo, onde foram empregas as técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, a partir do emprego do software ANSYS [55].

## 5.2 Modelo numérico-computacional

Na elaboração do modelo computacional do piso misto investigado, onde foram empregadas as técnicas usuais de discretização presente no método dos elementos finitos implementadas por meio do emprego do programa ANSYS [55]. Desse modo, considerou-se que os materiais aço e concreto apresentam um comportamento linearelástico, e que as seções estruturais permanecem planas no estado deformado. Destaca-se, ainda, que a interação completa entre laje de concreto e as vigas de aço foi considerada ao longo das análises, ou seja, os nós entre as vigas de aço e as lajes de concreto são acoplados de maneira a impedir a ocorrência de quaisquer deslizamentos.

Na modelagem das vigas e colunas de aço, o elemento definido para representação foi o BEAM44 e para a modelagem da laje de concreto foi utilizado o elemento de casca SHELL63. As ligações viga-viga e viga-coluna foram modeladas pelo emprego do elemento COMBIN7 e COMBIN39, respectivamente. Finalmente, utilizou-se o elemento COMBIN40 para simular as características dinâmicas do ser humano presentes no piso misto. A Figura 24 mostra o modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto).



Figura 24 - Modelo em elementos finitos do piso misto (aço-concreto)

Em relação a discretização da malha de elementos finitos, foi adotado para este trabalho de pesquisa o tamanho aproximado de 0,25 m (25 cm). Portanto, o modelo numérico computacional desenvolvido possui um grau de refinamento adequado, possibilitando uma boa representação do comportamento estrutural. A Tabela 13 detalha as características do modelo desenvolvido para este trabalho de pesquisa.

Desc	Quantidade	
Elementos	BEAM44	3.920
	SHELL63	25.600
	Total	29.520
N	29.874	
Graus de	167.069	

Tabela 13 - Características do modelo de elementos finitos do piso misto

5.3 Elemento finito de viga tridimensional - BEAM44

O elemento BEAM44 [55], apresentado na Figura 25, representa um elemento uniaxial com propriedades de esforços de tensão, compressão, torsão e flexão. Este elemento possui seis graus de liberdade por nó, sendo divididos em três translações e três rotações nos eixos x, y e z.

Além disso, compreende a capacidade de suprir geometrias assimétricas em cada lado do elemento e permite que o nó final esteja deslocado do centroide da viga, o que torna possível garantir a compatibilidade entre as deformações entre os nós dos elementos de viga e casca [55].



Figura 25 - Características geométricas do elemento BEAM44 [55]

### 5.4 Elemento finito de casca - SHELL63

A fim de representar a laje de concreto, o elemento de casca definido foi o SHELL63 [55]. Este é um elemento de membrana elástica estrutural tridimensional com capacidade de flexão e membrana, onde é permitida a aplicação de cargas no plano ou normais ao mesmo. O elemento possui seis graus de liberdade em cada nó, sendo divididos em três translações e três rotações nas direções x, y e z, conforme visto na Figura 26.



Figura 26 - Características geométricas do elemento SHELL63 [55]

5.5 Elemento finito - COMBIN7

O elemento COMBIN7 [55] 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 27, 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.



Figura 27 - Características geométricas do elemento COMBIN7 [55]
O elemento COMBIN39 [55] possui capacidade de força-deflexão generalizada que pode ser usado em qualquer análise. Além disso, apresenta grande capacidade de torção longitudinal com até três graus de liberdade em cada nó, conforme a ilustração da Figura 28.





# 5.7 Elemento finito - COMBIN40

O COMBIN 40 [55] é um elemento composto por massa, mola e amortecedor. Além disso, o elemento é definido por dois nós e possui apenas um grau de liberdade em cada nó, podendo ser uma translação, ou uma rotação ou ainda a pressão ou a temperatura nodal. A Figura 29 representa o elemento.





# 5.8 Hipóteses simplificadoras

O modelo em elementos finitos desenvolvido para a representação do piso misto (aço-concreto) adotou, para a elaboração deste estudo, as seguintes hipóteses simplificadoras:

- As seções transversais permanecem planas após as solicitações de carregamento e perpendiculares ao eixo deformado (hipótese de Bernoulli);
- Os materiais (aço-concreto) trabalham no regime elástico-linear e apresentam isotropia;
- 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 relativa à rotação e às 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.

5.9 Modelagem do amortecimento estrutural

O amortecimento é definido como um processo de dissipação de energia de uma estrutura submetida a um movimento vibratório. No entanto, sua definição não é uma tarefa fácil, uma vez que não é possível determinar esta característica apenas analisando os fatores geométricos da estrutura ou o amortecimento dos materiais empregados [56].

A avaliação prática do amortecimento é inviável, devido a impossibilidade de medi-lo experimentalmente com precisão pois as propriedades de amortecimento dos materiais não são bem definidas o suficiente para permitir esta aproximação, assim como o fato de grande parte do amortecimento estrutural estar associado às ligações e elementos não estruturais, conforme afirma Craig Jr [57]. Logo, é comum associar o amortecimento de uma estrutura ao sistema estrutural e não a elementos individuais.

De acordo com Clough e Penzien [58], o método dos elementos finitos pode ser utilizado para estimar a taxa de amortecimento da estrutura a partir do processo de superposição modal, não sendo necessário determinar formalmente a matriz de amortecimento.

No entanto, em alguns casos a matriz de amortecimento é necessária para obtenção da resposta dinâmica, como o caso da análise dinâmica transiente através do método de integração numérica de Newmark [59]. Com base nestes casos, Clough e Penzien [58] recomendam avaliar a matriz de amortecimento proporcional, que leva em conta a contribuição das matrizes de massa e rigidez da estrutura.

Esta matriz é chamada de matriz de amortecimento de Rayleigh, que possui duas principais parcelas, uma referente a contribuição da matriz de massa ( $\alpha$ ) e outra à da matriz de rigidez ( $\beta$ ), conforme equação (16), onde [M] define a matriz de massa e [K] define a matriz de rigidez do sistema, de acordo com Clough e Penzien [58].

$$\mathbf{C} = \alpha \cdot [\mathbf{M}] + \beta \cdot [\mathbf{K}] \tag{16}$$

A equação (16) pode ser reescrita relacionando a taxa de amortecimento modal e a frequência natural circular, sendo definida pela equação (17):

$$\xi_{i} = \frac{\alpha}{2 \cdot \omega_{0i}} + \frac{\beta \cdot \omega_{0i}}{2}$$
(17)

Isolando os coeficientes de contribuição de massa e rigidez da equação (17),  $\alpha$  e  $\beta$ , obtemos as equações (18) e (19) levando em consideração as duas frequências mais importantes ( $\omega_{01}$  e  $\omega_{02}$ ).

$$\alpha = 2 \cdot \xi_i \cdot \omega_{01} - \beta \cdot \omega_{01} \cdot \omega_{01} \tag{18}$$

$$\beta = \frac{2 \cdot (\xi_2 \cdot \omega_{02} - \xi_1 \cdot \omega_{01})}{\omega_{02} \cdot \omega_{02} - \omega_{01} \cdot \omega_{01}}$$
(19)

A partir das duas frequências mais importantes se torna possível determinar os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ . A primeira frequência é chamada de frequência fundamental e

consiste na menor frequência da estrutura, sendo a  $\omega_{02}$  a segunda mais importante na determinação do amortecimento. As deduções para determinação do amortecimento de Rayleigh encontram-se em Clough e Penzien [58] e em Craig Jr. [57].

Diante do exposto, é necessário obter a taxa de amortecimento ( $\xi$ ) adequada ao sistema em estudo. A literatura apresenta diversas maneiras de abordagem quanto a recomendação das taxas de amortecimento seguras. Além disso, conforme a ISO 10137 [41], a taxa de amortecimento para pisos depende do tipo de construção, presença de elementos não estruturais, amplitude e frequência da vibração, entre outros fatores. Os valores típicos adotados para o primeiro modo de pisos mistos são expostos na Tabela B.2 presente na norma ISO 10137 (2007, p. 29) [41].

Considerando o guia SCI [40], os sistemas estruturais apresentam a taxa de amortecimento na ordem de 1%. No entanto, taxas específicas para diferentes tipos de pisos são apresentadas no guia de projeto, incluindo o valor apresentado como geral ( $\xi = 1$ %). Esta taxa está relacionada à estrutura em fase preliminar de projeto, que embora não reflita o uso final é considerada útil para determinação do comportamento do piso nesta fase, conforme relatado no guia [40]. A partir do exposto, foi definida a taxa de amortecimento estrutural para o piso misto em estudo como 1% ( $\xi = 0,01$ ).

A Tabela 14 apresenta os parâmetros  $\alpha \in \beta$  utilizados na modelagem do amortecimento estrutural nas análises de vibração forçada, a partir da implementação do método dos elementos finitos.

Frequênc	ias em Hz	Frequência	a em rad/s	Parâmetros Rayleigh			
f <sub>01</sub>	f <sub>02</sub>	<b>W</b> 01	ω02	α	β		
6,21	6,51	39,03	40,93	0,399620932	0,000250096		

Tabela 14 - Parâmetros utilizados no amortecimento de Rayleigh

# 6. ANÁLISE ESTRUTURAL

## 6.1 Generalidades

As análises numéricas desenvolvidas neste capítulo foram elaboradas com base no modelo estrutural exposto no capítulo 4 e no modelo numérico computacional descrito no capítulo 5 [55]. É relevante mencionar o fato de que a estrutura foi dimensionada previamente conforme normas brasileiras e atende a todos os limites no estado de limite último (ELU) e no estado de limite de serviço (ELS), portanto não será incluída a análise estática neste estudo.

6.2 Análise modal

Por meio da análise de vibração livre, onde é possível identificar como a estrutura responderá ao carregamento atuante [60] são obtidas as dez primeiras frequências naturais da estrutura (autovalores), seus respectivos modos de vibração (autovetores) e as características modais da estrutura em estudo, conforme apresentado na Tabela 15 e na Figura 30 a Figura 39.

<b>T</b> I I	4 -					
ISPAIS	15 -	( 'aractaricticae	modale	AU	nico	mieto
Iavela	10 -	Valaciensiicas	mouais	uu	0130	1111310

Fre	quências	Período	Massa modal	Rigidez	Amortecimento
	(Hz)	natural (s)	(kg)	modal (N/s)	modal (Ns/m)
<b>f</b> 01	6,21	0,16	118.896,06	1,81 x 10 <sup>8</sup>	9,28 x 10 <sup>4</sup>
f <sub>02</sub>	6,51	0,15	90.656,22	1,52 x 10 <sup>8</sup>	7,42 x 10 <sup>4</sup>
f <sub>03</sub>	6,60	0,15	73.780,97	1,27 x 10 <sup>8</sup>	6,12 x 10 <sup>4</sup>
f <sub>04</sub>	6,81	0,15	52.552,65	9,62 x 10 <sup>7</sup>	4,51 x 10 <sup>4</sup>
f05	7,07	0,14	62.172,95	1,23 x 10 <sup>8</sup>	5,55 x 10 <sup>4</sup>
f <sub>06</sub>	7,19	0,14	59.858,58	1,22 x 10 <sup>8</sup>	5,45 x 10 <sup>4</sup>
<b>f</b> 07	7,24	0,14	72.787,63	1,51 x 10 <sup>8</sup>	6,68 x 10 <sup>4</sup>
f08	7,26	0,14	60.860,95	1,27 x 10 <sup>8</sup>	5,61 x 10 <sup>4</sup>
f09	7,29	0,14	50.076,66	1,05 x 10 <sup>8</sup>	4,63 x 10 <sup>4</sup>
<b>f</b> 10	7,40	0,14	44.923,82	9,73 x 10 <sup>7</sup>	4,23 x 10 <sup>4</sup>



Figura 30 -  $1^{\circ}$  modo:  $f_{01} = 6,21$  Hz [55]

















Figura 38 -  $9^{\circ}$  modo:  $f_{09} = 7,29$  Hz [55]



Por meio da obtenção dos autovalores e autovetores a partir da análise modal, as dez primeiras frequências do piso misto (aço-concreto), variando de 6,21 Hz a 7,40 Hz conforme vistas na Tabela 15, encontram-se próximas da faixa de frequência de excitação equivalente ao terceiro harmônico de atividades aeróbicas, cuja variação é de 5,66 a 8,57 Hz segundo Faisca [52] e 4,5 a 8,4 Hz de acordo com Ellis e Ji [54].

No contexto de aproximação ou equivalência entre a frequência de excitação e uma das frequências do piso, o fato relacionado às frequências naturais se encontrarem nesta faixa pode conduzir a estrutura a um estado de ressonância, resultando em vibrações excessivas e desconforto aos usuários do piso misto. Alguns valores mínimos para a frequência natural fundamental da estrutura são apresentados conforme Tabela 16, de acordo com três normas de projeto [37][38][46], visando recomendar um valor referência para o uso de uma estrutura para atividades aeróbicas.

Norma / Guia de projeto	Atividade	Frequência fundamental mínima recomendada (Hz)
NBR 8800 (2008) [46]	Ginástica aeróbica	8
NBR 6118 (2014) [38]	Ginásio de esportes	9,6
AISC (2016) [37]	Ginástica aeróbica para pisos leves	9,2

Tabela 16 - Frequências fundamentais mínimas para prática de atividade rítmica

Com base nos valores das frequências mínimas apresentados na Tabela 16, percebe-se que a frequência fundamental do piso ( $f_{01} = 6,21$  Hz), assim como as outras sete frequências seguintes apresentadas na Tabela encontram-se abaixo dos valores mínimos recomendados nas normas brasileiras e no guia de projeto AISC. Consequentemente, é possível identificar através da análise modal realizada no piso em estudo uma forte tendência de que o mesmo apresente problemas relacionados a vibrações excessivas e deste modo, desconforto aos praticantes da atividade rítmica e usuários da estrutura. Esta situação reforça a tendência de vibrações incômodas citada em parágrafos anteriores, onde identificamos a proximidade das frequências naturais com a faixa de frequência de excitação do terceiro harmônico para prática de atividades rítmicas aeróbicas.

#### 6.3 Análise harmônica

A finalidade desta análise é avaliar os modos de vibração que possuem a maior contribuição na resposta dinâmica estrutural. Deste modo, foi aplicado na estrutura em estudo um carregamento variando harmonicamente no tempo a fim de obter-se os resultados dos deslocamentos nodais em termos de frequência. Diante do cenário exposto, uma carga senoidal de 800N (0,800 kN) (equivalente ao peso de uma pessoa) foi aplicada nos pontos de maior amplitude modal da estrutura (seções A e F devido a simetria da estrutura). Esta análise foi realizada com a frequência variando entre 0 e 10 Hz com um intervalo de integração de 0,01 considerando a contribuição da taxa de amortecimento estrutural de 1% [40].

Em seguida, a Figura 40 apresenta o espectro de resposta do piso misto, onde verifica-se a existência de quatro picos de resposta bem definidos coincidentes com a terceira, quinta, sexta e décima frequência natural do piso misto em estudo, possuindo a maior amplitude de deslocamento no primeiro pico de resposta (f<sub>03</sub> = 6,60 Hz). Desta forma, é necessário ter maior atenção nesta frequência, uma vez que os maiores picos se encontram em uma faixa de frequência onde existe uma tendência de vibrações excessivas devido a atividades rítmicas humanas.



Figura 40 - Análise harmônica do piso misto (aço-concreto)

#### 6.4 Análise de vibração forçada

Esta seção dispõe os resultados calculados por meio de análises dinâmicas de vibração forçada com base no emprego método de integração direta de Newmark [59] (análise transiente), tendo como base o modelo estrutural definido no Capítulo 4 do piso misto (aço-concreto). Deste modo, estas análises possuem o objetivo de avaliar o comportamento estrutural e o conforto humano no sistema estrutural estudado, quando submetido a ações humanas rítmicas.

Neste contexto, o carregamento dinâmico descrito no item 4.3, referente a vinte, quarenta e oito e sessenta e quatro pessoas praticando atividades aeróbicas foi aplicado no piso misto, onde foi levado em conta as localizações descritas no mesmo item (MC-I ao MC-XII).

É importante destacar que a modelagem da carga dinâmica referente a cada indivíduo é representada nos guias AISC [37], SCI [38] e no trabalho de Faisca [52] e Campista [53], onde os três primeiros representam a modelagem tradicional do carregamento (força-dura) e o último representa a biodinâmica, onde são incluídas a contribuição das características dinâmicas das pessoas, conforme visto no Capítulo 3.

Desse modo, após o desenvolvimento das análises dinâmicas de vibração forçada, são obtidas as respostas dinâmicas em termos de aceleração de pico (a<sub>p</sub>), aceleração rms (a<sub>w,rms</sub>) e valores de dose de vibração (VDV) com objetivo de comparar com os valores limites para a avaliação do conforto humano.

Com o objetivo de investigar a resposta dinâmica, relacionada ao posicionamento da carga dinâmica, e aferir o conforto humano foram considerados seis casos, onde a carga dinâmica aplicada permanece a mesma, sendo modificada sua localização no piso misto, conforme visto no item 4.3.

### 6.4.1 Cargas dinâmicas

A modelagem das cargas dinâmicas foi realizada tendo como base o Capítulo 3. Além disso, a análise dinâmica transiente foi realizada através do software computacional ANSYS [55], a partir da utilização do método de integração direta de Newmark [59]. A frequência de excitação utilizada foi 2,20 Hz, o tempo total de cada análise foi de 10s, e o intervalo de integração foi de 0,002 s.

Os parâmetros utilizados para representação da carga dinâmica nos modelos tradicionais são vistos conforme Tabela 17. Com referência aos guias de projeto AISC [37] e SCI [40] considera-se a frequência do passo representada por f<sub>step</sub> e f<sub>p</sub>, respectivamente. O peso do indivíduo é representando por Q, q e P, conforme os guias de projeto em estudo (AISC [37], SCI [40] e Faisca [52]), nesta ordem.

Em relação ao o guia de projeto SCI [40] faz-se necessário determinar o número de pessoas praticando a atividade aeróbica, sendo representado pela letra p, que neste estudo foi considerado, primeiramente vinte pessoas (20), em seguida quarenta e oito pessoas (48) e por fim sessenta e quatro (64). Todavia, para o modelo desenvolvido por Faisca [52], temos os parâmetros de período natural (T), período de contato (T<sub>c</sub>), coeficiente de impacto (K<sub>p</sub>) e coeficiente de defasagem (CD), este último foi utilizado em valor fixo, para todas as modelagens de carga.

AISC [37]		SCI [40]		Faisca [52]
$f_{step} = 2,20 \text{ Hz}$	20 pessoas	48 pessoas	64 pessoas	T = 0,45 s
Q = 800 N	$f_p = 2,20 \text{ Hz}$ q = 800  N	$f_p = 2,20 \text{ Hz}$ $\alpha = 800 \text{ N}$	$f_p = 2,20 \text{ Hz}$ q = 800  N	T <sub>c</sub> = 0,34 s P = 800 N
	p = 20	p = 48	p = 64	$K_p = 2,78$ CD = 0,95

Tabela 17 - Parâmetros de representação tradicional para a carga dinâmica

Tendo em mente os parâmetros investigados conforme Tabela 17, para atividades rítmicas aeróbicas onde a representação da carga é a de força-dura (AISC

[37], SCI [40] e Faisca [52]), foi obtida a carga dinâmica representada por um indivíduo, conforme as Figuras 41, 42 e 43, respectivamente. A fim de fornecer uma melhor visualização do pico de força na frequência de excitação analisada, as figuras representativas das forças no domínio da frequência iniciam em 1 Hz. Com relação ao modelo SCI [40] foi ilustrado na Figura 43 o caso de carregamento para vinte (20) pessoas, em relação aos outros casos de carregamento, os gráficos encontram-se no Anexo 1.



a) Domínio do tempo













Em relação ao modelo biodinâmico, as cargas dinâmicas foram inseridas conforme o proposto por Campista [53]. O Figura 44 apresenta a variação da carga dinâmica no domínio do tempo e da frequência de uma pessoa participante da atividade aeróbica, com as seguintes características: m<sub>i</sub> = 92,70 Kg; c<sub>i</sub> = 820,94 Ns/m e k<sub>i</sub> = 42.812,81 N/m. É importante mencionar a natureza do sistema biodinâmico, que envolve além da força, a aceleração, velocidade e o deslocamento. As características dinâmicas das sessenta e quatro pessoas praticantes da atividade aeróbica analisada encontram-se no Anexo 2, enfatizando que a massa foi obtida através da pesagem do indivíduo nos ensaios experimentais e a rigidez e o amortecimento foram calculados através da resolução de um problema clássico de otimização via algoritmos genéticos.



Figura 44 - Carga dinâmica do sistema biodinâmico [53]

Nas próximas seções, são expostos os resultados alçados neste estudo referente aos doze modelos (MC-I a MC-XII) de carregamento propostos. Desse modo, é possível visualizar as seguintes respostas dinâmicas: aceleração de pico (a<sub>p</sub>), valor de dose de vibração (VDV) e aceleração rms (a<sub>w,rms</sub>).

A metodologia de apresentação dos resultados para os doze casos de localização da carga dinâmica (modelos de carregamento ou MC), será primeiramente a descrição da aplicação da carga no piso, por meio de ilustrações. Logo, as respostas para o deslocamento e a aceleração da seção estrutural (SE), são apresentadas no domínio do tempo e da frequência para os quatro modelos de carregamento estudados: AISC [37], SCI [40], Faisca [52] e biodinâmico [53], sendo representados através das cores vermelho, azul, verde e amarelo, respectivamente. Seguinte a isto, uma tabela é apresentada a fim de resumir as respostas dinâmicas (a<sub>p</sub>, a<sub>w,rms</sub> e VDV) para cada seção estrutural.

#### 6.4.2 Modelos de carregamento de l a IV - 20 pessoas

Nesta seção são apresentados os resultados para os modelos de carregamento submetidos a carga total de 20 pessoas, divididas em quatro planos de laje consecutivos, ou seja, 5 pessoas em cada quatro áreas de 10 x 10 m. As situações de carregamento foram estruturadas para situarem-se na direção Z, como nos modelos MC-I e MC-II, quanto na direção X representado pelos modelos MC-III e MC-IV.

#### 6.4.2.1 Modelo de carregamento I (MC-I)

Na sequência do trabalho são apresentadas figuras contendo os pontos de aplicação das cargas para o modelo de carregamento I (MC-I), uma ilustração do sistema estrutural do piso em 3D (Figura 45a) e em planta (Figura 45b), assim como as seções analisadas (A a I), representada pelos pontos em vermelho. Além disso, vale ressaltar que nos pontos A e F a aplicação da carga coincide com os pontos analisados. Em continuidade, as Figuras 46 a 53 apresentam os gráficos dos deslocamentos e acelerações, no domínio do tempo e da frequência, sobre seção estrutural A, para cada modelo de carga dinâmica utilizado para representação das pessoas. Em seguida, a Tabela 18 apresenta todos os valores com referência aos resultados calculados para o modelo de carregamento (MC-I).



Figura 45 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-I





Figura 53 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-I

	AISC [37]				SCI [4	0]	Faisca [52]			Biodinâmico [53]		
SE	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w</sub> , <sub>rms</sub>	VDV	ap	aw,rms	VDV	ap	aw,rms	VDV
	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>
Α	0,70	0,24	0,42	0,85	0,33	0,71	0,25	0,12	0,26	0,10	0,04	0,05
В	0,37	0,12	0,22	0,48	0,16	0,40	0,14	0,06	0,15	0,08	0,03	0,03
С	0,37	0,13	0,31	0,48	0,19	0,39	0,14	0,06	0,15	0,08	0,03	0,03
D	0,62	0,20	0,35	0,67	0,26	0,56	0,17	0,08	0,18	0,03	0,01	0,03
Е	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,04	0,02	0,03
F	0,72	0,27	0,79	0,85	0,33	0,71	0,25	0,12	0,26	0,10	0,04	0,05
G	0,07	0,03	0,04	0,08	0,03	0,07	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
Н	0,07	0,02	0,05	0,08	0,03	0,07	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
Ι	0,62	0,22	0,69	0,67	0,26	0,56	0,17	0,08	0,18	0,03	0,01	0,03

Tabela 18 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-I

A partir da Tabela 18 observa-se que os efeitos dinâmicos máximos, para o MC-I, ocorreram sobre a seção A. Além disso, a diferença mais expressiva encontrada nesta investigação diz respeito ao modelo de carregamento dinâmico SCI [40], [seção A:  $a_p = 0.85 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0.33 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0.71 m/s<sup>1,75</sup> (SCI)]. Para fins comparativos, o modelo biodinâmico produziu efeitos de nível menor [seção A:  $a_p = 0.10 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0.04 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0.05 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)] devido a incorporação das características dinâmicas dos indivíduos e suas respectivas localizações.

## 6.4.2.2 Modelo de carregamento II (MC-II)

Nesta sessão são apresentadas figuras contendo os pontos de aplicação das cargas para o modelo de carregamento II (MC-II), uma ilustração do sistema estrutural do piso em 3D (Figura 54a) e em planta (Figura 54b), assim como as seções analisadas (A a I), representada pelos pontos em vermelho. Além disso, vale ressaltar que nos pontos B e G a aplicação da carga coincide com os pontos analisados. Na sequência a Tabela 19 apresenta todos os valores com referência aos resultados calculados para o modelo de carregamento (MC-II). As figuras dos gráficos apresentando os deslocamentos e acelerações, no domínio do tempo e da frequência, sobre a seção estrutural B podem ser encontrados no Anexo 3.



Figura 54 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-II

	AISC [37]				SCI [40]			Faisca [52]			Biodinâmico [53]		
SE	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w</sub> , <sub>rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	
	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	
Α	0,34	0,12	0,20	0,42	0,16	0,35	0,33	0,16	0,34	0,11	0,04	0,09	
В	0,42	0,14	0,25	0,46	0,16	0,38	0,33	0,15	0,35	0,17	0,09	0,15	
С	0,42	0,15	0,36	0,46	0,18	0,38	0,33	0,15	0,34	0,17	0,06	0,15	
D	0,27	0,09	0,15	0,33	0,13	0,27	0,06	0,03	0,06	0,08	0,03	0,06	
Е	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	
F	0,34	0,13	0,37	0,44	0,17	0,37	0,13	0,06	0,13	0,10	0,03	0,09	
G	0,05	0,02	0,03	0,06	0,02	0,05	0,02	0,01	0,02	0,05	0,02	0,04	
Η	0,05	0,02	0,04	0,06	0,02	0,05	0,02	0,01	0,02	0,05	0,02	0,04	
Ι	0,27	0,10	0,30	0,33	0,13	0,28	0,06	0,03	0,06	0,09	0,03	0,08	

Tabela 19 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-II

Conforme a Tabela 19 é possível verificar que para o MC-II a região localizada sobre a seção B apresentou efeitos dinâmicos máximos. Além disso, a diferença mais expressiva encontrada nesta investigação diz respeito ao modelo de carregamento dinâmico SCI [40], [seção B:  $a_p = 0,46 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,16 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,38 m/s<sup>1,75</sup> (SCI)]. No que tange aos resultados encontrados para o modelo biodinâmico, verifica-se efeitos de nível menor [seção B:  $a_p = 0,17 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,09 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,15 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)], isso ocorre devido a interação dinâmica pessoa-estrutura e o amortecimento intrínsecos aos sistemas biodinâmicos.

Nesta sessão são apresentadas figuras contendo os pontos de aplicação das cargas para o modelo de carregamento III (MC-III), uma ilustração do sistema estrutural do piso em 3D (Figura 55a) e em planta (Figura 55b), assim como as seções analisadas (A a I), representada pelos pontos em vermelho. Além disso, vale ressaltar que nos pontos A e B a aplicação da carga coincide com os pontos analisados. Na sequência a Tabela 20 apresenta todos os valores com referência aos resultados calculados para o modelo de carregamento (MC-III). As figuras dos gráficos apresentando os deslocamentos e acelerações, no domínio do tempo e da frequência, sobre a seção estrutural A podem ser encontrados no Anexo 3.



Figura 55 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-III

	AISC [37]				SCI [4	0]	F	aisca [	52]	Biodinâmico [53]		
SE	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w</sub> , <sub>rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	aw,rms	VDV
	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>
Α	0,46	0,16	0,27	0,44	0,17	0,37	0,24	0,11	0,25	0,22	0,08	0,18
В	0,53	0,17	0,32	0,44	0,15	0,37	0,10	0,05	0,11	0,10	0,05	0,09
С	0,17	0,06	0,14	0,16	0,06	0,13	0,03	0,01	0,03	0,06	0,02	0,05
D	0,46	0,15	0,26	0,44	0,17	0,37	0,12	0,06	0,12	0,12	0,04	0,10
Е	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02
F	0,18	0,07	0,20	0,26	0,10	0,22	0,07	0,03	0,07	0,09	0,03	0,08
G	0,06	0,02	0,04	0,05	0,02	0,04	0,01	0,00	0,01	0,04	0,01	0,03
Η	0,06	0,02	0,04	0,05	0,02	0,04	0,01	0,00	0,01	0,04	0,01	0,03
Ι	0,18	0,06	0,20	0,26	0,10	0,22	0,07	0,03	0,07	0,07	0,03	0,06

Tabela 20 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-III

No que concerne a Tabela 20, os efeitos máximos para o MC-III ocorreram sobre a seção A, como pode ser observado. Ademais, a diferença mais expressiva verificada neste estudo refere-se ao modelo de carregamento dinâmico SCI [40], [seção A:  $a_p = 0,44 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,17 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,37 m/s<sup>1,75</sup> (SCI)]. Para fins comparativos, o modelo biodinâmico gerou os efeitos de nível menor [seção A:  $a_p = 0,22 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,08 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,18 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)] devido a incorporação das características dinâmicas dos indivíduos e suas respectivas localizações.

## 6.4.2.4 Modelo de carregamento IV (MC-IV)

Dando continuidade, são apresentadas as figuras contendo os pontos de aplicação das cargas para o modelo de carregamento IV (MC-IV), uma ilustração do sistema estrutural do piso em 3D (Figura 56a) e em planta (Figura 56b), assim como as seções analisadas (A a I), representada pelos pontos em vermelho. Na sequência a Tabela 21 apresenta todos os valores com referência aos resultados calculados para o modelo de carregamento (MC-IV). As figuras dos gráficos apresentando os deslocamentos e acelerações, no domínio do tempo e da frequência, sobre a seção estrutural A podem ser encontrados no Anexo 3.



Figura 56 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-IV

	AISC [37]			SCI [40]			Faisca [52]			Biodinâmico [53]		
SE	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV
	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>
Α	0,29	0,10	0,17	0,27	0,11	0,22	0,08	0,04	0,08	0,05	0,02	0,04
В	0,23	0,08	0,14	0,18	0,06	0,15	0,04	0,02	0,04	0,01	0,01	0,01
С	0,15	0,05	0,13	0,15	0,06	0,12	0,04	0,02	0,04	0,04	0,01	0,03
D	0,29	0,10	0,17	0,27	0,11	0,22	0,08	0,04	0,08	0,05	0,02	0,04
Е	0,04	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	0,03
F	0,17	0,06	0,19	0,28	0,11	0,24	0,08	0,04	0,08	0,03	0,01	0,03
G	0,12	0,04	0,08	0,09	0,03	0,07	0,03	0,01	0,03	0,04	0,01	0,03
Η	0,12	0,04	0,09	0,09	0,04	0,07	0,03	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03
I	0,17	0,06	0,19	0,28	0,11	0,23	0,07	0,03	0,07	0,02	0,01	0,02

Tabela 21 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-IV

A partir da Tabela 21 observa-se que sobre a seção A para o modelo de carregamento MC-IV foram produzidos efeitos máximos. Observa-se, ainda, que o modelo biodinâmico produziu resultados de efeitos mínimos [seção A:  $a_p = 0,05 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,02 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,04 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)] devido a incorporação das características dinâmicas dos indivíduos e suas respectivas localizações. Além disso, o modelo de carregamento dinâmico SCI [40] apresentou o contraste mais expressivo, se comparado aos demais modelos desta análise [seção A:  $a_p = 0,27 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,11 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,22 m/s<sup>1,75</sup> (SCI)].

## 6.4.3 Modelos de carregamento de V a VIII - 48 pessoas

Nesta seção são apresentados os resultados para os modelos de carregamento submetidos a carga total de 48 pessoas, divididas em quatro planos de laje consecutivos, ou seja, 12 pessoas em cada quatro áreas de 10 x 10 m. As situações de carregamento foram estruturadas para situarem-se tanto na direção Z, como nos modelos MC-V e MC-VI, quanto na direção X representado pelos modelos MC-VI e MC-VII.

Na sequência do trabalho são apresentadas figuras contendo os pontos de aplicação das cargas para o modelo de carregamento V (MC-V), uma ilustração do sistema estrutural do piso em 3D (Figura 57a) e em planta (Figura 57b), assim como as seções analisadas (A a I), representada pelos pontos em vermelho. Em continuidade, as Figuras 58 a 65 apresentam os gráficos dos deslocamentos e acelerações, no domínio do tempo e da frequência, sobre seção estrutural A, para cada modelo de carga dinâmica utilizado para representação das pessoas. Em seguida, a Tabela 22 apresenta todos os valores com referência aos resultados calculados para o modelo de carregamento (MC-V).



a) Vista tridimensional

b) Vista em planta











	AISC [37]				SCI [40]			Faisca [52]			Biodinâmico [53]		
SЕ	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	
	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	
Α	1,22	0,31	0,72	2,13	0,83	1,77	0,63	0,29	0,67	0,24	0,09	0,21	
В	0,87	0,22	0,51	1,19	0,47	0,99	0,35	0,16	0,37	0,32	0,12	0,28	
С	0,87	0,22	0,51	1,19	0,47	0,99	0,35	0,16	0,37	0,21	0,08	0,18	
D	1,01	0,25	0,59	1,67	0,65	1,38	0,42	0,19	0,45	0,30	0,12	0,27	
Е	0,03	0,01	0,02	0,06	0,02	0,05	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	
F	1,22	0,31	0,72	2,13	0,83	1,77	0,63	0,29	0,67	0,30	0,12	0,27	
G	0,66	0,17	0,39	0,89	0,35	0,74	0,16	0,07	0,16	0,09	0,04	0,08	
Н	0,13	0,03	0,08	0,21	0,08	0,17	0,05	0,02	0,05	0,03	0,01	0,02	
Ι	1,01	0,25	0,59	1,68	0,65	1,39	0,42	0,19	0,45	0,27	0,11	0,24	

Fahela 22 -	Resposta	estrutural	dinâmica	do niso	misto	(aco-concreto): MC-V
1 abeia 22 -	nespusia	esirulurai	umannica	uu pisu	1111510	$(a_{y}^{0}) = (0) = (0)$ . $ v ^{0} = v$

A partir da Tabela 22 observa-se que os efeitos dinâmicos máximos para o MC-V ocorreram sobre a seção A. Além do mais, a diferença mais expressiva encontrada nesta análise refere-se ao modelo de carregamento dinâmico SCI [40], [seção A:  $a_p = 2,13 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,83 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,77 m/s<sup>1,75</sup> (SCI)]. Para fins comparativos, o modelo biodinâmico produziu efeitos dinâmicos reduzidos [seção A:  $a_p = 0,24 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,09 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,21 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)], este comportamento ocorre em razão da interação dinâmica pessoa-estrutura e o amortecimento intrínsecos aos sistemas biodinâmicos.

#### 6.4.3.2 Modelo de carregamento VI (MC-VI)

Dando sequência a apresentação dos resultados, são expostas as figuras contendo os pontos de aplicação das cargas para o modelo de carregamento VI (MC-VI), uma ilustração do sistema estrutural do piso em 3D (Figura 66a) e em planta (Figura 66b), assim como as seções analisadas (A a I), representada pelos pontos em vermelho. Em seguida a Tabela 23 apresenta todos os valores com referência aos resultados calculados para o modelo de carregamento (MC-VI). As figuras dos gráficos apresentando os deslocamentos e acelerações, no domínio do tempo e da frequência, sobre a seção estrutural B podem ser encontrados no Anexo 3.



Figura 66 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-VI

	AISC [37]			SCI [40]			Faisca [52]			Biodinâmico [53]		
SЕ	ap	a <sub>w</sub> , <sub>rms</sub>	VDV	ap	aw,rms	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV
	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>
Α	0,90	0,23	0,53	1,01	0,38	0,74	0,23	0,11	0,22	0,10	0,04	0,09
В	1,06	0,26	0,62	1,03	0,40	0,86	0,25	0,12	0,26	0,18	0,06	0,16
С	1,05	0,26	0,62	1,04	0,41	0,86	0,24	0,11	0,25	0,09	0,03	0,08
D	0,69	0,17	0,41	0,82	0,32	0,68	0,15	0,07	0,16	0,08	0,03	0,07
Е	0,04	0,01	0,02	0,04	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
F	0,86	0,22	0,51	1,10	0,43	0,91	0,32	0,15	0,34	0,10	0,04	0,09
G	0,76	0,19	0,45	0,81	0,32	0,67	0,15	0,07	0,16	0,01	0,01	0,01
Н	0,13	0,03	0,08	0,15	0,06	0,12	0,04	0,02	0,05	0,01	0,01	0,01
Ι	0,66	0,16	0,39	0,82	0,32	0,68	0,15	0,07	0,16	0,07	0,03	0,06

Tabela 23 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-VI

Consoante a Tabela 23 verifica-se que os efeitos máximos dinâmicos para o MC-VI ocorreram na região correspondente à seção B. No que se refere ao modelo de carregamento dinâmico SCI [40], [seção B:  $a_p = 1,03 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,40 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,86 m/s<sup>1,75</sup> (SCI)] foi possível avaliar a diferença mais expressiva nesta análise. Por outro lado, o modelo biodinâmico produziu efeitos de nível mínimo [seção B:  $a_p = 0,18 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,06 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,16 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)] isto acontece em razão da incorporação das características dinâmicas dos indivíduos, considerando-se a interação ser humano-estrutura e o amortecimento, bem como suas respectivas localizações.

6.4.3.3 Modelo de carregamento VII (MC-VII)

Seguindo a sequência de apresentação dos resultados, são expostas as figuras contendo os pontos de aplicação das cargas para o modelo de carregamento VII (MC-VII), uma ilustração do sistema estrutural do piso em 3D (Figura 67a) e em planta (Figura 67b), assim como as seções analisadas (A a I), representada pelos pontos em vermelho. Em seguida a Tabela 24 apresenta todos os valores com referência aos resultados calculados para o modelo de carregamento (MC-VII). As figuras dos gráficos apresentando os deslocamentos e acelerações, no domínio do tempo e da frequência, sobre a seção estrutural B podem ser encontrados no Anexo 3.



a) Vista tridimensional

b) Vista em planta



SE	AISC [37]			SCI [40]			Faisca [52]			Biodinâmico [53]		
	ap	a <sub>w</sub> , <sub>rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w</sub> , <sub>rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV
	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>
Α	1,06	0,27	0,61	0,99	0,39	0,82	0,28	0,13	0,29	0,08	0,05	0,06
В	1,31	0,39	0,83	1,08	0,32	0,81	0,25	0,12	0,26	0,12	0,07	0,09
С	0,40	0,15	0,36	0,41	0,18	0,37	0,09	0,04	0,09	0,03	0,01	0,01
D	1,12	0,28	0,64	1,07	0,39	0,83	0,30	0,14	0,31	0,01	0,01	0,01
Е	0,05	0,02	0,04	0,04	0,02	0,04	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
F	0,46	0,25	0,51	0,67	0,44	0,88	0,19	0,09	0,19	0,04	0,01	0,03
G	1,25	0,32	0,79	1,01	0,40	0,84	0,24	0,11	0,25	0,11	0,04	0,09
Η	0,14	0,04	0,12	0,12	0,05	0,09	0,03	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01
Ι	0,49	0,27	0,56	0,71	0,48	0,97	0,20	0,09	0,21	0,01	0,01	0,01

Tabela 24 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-VII

A partir da Tabela 24 observa-se que os efeitos dinâmicos máximos para o MC-VII ocorreram sobre a seção B. Além disso, a diferença mais expressiva encontrada nesta investigação diz respeito ao modelo de carregamento dinâmico AISC [37], [seção B:  $a_p = 1,31 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,39 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,83 m/s<sup>1,75</sup> (AISC)]. Para fins comparativos, o modelo biodinâmico produziu efeitos mínimos [seção B:  $a_p = 0,12 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,07 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,09 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)] devido a incorporação das características dinâmicas dos indivíduos e suas respectivas localizações.

Dando sequência a apresentação dos resultados, são expostas as figuras contendo os pontos de aplicação das cargas para o modelo de carregamento VIII (MC-VIII), uma ilustração do sistema estrutural do piso em 3D (Figura 68a) e em planta (Figura 68b), assim como as seções analisadas (A a I), representada pelos pontos em vermelho. Em seguida a Tabela 25 apresenta todos os valores com referência aos resultados calculados para o modelo de carregamento (MC-VIII). As figuras dos gráficos apresentando os deslocamentos e acelerações, no domínio do tempo e da frequência, sobre a seção estrutural A podem ser encontrados no Anexo 3.



Figura 68 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-VIII

SE	AISC [37]			SCI [40]			Faisca [52]			Biodinâmico [53]		
	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w</sub> , <sub>rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV
	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>
Α	0,72	0,26	0,56	0,67	0,18	0,42	0,20	0,10	0,18	0,18	0,07	0,16
В	0,59	0,15	0,35	0,45	0,18	0,37	0,09	0,05	0,08	0,01	0,01	0,01
С	0,39	0,10	0,23	0,38	0,15	0,32	0,10	0,05	0,09	0,12	0,04	0,10
D	0,72	0,26	0,56	0,67	0,18	0,42	0,20	0,10	0,18	0,19	0,07	0,17
Е	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02
F	0,43	0,11	0,26	0,70	0,27	0,58	0,19	0,09	0,17	0,12	0,04	0,10
G	0,59	0,15	0,35	0,45	0,18	0,37	0,09	0,05	0,08	0,11	0,04	0,09
Н	0,29	0,07	0,17	0,22	0,08	0,18	0,07	0,04	0,07	0,01	0,01	0,01
Ι	0,43	0,11	0,25	0,70	0,27	0,58	0,19	0,09	0,17	0,01	0,01	0,01

Tabela 25 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-VIII
Segundo a Tabela 25 é possível identificar que os efeitos dinâmicos máximos para o MC-VIII ocorreram sobre a seção A. No entanto, a diferença mais expressiva encontrada nesta investigação diz respeito ao modelo de carregamento dinâmico AISC [37], [seção A:  $a_p = 0.72 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0.26 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0.56 m/s<sup>1,75</sup> (AISC)]. Além disso, o modelo biodinâmico produziu resultados compatíveis com efeitos mínimos [seção A:  $a_p = 0.18 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0.07 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0.16 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)] em função da interação ser humano-estrutura e o amortecimento, bem como suas respectivas localizações.

#### 6.4.4 Modelos de carregamento de IX a XIII - 64 pessoas

Nesta seção são apresentados os resultados para os modelos de carregamento submetidos a carga total de 64 pessoas, divididas em quatro planos de laje consecutivos, ou seja, 16 pessoas em cada quatro áreas de 10 x 10 m. As situações de carregamento foram estruturadas para situarem-se tanto na direção Z, como nos modelos MC-IX e MC-X, quanto na direção X representado pelos modelos MC-XI e MC-XII.

#### 6.4.4.1 Modelo de carregamento IX (MC-IX)

Na sequência do trabalho são apresentadas figuras contendo os pontos de aplicação das cargas para o modelo de carregamento IX (MC-IX), uma ilustração do sistema estrutural do piso em 3D (Figura 69a) e em planta (Figura 69b), assim como as seções analisadas (A a I), representada pelos pontos em vermelho. Em continuidade, as Figuras 70 a 77 apresentam os gráficos dos deslocamentos e acelerações, no domínio do tempo e da frequência, sobre seção estrutural A, para cada modelo de carga dinâmica utilizado para representação das pessoas. Em seguida, a Tabela 26 apresenta todos os valores com referência aos resultados calculados para o modelo de carregamento (MC-IX).



Figura 69 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-IX





Figura 76 - Deslocamento na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-IX



Figura 77 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-IX

		AISC [3	37]		SCI [40	0]	F	aisca [	52]	Bio	dinâmio	co [53]
SЕ	ap	a <sub>w</sub> , <sub>rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV
	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>
Α	2,75	0,94	1,60	3,14	1,22	2,61	1,11	0,52	1,15	0,86	0,31	0,72
В	1,83	0,60	1,10	1,76	0,60	1,46	0,99	0,45	1,04	0,98	0,49	0,84
С	1,70	0,60	1,45	1,76	0,69	1,44	0,62	0,29	0,64	0,59	0,21	0,51
D	1,98	0,65	1,13	2,47	0,96	2,05	0,62	0,29	0,64	0,53	0,19	0,45
Е	0,09	0,03	0,07	0,08	0,03	0,07	0,02	0,01	0,02	0,07	0,02	0,06
F	2,78	1,03	3,06	3,14	1,22	2,64	1,09	0,51	1,11	0,86	0,30	0,74
G	0,54	0,20	0,34	0,30	0,11	0,25	0,39	0,17	0,41	0,47	0,17	0,40
Н	0,54	0,19	0,39	0,30	0,12	0,25	0,39	0,18	0,41	0,47	0,17	0,40
Ι	1,89	0,68	2,12	2,47	0,96	2,06	0,62	0,29	0,64	0,31	0,11	0,27

Tabela 26 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-IX

Conforme a Tabela 26 verifica-se que os efeitos dinâmicos máximos para o MC-IX ocorreram sobre a seção A. Ademais, a diferença mais expressiva encontrada nesta análise equivale ao modelo de carregamento dinâmico SCI [40], [seção A:  $a_p = 3,14 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 1,22 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 2,61 m/s<sup>1,75</sup> (SCI)]. Para fins comparativos, o modelo biodinâmico gerou efeitos de ordem mínima [seção A:  $a_p = 0,86 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,31 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,72 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)] estes resultados ocorrem em razão da interação ser humano-estrutura e o amortecimento próprios do sistema biodinâmico.

Em prosseguimento a apresentação dos resultados, são expostas as figuras contendo os pontos de aplicação das cargas para o modelo de carregamento X (MC-X), uma ilustração do sistema estrutural do piso em 3D (Figura 78a) e em planta (Figura 78b), assim como as seções analisadas (A a I), representada pelos pontos em vermelho.

Em seguida a Tabela 27 apresenta todos os valores com referência aos resultados calculados para o modelo de carregamento (MC-X). As figuras dos gráficos apresentando os deslocamentos e acelerações, no domínio do tempo e da frequência, sobre a seção estrutural B podem ser encontrados no Anexo 3.



Figura 78 - Localização da carga para o MC-X

		AISC [3	37]		SCI [4	0]	F	aisca [	52]	Bio	dinâmio	co [53]
SЕ	ap	a <sub>w</sub> , <sub>rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w</sub> , <sub>rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV
	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>
Α	1,95	0,66	1,13	1,55	0,61	1,29	0,45	0,21	0,47	0,25	0,09	0,21
В	2,32	0,77	1,39	2,39	0,81	1,98	0,58	0,26	0,61	0,23	0,12	0,20
С	2,32	0,82	1,97	2,34	0,91	1,92	0,54	0,25	0,56	0,20	0,07	0,17
D	1,48	0,49	0,84	1,25	0,49	1,03	0,23	0,11	0,24	0,12	0,04	0,10
Е	0,08	0,03	0,06	0,08	0,03	0,07	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
F	1,95	0,72	2,15	1,52	0,59	1,28	0,44	0,21	0,45	0,14	0,05	0,12
G	0,30	0,11	0,19	0,28	0,11	0,23	0,05	0,02	0,05	0,01	0,01	0,01
Н	0,30	0,11	0,22	0,26	0,10	0,22	0,07	0,03	0,07	0,02	0,01	0,01
Ι	1,47	0,53	1,65	1,18	0,46	0,99	0,22	0,10	0,23	0,10	0,04	0,09

Tabela 27 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-X

A partir da Tabela 27 observa-se que os efeitos dinâmicos máximos para o MC-X ocorreram sobre a seção B. Além disso, a diferença mais expressiva encontrada nesta investigação diz respeito ao modelo de carregamento dinâmico SCI [40], [seção B:  $a_p = 2,39 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,81 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 1,98 m/s<sup>1,75</sup> (SCI)]. Para fins comparativos, o modelo biodinâmico produziu resultados de efeitos mínimos [seção B:  $a_p = 0,23 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,12 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,20 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)] devido a incorporação das características dinâmicas dos indivíduos e suas respectivas localizações.

# 6.4.4.3 Modelo de carregamento XI (MC-XI)

Prosseguindo com a apresentação do penúltimo resultado, são expostas as figuras contendo os pontos de aplicação das cargas para o modelo de carregamento XI (MC-XI), uma ilustração do sistema estrutural do piso em 3D (Figura 79a) e em planta (Figura 79b), assim como as seções analisadas (A a I), representada pelos pontos em vermelho. Em seguida a Tabela 28 apresenta todos os valores com referência aos resultados calculados para o modelo de carregamento (MC-XI). As figuras dos gráficos apresentando os deslocamentos e acelerações, no domínio do tempo e da frequência, sobre a seção estrutural A podem ser encontrados no Anexo 3.



		AISC [3	37]		SCI [4	0]	F	aisca [	52]	Biod	dinâmio	co [53]
SE	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w</sub> , <sub>rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	aw,rms	VDV
	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>
Α	2,19	0,74	1,27	1,51	0,59	1,25	0,98	0,46	1,02	0,18	0,06	0,15
В	2,08	0,62	1,07	1,51	0,51	1,25	0,61	0,27	0,64	0,05	0,02	0,04
С	0,78	0,28	0,66	0,57	0,22	0,47	0,55	0,25	0,57	0,05	0,02	0,04
D	1,72	0,57	0,98	1,51	0,59	1,25	0,98	0,46	1,02	0,17	0,05	0,14
Е	0,08	0,03	0,06	0,05	0,02	0,04	0,03	0,01	0,03	0,03	0,01	0,03
F	0,66	0,24	0,73	0,94	0,37	0,79	1,02	0,48	1,04	0,07	0,02	0,06
G	0,22	0,08	0,14	0,17	0,06	0,14	0,27	0,12	0,28	0,02	0,01	0,01
Н	0,22	0,08	0,16	0,17	0,07	0,14	0,27	0,13	0,28	0,02	0,01	0,01
Ι	0,66	0,24	0,74	0,94	0,37	0,78	1,02	0,48	1,06	0,07	0,02	0,06

Figura 79 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-XI

Tabela 28 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-XI

No que concerne a Tabela 28 foi possível identificar que os efeitos dinâmicos máximos ocorreram sobre a seção A, para o MC-XI. Ainda, a diferença mais expressiva encontrada nesta investigação equivale ao modelo de carregamento dinâmico AISC [37], [seção A:  $a_p = 2,19 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,74 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 1,27 m/s<sup>1,75</sup> (AISC)]. Nesta conjectura, para fins de comparação, o modelo biodinâmico produziu resultados de efeito mínimo [seção A: ap = 0,18 m/s<sup>2</sup>; aw,rms = 0,06 m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,15 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)] devido a incorporação das características dinâmicas ser humano-estrutura e suas respectivas localizações.

# 6.4.4.4 Modelo de carregamento XII (MC-XII)

Prosseguindo com a apresentação dos últimos resultados, são expostas as figuras contendo os pontos de aplicação das cargas para o modelo de carregamento XII (MC-XII), uma ilustração do sistema estrutural do piso em 3D (Figura 80a) e em planta (Figura 80b), assim como as seções analisadas (A a I), representada pelos pontos em vermelho. Em sequência a Tabela 29 apresenta todos os valores com referência aos resultados calculados para o modelo de carregamento (MC-XII). As figuras dos gráficos apresentando os deslocamentos e acelerações, no domínio do tempo e da frequência, sobre a seção estrutural A podem ser encontrados no Anexo 3.



Figura 80 - Posicionamento das cargas dinâmicas sobre o piso: MC-XII

		AISC [37]		SCI [40]		Faisca [52]			Biodinâmico [53]			
SП	ap	aw,rms	VDV	ap	aw,rms	VDV	ap	<b>a</b> <sub>w,rms</sub>	VDV	ap	a <sub>w,rms</sub>	VDV
-	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>	m/s²	m/s²	m/s <sup>1,75</sup>
Α	1,05	0,38	0,81	0,98	0,36	0,61	0,29	0,14	0,30	0,32	0,11	0,26
В	0,82	0,27	0,49	0,61	0,21	0,51	0,13	0,06	0,14	0,02	0,01	0,01
С	0,54	0,19	0,46	0,56	0,22	0,46	0,14	0,06	0,15	0,21	0,08	0,18
D	1,05	0,37	0,80	0,98	0,35	0,61	0,29	0,14	0,30	0,33	0,12	0,28
Е	0,03	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01	0,03
F	0,03	0,01	0,03	1,02	0,40	0,86	0,28	0,13	0,29	0,21	0,07	0,18
G	0,44	0,16	0,28	0,27	0,10	0,22	0,11	0,05	0,11	0,19	0,07	0,16
Н	0,44	0,16	0,32	0,27	0,11	0,22	0,11	0,05	0,11	0,02	0,01	0,01
Ι	0,63	0,23	0,71	1,02	0,40	0,85	0,28	0,13	0,29	0,02	0,01	0,01

Tabela 29 - Resposta estrutural dinâmica do piso misto (aço-concreto): MC-XII

Finalmente, com relação à Tabela 29 foi possível identificar que os efeitos dinâmicos máximos ocorreram sobre a seção A, para o MC-XII. Neste sentido, a diferença mais expressiva encontrada nesta investigação equivale ao modelo de carregamento dinâmico AISC [37], [seção A:  $a_p = 1,05 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,38 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,81 m/s<sup>1,75</sup> (AISC)]. Contudo, para fins comparativos, o modelo biodinâmico produziu resultados de efeitos mínimos [seção A:  $a_p = 0,32 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,11 \text{ m/s}^2$ ; VDV = 0,26 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)] devido a incorporação das características dinâmicas dos indivíduos e suas respectivas localizações.

#### 6.4.5 Análise comparativa dos resultados e conforto humano

Com base nos resultados apresentados neste capítulo, foram obtidos como parâmetros para avaliação do conforto humano, a aceleração de pico (a<sub>p</sub>), a aceleração rms (a<sub>w,rms</sub>) e os valores de dose de vibração (VDV). No que concerne avaliação do nível de conforto humano, os critérios em relação aos limites aceitáveis para atividades humanas divergem [40].

Em relação às acelerações de pico  $(a_p)$ , esta análise indicou que o limite de conforto humano proposto no guia de projeto AISC [37]  $(a_p < 0.5 \text{ m/s}^2)$  foi violado, alcançando valores expressivos para cada grupo de pessoas, onde: MC-IX (64 pessoas): [ $a_p$ : 3,14 m/s<sup>2</sup> (SCI)], MC-V (48 pessoas): [ $a_p$ : 2,13 m/s<sup>2</sup>(SCI)] e MC-I (20 pessoas): [ $a_p$ : 0,85 m/s<sup>2</sup> (SCI)] a partir do aumento do número de pessoas.

Por outro lado, o modelo biodinâmico [53] respeitou o critério em todos os modelos estudados exceto no MC-IX (64 pessoas): [a<sub>p</sub>: 0,86 m/s<sup>2</sup>]. Deste modo, os valores críticos de aceleração de pico (a<sub>p</sub>) obtidos em cada MC-Investigado para cada representação da carga dinâmica é apresentado na Tabela 30, onde o vermelho representa um valor acima do limite.

MC - Seção	AISC [37] (m/s²)	SCI [40] (m/s²)	Faisca [52] (m/s²)	Biodinâmico [53] (m/s²)					
	MC-I a IV - 20 pessoas								
MC-I - A	0,70	0,85	0,25	0,10					
MC-II - B	0,42	0,46	0,33	0,17					
MC-III - A	0,46	0,44	0,24	0,22					
MC-IV - A	0,29	0,27	0,08	0,05					
MC-V a VIII - 48 pessoas									
MC-V - A	1,22	2,13	0,63	0,24					
MC-VI - B	1,06	1,03	0,25	0,12					
MC-VII - B	1,31	1,08	0,25	0,12					
MC-VIII - A	0,72	0,67	0,20	0,18					
	M	C-IX a XII - 64 pe	ssoas						
MC-IX - A	2,75	3,14	1,11	0,86					
MC-X - B	2,32	2,39	0,58	0,23					
MC-XI - A	2,19	1,51	0,98	0,18					
MC-XII - A	1,05	0,98	0,29	0,32					
	Limite	e: AISC [37] a <sub>p</sub> <	0,50 m/s²						

Tabela 30 - Resumo das acelerações de pico (a<sub>p</sub>) nas seções críticas

No que concerne às acelerações rms (aw,rms) esta análise indicou que o limite de conforto humano não atendeu ao critério sugerido pelo guia de projeto SCI [40] (aw,rms < 0,35m/s<sup>2</sup>), onde os maiores valores foram alcançados nos modelos: MC-IX (64 pessoas): [awrms: 1,22 m/s<sup>2</sup> (SCI); aw,rms: 0,94 m/s<sup>2</sup> (AISC)], no entanto, apresentou resultados aceitáveis para os modelos biodinâmicos [53], atendendo ao critério proposto. O resumo dos valores críticos obtidos em termos de aceleração rms para todos os MC pode ser visto na Tabela 31, em vermelho.

MC - Seção	AISC [37] (m/s²)	SCI [40] (m/s²)	Faisca [52] (m/s²)	Biodinâmico [53] (m/s²)				
MC-I a IV - 20 pessoas								
MC-I - A	0,24	0,33	0,12	0,04				
MC-II - B	0,14	0,16	0,15	0,09				
MC-III - A	0,16	0,17	0,11	0,08				
MC-IV - A	0,10	0,11	0,04	0,02				
MC-V a VIII - 48 pessoas								
MC-V - A	0,39	0,83	0,29	0,09				
MC-VI - B	0,26	0,40	0,12	0,06				
MC-VII - B	0,39	0,32	0,12	0,07				
MC-VIII - A	0,26	0,18	0,10	0,07				
	M	C-IX a XII - 64 pe	ssoas					
MC-IX - A	0,94	1,22	0,52	0,31				
MC-X - B	0,77	0,81	0,26	0,12				
MC-XI - B	0,74	0,59	0,46	0,06				
MC-XII - A	0,38	0,36	0,14	0,11				
	Limite	: SCI [40]: aw,rms -	< 0,35 m/s²					

Tabela 31 - Resumo das acelerações rms (aw,rms) nas seções críticas

Em termos de valor de dose de vibração (VDV), foram obtidos valores aceitáveis dentro dos limites de conforto humano [50][51] para todos os modelos de carregamento submetidos a 20 pessoas. No entanto, os modelos MC-IX a XII, quando avaliados sob os critérios dos guias AISC e SCI apresentaram valores que excedem o recomendado, sendo mais expressivos: MC-IX (64 pessoas): [VDV: 2,61 m/s<sup>1,75</sup> (SCI); VDV: 1,60 m/s<sup>1,75</sup> (AISC)], no entanto, para os modelos biodinâmicos [53] apresentou resultados aceitáveis [53], exceto para o modelo MC-IX (64 pessoas): [VDV: 0,72 m/s<sup>1,75</sup>], atendendo ao critério proposto.

Sendo assim, o resumo dos valores críticos obtidos em termos de aceleração VDV para todos os MC pode ser visto na Tabela 32. Em vermelho, são os valores que ultrapassam o limite proposto por Satareh [50] e em azul os valores que ultrapassam o limite sugerido por Ellis e Ji [51].

MC - Seção	AISC [37] (m/s <sup>1,75</sup> )	SCI [40] (m/s <sup>1,75</sup> )	Faisca [52] (m/s <sup>1,75</sup> )	Biodinâmico [53] (m/s <sup>1,75</sup> )				
	MC-I a IV - 20 pessoas							
MC-I - A	0,42	0,71	0,26	0,05				
MC-II - B	0,25	0,38	0,35	0,15				
MC-III - A	0,27	0,37	0,25	0,18				
MC-IV - A	0,17	0,22	0,08	0,08				
MC-V a VIII - 48 pessoas								
MC-V - A	0,72	1,77	0,67	0,21				
MC-VI - B	0,62	0,86	0,26	0,16				
MC-VII - B	0,83	0,81	0,29	0,09				
MC-VIII - A	0,56	0,42	0,18	0,16				
	M	C-IX a XII - 64 pe	ssoas					
MC-IX - A	1,60	2,61	1,15	0,72				
MC-X - B	1,39	1,98	0,61	0,20				
MC-XI - B	1,27	1,25	1,02	0,15				
MC-XII - A	0,81	0,61	0,30	0,26				
L	imites: VDV < 0,	50 m/s <sup>1,75</sup> [50] e \	/DV < 0,66 m/s <sup>1,7</sup>	<sup>/5</sup> [51]				

Tabela 32 - Resumo dos valores de dose de vibração (VDV) nas seções críticas

Em resumo, observou-se que o aumento dos parâmetros está diretamente associado ao aumento da quantidade de pessoas sobre o piso, bem como a posição em que estes indivíduos estão dispostos. Sendo assim, os modelos MC-IX a MC-XII (64 pessoas) apresentaram os maiores valores deste estudo.

Além disso, os resultados relacionados ao método de estudo biodinâmico [53], gerou valores potencialmente menores que todos os outros métodos de análise (AISC [37], SCI [40] e Faisca [52]), para todos os casos de carregamento em relação as acelerações de pico, acelerações rms e VDV, esta diferença denota a influência do amortecimento das pessoas no que diz respeito à atenuação da resposta estrutural dinâmica do sistema, que somente a partir da modelagem dos sistemas biodinâmicos (efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura) pode ser levada em consideração.

# 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

# 7.1. Introdução

O objetivo deste trabalho de pesquisa diz respeito à análise de vibrações e avaliação do conforto humano de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a carregamentos dinâmicos humanos rítmicos (ginástica aeróbica). Para tal, a resposta estrutural dinâmica de um piso misto (aço-concreto) com dimensões de 40m x 40m e área total de 1.600m<sup>2</sup>, simulado numericamente via modelagem em elementos finitos por meio do programa ANSYS, foi investigada com base no desenvolvimento de análises do tipo modal (frequências naturais e modos de vibração), harmônica (transferência de energia da resposta), e de vibração forçada (deslocamentos e acelerações), visando o estudo do conforto humano do sistema. Assim sendo, neste capítulo são apresentadas as principais conclusões alcançadas a partir do desenvolvimento da pesquisa.

#### 7.2. Conclusões alcançadas

Em seguida são apresentadas as principais conclusões alcançadas ao longo do desenvolvimento deste estudo, com base na realização de uma investigação de natureza numérica, em função das análises do tipo modal, harmônica e de vibração forçada do piso misto (aço-concreto) investigado, além de uma avaliação acerca do conforto humano da estrutura.

a) Análise modal (frequências e modos de vibração)

A realização da análise modal [frequências naturais (autovalores) e modos de vibração (autovetores)] indicou a suscetibilidade do piso misto (aço-concreto)

investigado, no que tange a problemas relacionados a vibrações excessivas. Tal fato ocorre devido ao valor da frequência fundamental da estrutura (f<sub>01</sub> = 6,21 Hz) ser inferior aos valores mínimos recomendados [NBR 6118: f<sub>min</sub> = 9,6 Hz; AISC: f<sub>min</sub> = 9,2 Hz; NBR 8800: f<sub>min</sub> = 8 Hz]. Além disso, os valores das dez primeiras frequências naturais do piso (6,21 Hz a 7,40 Hz) encontram-se próximos da faixa de excitação equivalente ao terceiro harmônico de atividades aeróbicas, cuja variação é de 5,66 a 8,57 Hz segundo Faisca [52] e 4,5 a 8,4 Hz de acordo com Ellis e Ji [54]. Deste modo, em função dos valores das frequências naturais do piso misto (aço-concreto), vibrações excessivas e desconforto humano são esperados em função de possíveis ressonâncias entre as frequências de excitação e frequências naturais da estrutura.

# b) Análise harmônica

A análise harmônica foi desenvolvida no sentido de verificar as principais transferências de energia da resposta estrutural dinâmica do piso em estudo. Deste modo, foi verificada a existência de picos de resposta bem definidos coincidentes com a terceira, quinta, sexta e décima frequência natural do piso, sendo o terceiro modo de vibração (f<sub>03</sub> = 6,60 Hz) o que apresentou a principal contribuição referente à maior transferência de energia da resposta dinâmica do piso misto (aço-concreto). Desta maneira, tendo como base a contribuição dos modos, verifica-se uma tendência de possíveis problemas relacionados a vibrações excessivas.

### c) Análise dinâmica de vibração forçada

Esta investigação foi desenvolvida com base na utilização dos modelos matemáticos para a simulação numérica das ações dinâmicas humanas rítmicas. Inicialmente, foram utilizados os modelos de carregamento tradicionais denominados comumente de "força-dura". Após o que, tendo como objetivo principal a incorporação do efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura para a análise de vibração forçada do piso, foram empregados modelos biodinâmicos para a simulação das ações

dinâmicas humanas. Assim sendo, foram criados modelos de carregamento (MC) para a simulação das cargas dinâmicas provenientes das atividades humanas rítmicas sobre o piso (MC-I a MC-XII), considerando-se para tal 20, 48 e 64 pessoas atuando sobre o sistema estrutural. Em seguida, a resposta estrutural dinâmica do piso foi obtida em termos dos valores máximos dos deslocamentos e das acelerações [acelerações de pico (a<sub>p</sub>), acelerações rms (a<sub>w,rms</sub>) e valores de dose de vibração VDV].

De maneira a avaliar qualitativamente e quantitativamente o efeito da interação dinâmica produzidos pelos modelos de carga dinâmica sobre o piso, considerando-se a análise dos valores das acelerações de pico ( $a_p$ ), inicialmente, cabe ressaltar que para todos os casos investigados neste trabalho de pesquisa os modelos de "forçadura" produziram respostas dinâmicas superiores aquelas geradas com base no uso dos modelos biodinâmicos. A diferença mais expressiva encontrada nesta investigação diz respeito ao modelo matemático proposto pelo SCI [40] quando são comparados os valores das acelerações de pico para uma mesma seção estrutural do piso: MC-I [seção A:  $a_p = 0,10 \text{ m/s}^2$  (sistemas biodinâmicos);  $a_p = 0,85 \text{ m/s}^2$  (SCI)].

Por outro lado, o modelo matemático proposto por Faisca [52] apresentou valores mais próximos, da mesma ordem de grandeza, daqueles calculados via emprego dos sistemas biodinâmicos: MC-IX [seção A:  $a_p = 0.86 \text{ m/s}^2$  (sistemas biodinâmicos);  $a_p = 1,11 \text{ m/s}^2$  (Faisca)]. Estas diferenças, de natureza quantitativa, advêm do fato de que, muito provavelmente, o coeficiente de defasagem determinado experimentalmente por Faisca produz uma resposta dinâmica mais realista e próxima dos valores da resposta determinada com base no emprego dos sistemas biodinâmicos. Em contrapartida, os modelos matemáticos propostos pelo AISC [37] e SCI [40] devem ser considerados com cautela por parte dos projetistas de estruturas, pois podem vir a gerar valores exagerados para a resposta dinâmica de pisos (acelerações de pico), tornando o projeto antieconômico em determinadas situações.

#### d) Avaliação do conforto humano

A análise final de conforto humano de um sistema estrutural é tarefa bastante complexa e que requer sensibilidade por parte do projetista. Cabe ressaltar que

existem vários limites e recomendações de projeto disponíveis para este fim com base no uso dos valores de acelerações de pico, acelerações rms e valores de dose de vibração. Além disso, o número de indivíduos, os valores das frequências naturais da estrutura e, em especial, a faixa de trabalho das frequências de excitação dinâmica devem ser levadas em conta na análise de vibrações excessivas (conforto humano).

Deste modo, com base nos resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa (análises dinâmicas de vibração forçada), deve-se destacar que, considerando-se até 20 indivíduos praticando ginástica aeróbica sobre as lajes de concreto, o piso investigado não atende aos critérios de conforto humano ( $a_{lim} = 0,50 \text{ m/s}^2$ ), mediante análise dos valores das acelerações de pico (efeitos máximos) produzidas pelos modelos de carregamentos dinâmicos propostos pelo AISC [37] ( $a_p = 0,70 \text{ m/s}^2$ ) e SCI [40] ( $a_p = 0,85 \text{ m/s}^2$ ). Contudo, o quadro é completamente distinto, com atendimento aos limites de conforto humano, quando o modelo proposto por Faisca [52] ( $a_p = 0,33 \text{ m/s}^2$ ) e o modelo matemático que utiliza os sistemas biodinâmicos [53] ( $a_p = 0,22 \text{ m/s}^2$ ) são considerados na análise.

Com base no aumento do número de pessoas para 48 praticando ginástica aeróbica sobre o piso misto, cabe destacar que em apenas uma seção da estrutura o modelo proposto por Faisca [52] viola o critério de conforto humano [MC-V (seção A):  $a_p = 0,63 \text{ m/s}^2$ ], o que não ocorre quando os sistemas biodinâmicos [53] são considerados no estudo e o limite de conforto humano do piso investigado permanece sendo atendido [MC-V (seção A):  $a_p = 0,24 \text{ m/s}^2$ ]. Em seguida, novamente, aumentando o número de participantes das atividades rítmicas para 64, o limite de conforto humano da estrutura é violado quando os modelos de força dura são considerados, em praticamente todas as seções estruturais investigadas. Todavia, mediante o uso dos sistemas biodinâmicos [53], em apenas uma situação [MC-IX (seção A):  $a_p = 0,86 \text{ m/s}^2$ ], diante de 12 situações investigadas, o valor da aceleração de pico caracterizaria o não atendimento aos limites de conforto humano.

De maneira geral, este quadro se repete quando os valores das acelerações rms e VDV são considerados ao longo do estudo. Ou seja, os modelos matemáticos tradicionais de força dura (only force) propostos pelos guias de projeto do AISC [37] e SCI [40] transferem níveis de impacto sobre as lajes de concreto do piso bastante elevados e os limites de conforto humano não são atendidos na maioria dos casos investigados. Destaca-se que estes modelos (AISC [37]; SCI [40]) devem ser considerados com cautela por parte dos projetistas de estruturas, tendo em mente

questões de ordem econômica sobre o custo final do projeto. Por outro lado, o modelo proposto por Faisca [52] fornece valores para a resposta dinâmica do piso que se encontram em consonância com a realidade prática de projeto e, também, se aproximam, em termos quantitativos, dos valores calculados quando os sistemas biodinâmicos [53], que consideram o amortecimento das pessoas, são considerados na análise de conforto humano.

Finalmente, considerando-se todos os casos de carregamento dinâmico investigados ao longo do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, pode-se concluir que ao aumentar o número de pessoas praticando ginástica aeróbica sobre o piso misto (aço-concreto) de 20 para 64, os limites de conforto humano não são atendidos, especialmente para os valores das acelerações de pico (alim = 0,50 m/s<sup>2</sup>). Neste caso, a melhor solução seria modificar as características dinâmicas do piso misto (aço-concreto) (massa, amortecimento e rigidez), de maneira a afastar as frequências naturais da estrutura da faixa de frequências da excitação dinâmica.

### 7.3. Sugestões para trabalhos futuros

- a) Realizar testes experimentais para ampliar as faixas de determinação das características dinâmicas humanas (massa, rigidez e amortecimento), visando o aprimoramento dos modelos biodinâmicos;
- b) Realizar estudos experimentais sobre modelos estruturais de pisos de edifícios, de maneira a calibrar os sistemas biodinâmicos para várias faixas de frequências de excitação;
- c) Desenvolver estudos paramétricos de maneira a modificar a geometria dos elementos estruturais (lajes, vigas e pilares), e também de outras grandezas relevantes para a resposta dinâmica, tal como o amortecimento estrutural;
- d) Variar a frequência de excitação das atividades humanas rítmicas objetivando avaliar qualitativamente e quantitativamente a resposta estrutural dinâmica de pisos de edifícios;
- e) Implementar sistemas de controle de vibrações para redução da resposta estrutural dinâmica de pisos de edificações.

# REFERÊNCIAS

- [1] RAZÕES DO CORPO. Sucesso nos anos 80, ginástica aeróbica ainda é muito procurada. Publicado em 27 de setembro de 2013, Disponível em: http://www.razoesdocorpo.com/blog,484,sucesso-nos-anos-80-ginasticaaerobica -ainda-e.html, Acesso em: 06 de maio de 2022.
- [2] BOA FORMA. Boa Forma Experimenta: aula de jump. Publicado em 23 de novembro de 2021, Disponível em: https://boaforma.abril.com.br /movimento /experimenta-aula-de-jump/, Acesso em: 06 de maio de 2022.
- [3] 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.
- [4] WISS, J. F., PARMALEE, R. A. Human Perception of Transient Vibration.
  In:Journal of the Structural Division, v. 100, nº ST4, ASCE, p. 773-787, 1974.
- [5] BACHMANN, H. Case studies of structures with man-induced vibrations. Journal of Structural Engineering, v. 118, n. 3, p. 631-647, mar. 1992.
- [6] JI, T.; ELLIS, B. R., Floor Vibration Induced by Dance-Type Loads: Theory and Verification, The Structural Engineer, v. 72, n. 3 (Fev), pp. 37-50, 1994.
- [7] ALLEN, D. E.; MURRAY, T. M. Design Criterion for Vibrations to Walking. Engineering Journal of American Institute of Steel Construction, 4th quarter, pp. 117-129, 1993.
- [8] 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
- [9] 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
- [10]CEB. Vibrations problems in structures Practical guidelines. Bulletin d'information nº209. Comité Euro-International du Béton. Lausanne, Switzerland, 1991.
- [11]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.

- [12]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.
- [13] 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. 75–96, may. 2003.
- [14]HANAGAN, L. M. Walking-Induced Floor Vibration Case Studies. Journal of. Architectural. Engineering, v. 11, n. 1, mar. 2005
- [15] EBRAHIMPOUR, A.; SACK 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.
- [16]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.
- [17] 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, 2008.
- [18]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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] DE SILVA, S.; and THAMBIRATNAM, D. P. Vibration characteristics of concretesteel composite floor structures. ACI Structural Journal, v. 108, n. 6, nov/dec. 2011.

- [22]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.
- [23]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.
- [24]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.
- [25]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.
- [26]CRETU, 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29]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.
- [30]COSTA-NEVES, L.F.; SILVA, J.G.S.; 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.
- [31]SILVA, J. G. S; ANDRADE, S. A.L; LOPES, E. D.C. Parametric modelling of the dynamic behaviour of a steel–concrete composite floor. Journal of Engineering Structures. v. 75, p. 327-339, 2014.

- [32]GASPAR, C. M. R; SILVA, J. G. S. Influence of the Human Rhythmic Activities Modelling on the Composite Floors Dynamic Response. Journal of Civil Engineering and Architecture Research, v. 2, p. 429-437. 2015.
- [33] SHAHABPOOR, E; PAVIC, A; RACIC, V; ZIVANOVIC, S. Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures. Journal of Sound and Vibration, v. 387, p. 207-225. 2015
- [34]GASPAR, C; CAETANO, E; MOUTINHO, C; SILVA, J.G.S. Jumping load models applied on a gymnasium floor. Procedia Engineering, v. 199, p. 2802-2807. 2017.
- [35]CAMPISTA, F.F; SILVA, J.G.S. Vibration analysis of steel-concrete composite floors when subjected to rhythmic human activities. Journal of Civil Structural Health Monitoring. 2018.
- [36]SOUSA, F.A, AGUIAR, J.V, BRANCO, N.A.C, SILVA, J.G.S. Dynamic experimental monitoring and numerical analysis of floors subjected to human activities. Proceedings of the XLI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering CILAMCE 2020 (Online), ISSN 2675-6269, p 1-7, Brasil, 2020.
- [37] MURRAY, T.M.; ALLEN, D.E.; UNGAR, E.E. Steel Design Guide Series 11: Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity. Second edition. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- [39] 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.
- [40] SMITH, A.L.; HICKS, S.J.; DEVINE, P.J. Design of floors for vibrations: A new approach. SCI Publication P354, Ascot, 2009.
- [41] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations, Switzerland, 2007.
- [42] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 6472-1: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings: Vibration sources other than blasting, United Kingdom, 2008.

- [43]BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 6841: Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock, United Kingdom, 1987.
- [44] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2631-1: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements, Switzerland, 1997.
- [45]BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 6472: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1Hz to 80 Hz), United Kingdom, 1992.
- [46]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.
- [47] European Comitte for Standardization. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Bruxelles, BE, 2004.
- [48] 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.
- [49]WYATT, T.A. Design guide on the vibration of floors. SCI Publication 076. The Steel Construction Institute, Berkshire. UK, 1989, 32 p.
- [50] SETAREH, M. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity. Structures and Buildings, 165 (5), 219-231, 2012.
- [51] ELLIS, B. R; LITTLER, J. D. Response of cantilever grandstands to crowd loads. Part I: Serviceability evaluation, Structures and Buildings, 157(4): 235-241, 2004.
- [52] FAISCA, R. G. Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas, 230f. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL, 2003.
- [53]CAMPISTA, F. F. Modelagem de sistemas biodinâmicos para avaliação do comportamento estrutural dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas, 245f. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PGECIV). Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro/ RJ, Brasil, 2019.
- [54] ELLIS, B. R, Ji T. Loads generated by jumping crowds: Numerical modelling. Structural Engineer, 82(17): 35-40, 2004.
- [55] ANSYS Swanson Analysis Systems Inc. (2009), Theory Reference (R. 12.1).

[56]CHOPRA, A. K. Dynamics of structures – Theory and applications to earthquake engineering. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1995.

[57] CRAIG JR., R. R. Structural Dynamics. John Wiley & Sons, 527 p, 1981.

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

- [59]NEWMARK, Nathan M. A Method of Computation for Structural Dynamics. Journal of Engineering Mechanics Division. Volume 85 Issue 3. Urbana, USA. 1959.
- [60] AVELINO, Alves Filho. Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE: Análise Dinâmica. Ed Érica, 2008. 304 p.



# ANEXO 1 - Cargas dinâmicas modeladas através do SCI

Figura 81 - Carga dinâmica para 48 pessoas modelada através do SCI [40]



#### Sessenta e quatro pessoas

Figura 82 - Carga dinâmica para 64 pessoas modelada através do SCI [40]

**ANEXO 2** - Valores das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos da modelagem biodinâmica proposta das pessoas 1 a 64.

Indivíduo (i)	m <sub>i</sub> (kg)	c <sub>i</sub> (Ns/m)	k <sub>i</sub> (N/m)
1	92,70	820,94	42812,81
2	81,95	657,02	37521,26
3	67,80	547,48	34311,23
4	103,20	731,59	56476,16
5	65,50	515,59	35513,46
6	59,40	817,83	33525,97
7	82,65	874,99	43144,89
8	51,55	752,09	27494,99
9	68,00	530,29	37479,29
10	74,90	706,37	44151,98
11	74,90	467,48	34369,59
12	57,85	542,71	30262,11
13	87,55	778,75	41178,54
14	50,20	354,52	28591,69
15	59,70	399,20	43445,33
16	81,95	958,58	43467,55
17	91,85	1255,70	56394,76
18	69,70	645,85	38085,19
19	88,55	636,79	40037,26
20	64,80	768,36	37653,04
21	68,65	678,62	43094,19
22	80,65	445,92	34659,33

Tabela 33 - Características dinâmicas dos participantes 1 a 22 [53]

Indivíduo (i)	mi (kg)	c <sub>i</sub> (Ns/m)	ki (N/m)
23	60,30	446,88	31366,35
24	86,25	845,05	28816,87
25	78,80	442,65	41174,06
26	61,30	1156,33	29887,77
27	67,80	1212,11	22128,31
28	75,85	1284,14	32632,96
29	90,65	1512,29	32072,02
30	92,00	1464,23	41660,01
31	91,40	1730,64	42914,65
32	94,25	1246,80	39701,43
33	59,35	367,01	39229,12
34	82,00	406,37	42137,58
35	99,35	596,52	50889,73
36	99,35	1012,24	48133,92
37	78,25	657,11	29064,73
38	53,45	352,84	28286,45
39	75,15	946,86	43118,68
40	60,25	1064,39	30290,08
41	90,45	1094,51	31957,15
42	83,35	1240,87	15783,92
43	100,15	1718,83	41756,58
44	65,35	660,07	20201,83
45	71,30	1173,13	17268,99
46	75,15	463,1	25869,21

Tabela 34 - Características dinâmicas dos participantes 23 a 46 [53]

Indivíduo (i)	m <sub>i</sub> (kg)	c <sub>i</sub> (Ns/m)	ki (N/m)
47	86,40	496,17	29236,24
48	53,00	390,78	16498,29
49	60,70	316,01	19402,81
50	92,70	820,94	42812,81
51	63,15	1546,04	17063,87
52	70,85	1164,04	12883,57
53	51,10	844,51	19514,83
54	83,05	670,30	35368,71
55	81,85	539,08	51342,01
56	62,50	416,46	28996,23
57	52,85	945,48	42091,11
58	77,30	877,47	38508,47
59	78,10	972,14	31699,33
60	65,90	1152,13	46219,16
61	88,65	714,97	12282,21
62	73,75	280,31	49104,23
63	58,50	1560,61	34209,91
64	77,60	985,78	50568,27

Tabela 35 - Características dinâmicas dos participantes 47 a 64 [53]



**ANEXO 3** - Gráficos dos resultados analíticos

Modelo de carregamento II (MC-II)

Figura 86 - Aceleração na seção B para o modelo SCI para MC-II



Figura 90 - Aceleração na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-II

### Modelo de carregamento III (MC-III)





Figura 98 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-III

Modelo de carregamento IV (MC-IV)





Figura 106 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-IV

# Modelo de carregamento VI (MC-VI)









Figura 114 - Aceleração na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-VI

# Modelo de carregamento VII (MC-VII)





Figura 122 - Aceleração na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-VII
## Modelo de carregamento VIII (MC-VIII)





Figura 130 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-VIII

## Modelo de carregamento X (MC-X)





Figura 138 - Aceleração na seção B para o modelo Biodinâmico para MC-X







## Modelo de carregamento XII (MC-XII)





Figura 154 - Aceleração na seção A para o modelo Biodinâmico para MC-XII